

Sauerstoffverbrauch erfordert, so ist doch dieser Akt der Respiration qualitativ von weitgreifendster Bedeutung.

Wir kennen sonach mit Bestimmtheit bis jetzt drei verschiedene wichtige Funktionen der Respiration:

1) Die Zellenbildung. Diese ist ihre allgemeinste Funktion, indem alle organisirten Wesen, sowohl Pflanzen als Thiere, des Sauerstoffs zum Aufbau ihrer Zellen bedürfen. Sie tritt am reinsten bei den Pflanzen in die Erscheinung, die den Sauerstoff fast nur zu diesem Zwecke verwenden.

2) Die Muskelthätigkeit. Diese Funktion der Respiration kommt sämmtlichen Thieren, den Warmblütern wie den Kaltblütern, zu, bei welchen letzteren sie die wesentlichste Funktion der Respiration darstellt.

3) Die Wärmeerzeugung. Wenn diese auch durchschnittlich den grössten Sauerstoffverbrauch erfordert, so hat sie doch nur bei den Warmblütern die Bedeutung eines wirklichen Lebensprozesses.

Wahrlich die Geschichte des Sauerstoffs, sie umfasst die Geschichte des organischen Lebens!

XXVIII.

Ueber die Verbrennungswärme der Nahrungsstoffe.

Von Moritz Traube, Dr. phil. in Ratibor.

Die theoretische Berechnung der Verbrennungswärme sauerstoffhaltiger organischer Verbindungen geschieht, unter Annahme einer von Lavosier zuerst aufgestellten Hypothese, gewöhnlich in der Art, dass man allen Sauerstoff der Substanz als in Form von Wasser darin vorhanden annimmt und die Verbrennungswärme der noch übrig bleibenden Elemente als den gesuchten Werth betrachtet. Man hat längst eingesehen, dass diese Methode nicht genau ist.

Es lässt sich aber längst darthun, dass eine, auf so willkürlicher Voraussetzung beruhende Berechnung überhaupt nicht den geringsten Werth hat, denn es berechnet sich die Verbrennungswärme ganz verschieden, je nach dem man sich den Sauerstoff in der einen oder anderen Form in der Substanz enthalten denkt.

Mit demselben, ja mit grösserem Rechte, mit dem man z. B. den Traubenzucker ($C_{12}H_{12}O_{12}$) gleich 12 At. C und 12 At. (HO) betrachtet, kann man ihn zusammengesetzt annehmen aus 12 At. Kohlenoxyd (CO) und 12 At. Wasserstoff und, während nach der ersten Annahme seine Verbrennungswärme

$$= \frac{12 \times 6 \times 8080}{180} = 3232 \text{ W.-E.}$$

ist, berechnet sie sich nach der letzteren

$$= \frac{(12 \times 14 \times 2403) + (12 \times 34462)}{180} = 4540 \text{ W.-E.,}$$

also fast um die Hälfte grösser — eine enorme Differenz, die die gänzliche Unhaltbarkeit und Verwerflichkeit solcher willkürlicher Annahmen beweist.

Es ist offenbar, dass die Verbrennungswärme sauerstoffreicher, organischer Verbindungen in allen Fällen viel höher sein muss, als die Lavoisier'sche Berechnungsweise ergiebt. Der Sauerstoff ist nämlich (mit Ausnahme der Fälle, wo er Bestandtheil von basischem oder Krystallwasser ist) in allen organischen Körpern nicht in dem Zustande enthalten, in welchem er alle die Wärme bereits entwickelt hat, die er bei seiner Verbindung mit Kohlen- und Wasserstoff überhaupt zu erzeugen fähig ist und die er nur bei seiner vollkommenen Verbrennung zu Kohlensäure und Wasser erzeugt.

Er existirt in den verschiedenen organischen Verbindungen in verschiedenen Graden der Verdichtung und die, meist unter Wärmeentwickelung vor sich gehenden Gährungsscheinungen beruhen eben, wie ich an einem anderen Orte dargethan habe *), darauf, dass der Sauerstoff durch übertragende Fermente in innigere Verbindungen übergeführt wird, deren Zustandekommen wegen

*) M. Traube, Theorie der Fermentwirkungen. Berlin 1858.

der in der molekularen Anordnung gegebenen Widerstände ohne Fermente nicht möglich war. Es giebt organische Verbindungen, wie z. B. Schiessbaumwolle, Pikrinsalpetersäure u. s. w., in welche der Sauerstoff fast mit seiner ganzen wärmeerzeugenden Kraft eingetreten ist und die, nur mässig erwärmt, durch Verbrennung in sich auf Kosten ihres eigenen Sauerstoffs sehr bedeutende Wärmemengen entwickeln.

Auch das Stärkmehl und der ihm so nahe stehende Traubenzucker besitzt, wie bereits Ludwig nachgewiesen hat, eine viel höhere Verbrennungswärme, als sich nach der gewöhnlichen theoretischen Berechnungsform ergiebt und ich suche dieselbe nach den bis jetzt bekannten Thatsachen näher festzustellen, weil es an und für sich ein hohes Interesse hat, die Verbrennungswärme dieses so wichtigen Nahrungsstoffes kennen zu lernen, dann aber auch an diese Kenntniss einige für die Physiologie bedeutsame Folgerungen sich knüpfen lassen.

Das Stärkmehl geht bekanntlich durch Einwirkung der Diastase in Zucker, dieser durch Hefe in Kohlensäure und Alkohol über, der bei seiner Verbrennung endlich Kohlensäure und Wasser liefert. Man kann demnach das Stärkmehl durch die eben genannten chemischen Prozesse geradezu zu Kohlensäure und Wasser verbrennen und alle Wärme, die sich hierbei entwickelt, ist gleich der Verbrennungswärme des Amylums überhaupt.

Dass der Uebergang des Stärkmehls in Zucker unter Wärmeentwicklung stattfindet, ist wahrscheinlich; doch ist sie jedenfalls so unbedeutend, dass sie der Beobachtung bisher überhaupt entging und wir ohne erheblichen Fehler nur die Wärmebildung bei der alkoholischen Gährung und bei der Verbrennung des Alkohols zu berücksichtigen haben.

162 Gew.-Theile Stärkmehl liefern 180 Th. Traubenzucker und durch die Gährung desselben 92 Th. Alkohol. Die Verbrennungswärme dieses letzteren ist von Favre und Silbermann durch directe Bestimmung gefunden worden = 7184 W.-E. Demnach liefert ein Gewichtsteil Amylum durch die Verbrennung seines Alkohols 4080 W.-E.

Zur Berechnung der Wärmeentwicklung bei der alkoholischen

Gährung des Zuckers benützen wir folgende, allerdings nur unvollständige Daten.

Die höchste Temperatur, die man bei der sehr rasch (meist innerhalb 1 bis 3 Tagen) verlaufenden Gährung der Kartoffelmaische in den Branntweinbrennereien beobachtet hat, ist 16° C. höher als die der Umgebung *).

Es waren hier offenbar die günstigsten Bedingungen für die Ermittelung des von uns gesuchten Werthes gegeben: starker Zuckergehalt und grosse Menge der gährenden Flüssigkeit, sowie schneller Verlauf der Gährung und geringe Abkühlung.

Die ausgegohrene Kartoffelmaische enthält durchschnittlich 5, höchstens 6 Procent Alkohol **), welch' letzteres Quantum einen ursprünglichen Zuckergehalt der Maische von 11,7 Procent (entsprechend 10,5 Procent Amylum) voraussetzt.

Demnach ist die alkoholische Gährung von 10,5 Theilen Amylum im Stande, 100 Theile Maische trotz der während der Dauer der Gährung bedeutenden Wärmeverluste durch Strahlung, Leitung, Verdampfung des Wassers und Entweichung der miterwärmten Kohlensäure um 16° zu erwärmen.

Setzen wir die specifische Wärme der Kartoffelmaische gleich der des reinen Wassers, was gewiss ohne erheblichen Fehler zulässig ist; so würde aus obigen Daten sich ergeben, dass die Gährung von 1 Th. Amylum, wenn man obige Wärmeverluste unberücksichtigt lässt, $\frac{100 \times 16}{10,5} = 152$ W.-E. entwickelt.

Hier nach ist die Verbrennungswärme des Amylums mindestens gleich $4080 + 152 = 4232$ W.-E. ***)

Da ein Gewichtstheil Amylum $\frac{3}{8} \frac{6}{1}$ Th. Kohle enthält, so würden bei der Verbrennung desselben auf jedes Gramm Kohlenstoff, der

*) Knapp, Lehrbuch der chem. Technologie. II. Bd. S. 407, s. auch Bd. II. S. 287 über Gährung des Mostes.

**) a. a. O. S. 414 u. 417.

***) In Ludwig's Physiologie 2te Auflage S. 738 ist angegeben, dass die Verbrennungswärme des Traubenzuckers höher sein müsse als 4568 W.-E. Es ist hier irrtümlich die Verbrennungswärme des Amylalkohols statt der des Weinalkohols der Rechnung zu Grunde gelegt worden.

in Form von Kohlensäure unter den Verbrennungsprodukten erscheint, 9522 W.-E. entwickelt werden müssen, oder, mit anderen Worten ausgedrückt: die Verbrennungswärme des Kohlenstoffs des Stärkmehls beträgt 9522 W.-E. (Die Verbrennungswärme des reinen Kohlenstoffs beträgt nach Favre und Silbermann nur 8080 W.-E.)

Rechnen wir hierzu, dass bei dieser Berechnung der Wärmeverlust unberücksichtigt blieb, den die gährende Kartoffelmaische im Verlauf der Gährung erlitt, so können wir wohl die Verbrennungswärme des Kohlenstoffs des Amylums in runder Zahl zu mindestens 9600 W.-E. annehmen. (Jener Wärmeverlust würde dann 35 W.-E., d. h. nicht ganz den vierten Theil der beobachteten Wärmeentwicklung bei der alkoholischen Gährung betragen.)

Diese Ziffer, die wir vorläufig als eine nur annähernd genaue betrachten können, hat für die Physiologen ein sehr grosses Interesse. Das Amylum bildet nämlich, wie bekannt, den Hauptbestandtheil der Nahrung für die Pflanzenfresser und es ist durch Versuche von Dulong, Regnault und Reiset nachgewiesen, dass während der Verdauung diese Thiere vorzugsweise Kohlehydrate verbrennen, und fast sämmtlichen aufgenommenen Sauerstoff als Kohlensäure ausathmen.

Es kann keinem Zweifel unterliegen, dass in einem solchen Falle, der in Form von Kohlensäure ausgeatmete Kohlenstoff nahezu dieselbe Verbrennungswärme haben muss, wie der des reinen Stärkmehles.

Setzt man in der That in den Dulong'schen *) Versuchen über Pflanzenfresser die Verbrennungswärme des Kohlenstoffs = 9600 W.-E., die des Wasserstoffs = 34462 W.-E., so erhält man folgendes Ergebniss:

*) Annales de chim. et de phys. 3. Série. Bd. 1.

Nummer des Versuchs	In der ausgeathmeten Kohlensäure enthaltene Procente des eingearbeiteten Sauerstoffs	Beobachtete Wärme production des Thieres	Berechnete Wärme production des Thieres	Verhältniss der beobachteten Wärme production = 100 zu der berechneten
11.	94,9	8144 W. E.	7573 W.-E.	92,9
12.	94,9	8306	8328	100,2
13.	84,9	3523,7	3846	109,1
14.	94,7	11130	11260	101,2
15.	91,3	6336,8	7116	112,3
16.	91,9	8005,4	8032	100,3
17.	92,5	8898,5	9428	105,9
	92,2 im Mittel			103,1 im Mittel

Es sind hier namentlich die Versuche 11, 12 und 14 hervorzuheben, in denen die verhältnissmässig grösste Quantität Kohlehydrat verbrannt wurde. Unter diesen zeigen namentlich 12 und 14 einen mit der Rechnung sehr nahe übereinstimmenden experimentellen Befund.

Aber auch in den übrigen Versuchen (mit Ausnahme von 13 und 15) weicht das beobachtete Resultat nicht zu weit von dem berechneten ab.

Erstrecken wir dieselbe Berechnungsweise auch auf die Dulong-schen Versuche über die Fleischfresser, so erhält man folgende Werthe:

Nummer des Versuchs	In der ausgeathmeten Kohlensäure enthaltene Procente des eingearbeiteten Sauerstoffs	Beobachtete Wärme production des Thieres	Berechnete Wärme production des Thieres	Verhältniss der beobachteten Wärme production = 100 zu der berechneten
1.	74,4	8400 W.-E.	8500 W.-E.	101,2
2.	72,9	9802	9391	95,8
3.	78,4	9930,3	9788,7	98,6
4.	74,4	14474	15238	105,3
5.	74,7	10822	11056	102,2
6.	74,5	10015,7	10115	100,9
7.	73,3	10307,6	11497	111,5
8.	74,3	10115,7	11125	109,9
9.	70,5	3908	3903	99,9
10.	70,6	3892	4291	110,2
	73,8 im Durchschnitt			103,6 im Durchschnitt

Man darf aus Versuch 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9 dieser Tabelle schliessen, dass auch der im Organismus verbrennliche Kohlenstoff*) der Eiweisskörper, die den Hauptbestandtheil in der Nahrung der Fleischfresser bilden, eine nahezu ebenso grosse Verbrennungswärme besitzt, als der Kohlenstoff des Amylums. In der That gehören auch die Eiweisskörper zu den sehr sauerstoffreichen Verbindungen, welche, wie wir oben auseinandergesetzt haben, sämmtlich eine viel höhere Verbrennungswärme besitzen müssen, als die Berechnungsweise nach Lavoisier ergibt.

Für den Kohlenstoff der sehr sauerstoffarmen Fette dagegen ist die Verbrennungswärme nach directen Bestimmungen von Favre und Silbermann bedeutend geringer, geringer sogar als 8080 W.-E. (die Verbrennungswärme des elementaren Kohlenstoffs).

Es ist wahrscheinlich, dass in den obigen Versuchen 7, 8 und 10, in welchen die berechnete Wärmeproduktion viel höher ist, als die beobachtete, die Thiere erhebliche Mengen Fett verbrannt haben.

Ganz abgesehen aber von jeder Hypothese, haben wir die genauen Versuche Dulong's als thatsächliche Anhaltspunkte zu betrachten, für die Wärmemenge die ein Thier erzeugt, indem es gleichzeitig eine gewisse Menge Kohlen- und Wasserstoff verbrennt. Es ist hierdurch die Verbrennungswärme, die man diesen beiden Elementen im thierischen Körper beilegen kann, in bestimmte, durch die Ergebnisse des Versuchs gesteckte Grenzen gewiesen und es ergibt sich, dass

1) für die Pflanzenfresser, die mindestens 94 Prozent des eingeathmeten Sauerstoffs in Form von Kohlensäure aushauchen, die Verbrennungswärme des Kohlenstoffs nahezu 9600 W.-E., des Wasserstoffs = 34462 W.-E. beträgt.

2) Eine höhere Verbrennungswärme, als 9600 W.-E. für den Kohlenstoff im thierischen Organismus, sei es der Fleisch- oder Pflanzenfresser, anzunehmen, in keinem Falle statthaft ist, weil bei Zugrundelegung dieser Ziffer

*) Ein Theil des Kohlenstoffs der Eiweisskörper wird bekanntlich als unverbrennlich in Form von Harnsäure oder Harnstoff ausgeschieden.

die berechnete Wärmemenge, verglichen mit der wirklich beobachteten, in 17 Experimenten 10mal (in Vers. 12, 14, 16, 17, 1, 3, 4, 5, 6, 9) nahe ebenso gross, 5mal (in Vers. 13, 15, 7, 8, 10) beträchtlich höher und nur 2mal (in Vers. 11 u. 2), was wir wohl bei so sehr schwierigen Versuchen einem vorgekommenen Fehler zuschreiben dürfen, erheblich niedriger war.

Die Vermuthung Voits*), dass das Eiweiss eine viel beträchtlichere Verbrennungswärme besitzen müsse, als alle anderen Nahrungsstoffe, ist hiernach entschieden zurückzuweisen.

Es muss noch hervorgehoben werden, dass die von Dulong angewandten, öfters bemängelten Versuchsmethoden das grösste Vertrauen verdienen, denn die Zahlenresultate, soweit sie die Zusammensetzung der ausgeathmeten Gase betreffen, haben durch die neueren Versuche von Regnault und Reiset eine glänzende Bestätigung erhalten. Diese Forscher fanden das Prozentverhältniss des in der Kohlensäure enthaltenen zu dem überhaupt eingearbeiteten Sauerstoff bei Pflanzennahrung durchschnittlich = 91,9, in einer anderen Versuchsreihe = 92,8 (Dulong 92,2), bei Fleischfressern durchschnittlich = 74,5 (Dulong 73,8).

Dagegen würde man gut thun, die Versuche Despretz's**) über die thierische Wärme einfach aus der Wissenschaft zu streichen.

Dieser Forscher fand in seinen Versuchen über Pflanzensesser, dass auf 100 Theile eingearbeiteten Sauerstoff aushaucht:

in Vers. 1. Kaninchen . . .	75	Th. Kohlensäure
- - 3. 6 Kaninchen . . .	70,8	-
- - 5. Meerschweinchen . . .	78	-
- - 11. 3 Tauben . . .	77	-
- - 13. Hahn . . .	77	-

dass mithin die Pflanzensesser ungefähr ebenso viel Sauerstoff in Kohlensäure verwandeln, als in Dulong, Regnault und Reiset's Versuchen die Fleischfresser. Dies würde nur dann möglich gewesen sein, wenn die Thiere vor den Versuchen jedesmal 24—30 Stunden lang nüchtern geblieben wären, was wohl Despretz anzugeben nicht unterlassen hätte.

*) Einfluss des Kochsalzes u. s. w. S. 226.

**) Annales de chim. et de phys. 2. Série. Bd. 26.

Auch die Fleischfresser gaben in seinen Versuchen bedeutend weniger Kohlensäure [meist nur 60—67 Prozent (s. Versuch 7, 8, 9, 14)], als sie nach Regnault und Reiset unter normalen Verhältnissen ausathmen, so dass man schliessen muss, die Bestimmung der Kohlensäure, aus der in solchen Versuchen alle übrigen Werthe berechnet werden, sei bei Despretz eine höchst mangelhafte gewesen. Möglich auch, dass die Thiere in einem zu engen Raume athmeten und einen Theil der gebildeten Kohlensäure während des Versuchs im Blute zurückbehielten.

Es ist endlich noch darauf hinzuweisen, dass die Theorie von dem Ursprunge der thierischen Wärme lediglich aus chemischen Prozessen schon nach dem jetzigen Stande der Wissenschaft einer sehr genauen experimentellen Bewährtheit zugänglich ist.

Wenn nämlich die Pflanzenfresser überhaupt schon für gewöhnlich ungefähr $\frac{1}{10}$ des eingeathmeten Sauerstoffs in Form von Kohlensäure aushauchen, so verwandeln sie in der ersten Zeit der Verdauung meist fast sämmtlichen Sauerstoff in Kohlensäure. Sie verbrennen also in dieser Zeit fast reines Kohlehydrat.

Es geht dies aus denjenigen Versuchen von Regnault und Reiset hervor, in welchen sie längere Zeit mit Körnerfrüchten oder Brod gefüllte Pflanzenfresser mit solchem Futter zugleich in den Käfig brachten, das dann während des Versuchs verzehrt wurde.

Unter diesen Umständen athmete:

in Vers. 24. ein Kaninch. auf 100 Th. eingeathm. Sauerst. 99,7 Th. CO₂ aus

-	45.	Huhn	-	-	-	-	96,7	-	-
-	48.	desgl.	-	-	-	-	99,8	-	-
-	49.	desgl.	-	-	-	-	98,6	-	-
-	50.	desgl.	-	-	-	-	102,4	-	-
-	58.	desgl.	-	-	-	-	97,6	-	-

Würde man in solchem Falle die von dem Thiere entwickelte Wärmemenge bestimmen und mit der Verbrennungswärme derjenigen Menge Amylum verglichen, die der von dem Thiere ausgehauchten Kohlensäure entspricht, so würde ein ganz genaues Resultat zu erzielen sein.