

Ueber den Stoffverbrauch bei der Muskelaktion;

von
DR. HELMHOLTZ.

Eine der höchsten, das Wesen der Lebenskraft selbst unmittelbar betreffenden Fragen der Physiologie, nämlich die, ob das Leben der organischen Körper die Wirkung sei einer eigenen, sich stets aus sich selbst erzeugenden, zweckmässig wirkenden Kraft, oder das Resultat der auch in der leblosen Natur thätigen Kräfte, nur eigenthümlich modificirt durch die Art ihres Zusammenwirkens, hat in neuerer Zeit, besonders klar in Liebig's Versuch, die physiologischen Thatsachen aus den bekannten chemischen und physikalischen Gesetzen herzuleiten, eine viel concretere Form angenommen, nämlich die, ob die mechanische Kraft und die in den Organismen erzeugte Wärme aus dem Stoffwechsel vollständig herzuleiten seien, oder nicht. Schon längst hatten die Physiologen aus den Erscheinungen der Ermüdung und der allmäligen Wiederherstellung der Kräfte durch Ruhe gefolgert, dass zur Hervorrufung der mechanischen Effekte gewisse wägbare oder unwägbare Materien verbraucht würden, welche fortwährend durch die vegetativen Lebensprocesse neu erzeugt, sich in gewisser Quantität anhäuften, doch konnten kaum Ahnungen über die Natur der verbrauchten Stoffe und über den Ort des Umsatzes aufgestellt werden; das einzige auf eine chemische Aenderung

in den Muskeln selbst hinweisende Faktum war die Erfahrung, dass das Fleisch zu Tode getetzter Thiere sich im Geschmacke wesentlich von dem schneller getödteter unterscheidet. Einen genaueren Nachweis über den wirklichen Verbrauch wägbarer Stoffe gaben erst die neueren Harnuntersuchungen von Lehmann und Simon, in denen sich herausstellte, dass durch Muskelanstrengungen die Quantität der durch den Harn ausgeschiedenen stickstoffreichen Verbindungen, der schwefel- und phosphorsauren Salze vermehrt werde. Noch fehlte aber die Kenntniss aller Anfangs- und Mittelglieder des Processes und des Ortes ihrer Erzeugung, und da die Rückschlüsse auf sie aus den in den Exkretionen gefundenen Endprodukten stets sehr problematisch bleiben mussten, beschloss ich einen ganz directen Weg zu ihrer Erforschung zu versuchen. Beim Beginn kaum irgend ein positives Resultat hoffend, wurde ich desto mehr überrascht, als selbst die ersten, nur unvollkommen angestellten Probeversuche in die Augen fallende Thatsachen herausstellten, welche durch eine Reihe sorgfältigerer Wiederholungen vollkommen bestätigt wurden. Indem ich die Resultate dieser Versuche hier bekannt mache, kann ich allerdings erst einzelne Fakta geben, noch nicht eine vollständig zusammenhängende Uebersicht des ganzen Processes, weil zu einer solchen eine viel genauere Kenntniss der chemischen Eigenschaften und der elementären Zusammensetzung der sogenannten Extraktivstoffe des Fleisches gehört, als uns die bisherigen Erfahrungen über diese anscheinend wenig beachtenswerthen Körper gegeben haben; indessen achte ich es vorläufig für nicht unwichtig, auch nur bewiesen zu haben, dass wirklich in den Muskeln selbst eine messbare Umsetzung vor sich geht.

Um merkliche Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung der Muskeln durch ihre eigene Thätigkeit hervorzubringen, müssen dieselben zunächst dem fortdauernd alle Aenderungen ausgleichenden Einflusse des Blutumlaufs entzogen, also in abgetrennten Theilen oder an getödteten Thieren

den Versuchen unterworfen werden. Diese Forderung macht nöthig, uns wieder an die alten Märtyrer der Wissenschaft, die Frösche, zu wenden, weil bei den warmblutigen Thieren die Reizbarkeit nach dem Tode zu schnell abnimmt, und die Fischmuskeln auch auf ziemlich intensive Reizmittel verhältnissmässig viel schwächer reagiren. Als Reizmittel wandte ich anfangs einen kleinen 6 paarigen galvanischen Trogapparat an, später fand ich es vortheilhafter, eine kleine Elektrisirmaschine zu gebrauchen, mit der ich eine Leydner Flasche lud. Diese war mit einer Einrichtung versehen, um eine Reihe kleiner, schnell hintereinanderfolgender Entladungen zu geben; an dem Drathe nämlich, welcher zur inneren Belegung der Flasche leitet, ist vermittelt einer gebogenen Glasstange ein zweiter, durch einen Kork verschiebbarer Drath angebracht, welcher dem ersten näher oder ferner gestellt werden kann, um kleinere oder grössere Funken herauszulocken. Dieser zweite Drath wurde verbunden mit den thierischen Theilen, letztere mit der äusseren Belegung der Flasche; wird nun die Maschine in Thätigkeit gesetzt, so ladet sich die Flasche, entladet sich, sobald sie hinreichende Spannung erlangt hat, um einen Funken von der Länge der Distanz zwischen beiden Dräthen zu erzeugen, ladet sich wieder u. s. w. Die dadurch erhaltenen Entladungsschläge können zu einer viel bedeutenderen Intensität beliebig gesteigert werden, als es mit galvanischen Schlägen ohne eine sehr grosse Säule geschehen kann. Ausserdem wird es dadurch möglich, auch die letzten Reste der Reizbarkeit zu erschöpfen, ohne eine chemische Zersetzung durch den elektrischen Strom fürchten zu brauchen, welche bei einer grossen galvanischen Säule nicht zu umgehen wäre.

Die Versuche wurden folgendermassen ausgeführt: Zwei bis vier Fröschen wurden die Hinterschenkel dicht am Leibe abgeschnitten, von den Füßen im Fussgelenke getrennt, in zwei Partien getheilt, so dass von jedem Frosch ein Bein zu der einen, das andere zur andern Partie kam, dann schnell von der Haut befreit, durch Abspülen mit destillirtem Wasser

vom äusserlich anhängenden Blute gereinigt, mit einem Tuche getrocknet und abgewogen; die eine Partie blieb ruhig in einem Schälchen liegen, während die andere auf einer Glastafel so ausgebreitet wurde, dass das untere Ende jedes Beins mit dem oberen des nächsten zusammenstiess, die beiden äussersten Enden dieser Kette aber mit den Zuleitungsdräthen von der innern und äussern Belegung der elektrischen Flasche in Verbindung standen, und nun die Scheibe so lange gedreht, als sich noch Spuren von Zuckungen in den Schenkeln zeigten. Im Anfange riefen kleine Funken von $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{2}$ ''' , deren bei jeder Rotation der Scheibe etwa 2 erfolgten, und die fühlbare Erschütterungen in den Fingern erzeugten, wenn man die Drahtenden anfasste, heftige Zuckungen hervor, später mussten die Funken durch Verstellung des stellbaren Draths vergrössert werden, wonach sie natürlich seltener erfolgten. Durch 400—500 Schläge war die Reizbarkeit meist in kurzer Zeit erschöpft, während sie in den nicht elektrisirten Schenkeln fast noch unverändert war. Die beiden Parteien von Schenkeln wurden nun durch Eintauchen in heisses, oder längeres Liegen in kaltem destillirten Wasser ihrer Reizbarkeit beraubt, was in freier Luft zu lange gedauert hätte; es wurde alsdann das Fleisch von den Knochen abgetrennt, letztere mit einem Tuche getrocknet, gewogen und ihr Gewicht von dem der Schenkel abgezogen, um das des Fleisches zu erhalten, dieses der weiteren Analyse unterworfen. Der mögliche Fehler im Gewicht der Schenkel, verursacht durch etwaiges ungleichmässiges Abtrocknen, mochte bei diesem Verfahren etwa 2 Gran betragen, was bei einer Menge Fleisch von $1\frac{1}{2}$ — 3 Drachmen auf das Resultat nicht von wesentlichem Einfluss sein konnte; ausserdem diente als Controlle das Gewichtsverhältniss des am Schlusse der Analyse getrockneten Fleisches.

Unter den löslichen Bestandtheilen wurde zunächst das Eiweiss untersucht; zu dem Behuf wurden die Schenkel mehrmals mit gleichen Mengen destillirten Wassers übergossen, bis der letzte Aufguss nur noch eine geringe Trübung beim Er-

hitzen zeigte; die zusammengegossenen Flüssigkeiten wurden aufgeköcht, das geronnene Eiweiss abfiltrirt, getrocknet und gewogen; mit dem Eiweiss wird hierbei der Blutfarbstoff zugleich coagulirt, doch ist bei Fröschen dessen Menge so gering, dass das erstere kaum wahrnehmbar dadurch gefärbt wird. Da das Eiweiss grösstentheils, vielleicht ganz, aus dem im Fleische zurückgebliebenen Blute herkommt, und der Ausfluss des letztern aus den abgeschnittenen Gliedern mancherlei Zufälligkeiten unterworfen ist, zeigte auch die Menge dieses Stoffes zu unregelmässige Schwankungen, um die etwa vorhandene Zersetzung einer kleineren Menge desselben durch die Muskelaction noch entdecken zu lassen. Die Durchschnittszahlen von 6 möglichst genauen Versuchen sind 2,10 Procent des frischen Fleisches in den elektrisirten Portionen, 2,13 in den nicht elektrisirten; der Unterschied von 0,03 ist im Verhältniss zu denen, welche wir bei den andern Bestandtheilen finden werden, so gering, dass wir ihn vorläufig für unwesentlich halten müssen; die Unterschiede der Eiweissmengen zusammgehöriger Fleischportionen beliefen sich bis auf 0,2 Procent.

In der aufgeköchten Flüssigkeit blieben zurück die Extraktivstoffe des Fleisches; um dieselben noch vollständiger auszuziehen, wurde das vom Eiweiss befreite, in andern Versuchen auch gleich das frische Blut mit neuen Portionen destillirten Wassers aufgeköcht und digerirt. Durch das Aufköchen wurde zugleich Hemmung jedes etwaigen Anfangs von Fäulniss bezweckt; es wurde jedoch nur einige Augenblicke fortgesetzt, um die Bildung von zu vielem Leim zu verhüten. War das Fleisch ausgezogen, so wurden die Lösungen eingedampft, entweder bis zur Trockne, wenn beabsichtigt wurde, die in wasserfreiem Alkohol löslichen Extraktivstoffe (das Alkoholextrakt) zu sondern, oder bis zur dünnen Syrupconsistenz, und zwar auf beiden Seiten bis zu gleichem Gewicht, wenn die in wasserhaltigem Alkohol löslichen Bestandtheile (Spiritusextrakt) ausgezogen werden sollten. Zu dem letztern

Zwecke wurde die zehnfache Quantität 90procentigen Weingeistes zu beiden hinzugefügt, so dass durch die Vermischung etwa ein 80procentiger entstand, die Lösung vom Niederschlage (Wasserextrakt) abfiltrirt, vorsichtig zur Trockne in Glasschälchen von bekanntem Gewicht eingedampft und noch warm mit der Schale gewogen, weil sie schon während des Erkaltens ihr Gewicht durch Anziehen hygroskopischen Wassers verändern. Das Wasserextrakt wurde durch kaltes Wasser gelöst, wobei der durch das Kochen gebildete Leim zurückblieb und ebenfalls dem Gewichte nach bestimmt. Wenn man dafür sorgt, dass alle diese Operationen mit beiden Fleischportionen ganz gleichmässig und unter ganz gleichen Umständen ausgeführt werden, erhält man richtige relative Verhältniszahlen, selbst bei minder sorgfältiger Bestimmung der absoluten Mengen. Letztere zu bestimmen hat grosse Schwierigkeiten, weil es nicht immer gelingt, die Filtra ganz vollständig von den schwer filtrirbaren organischen Stoffen auszuwaschen; doch habe ich mich durch besondere Versuche überzeugt, dass die zurückbleibenden Quantitäten zu gering sind, um auf das Resultat von Einfluss zu sein.

Für diese Extrakte stellte sich nun in allen Versuchen ohne Ausnahme das Resultat heraus, dass das Wasserextrakt in den elektrisirten Fleischportionen vermindert, umgekehrt das Spiritus- und Alkoholextrakt vermehrt waren gegen die des nicht elektrisirten Fleisches. Ich führe hier die durch eine Reihe von genaueren Versuchen gewonnenen Zahlenverhältnisse auf.

Nummer des Versuchs.	Alkoholextrakt auf 100 Theile des frischen Fleisches.		
	a) im elektrisirten Fleische.	b) im nicht elektrisirten Fleische.	Verhältniss a : b
I	0,752	0,606	1,24
II	0,569	0,427	1,33
III	0,664	0,481	1,38
IV	0,652	0,493	1,32
V	0,575	0,433	1,33
Auszug mit 95 procent. Alkohol.			
VI	1,020	0,748	1,36

Nummer des Versuchs.	Wasserextrakt			Spiritusextrakt		
	a) im elektrisirten Fleische.	b) im nichtelektrisirten Fleische.	Verhältniss a : b	c) im elektrisirten Fleische.	d) im nichtelektrisirten Fleische.	Verhältniss c : d
VII	1,21	1,63	0,79	1,69	1,50	1,13
VIII	0,93	1,23	0,76	1,65	1,35	1,22
IX	0,72	0,90	0,80	1,76	1,53	1,15
Mittel	0,95	1,25	0,78	1,70	1,46	1,16

Das oben hingestellte Resultat stellt sich in diesen Zahlen deutlich heraus, wenn auch die Verhältnisse a:b und c:d der zweiten Tafel noch sehr variiren, was zum Theil von der grösseren oder geringeren Intensität der Zuckungen herrühren mag, die in dem nicht elektrisirten Fleisch durch Präparation, Luft, warmes Wasser hervorgerufen werden. Zu bemerken ist noch, dass der Unterschied der Wasserextrakte im Mittel 0,3 ziemlich entspricht dem der Spiritusextrakte 0,24.

Was die weitere Trennung der Extraktivstoffe durch Metallsalze betrifft, so giebt Sublimat nur einen geringen Nieder-

schlag; neutrales und basisches essigsaures Bleioxyd einen starken weissen, der aber durch einen Ueberschuss des Fällungsmittels wieder theilweise gelöst wird, daher der Menge nach schwer zu bestimmen ist. In der vom Niederschlag des Wassereextrakts durch das neutrale Salz abfiltrirten Flüssigkeit bewirkt das basische noch eine geringe Trübung, nicht aber in der des Spiritusextrakts. Bei möglichst vorsichtiger Fällung erhielt ich in den Versuchen VIII und IX vom Niederschlag durch das neutrale Salz aus dem Spiritusextrakt des elektrisirten Fleisches 1,04 und 1,76, aus dem des nicht elektrisirten 0,95 und 1,23; aus dem Wassereextrakt des ersteren 1,43 und 1,50; aus dem des letzteren 1,34 und 1,54 auf 100 Theile frischen Fleisches.

Nach Lehmann's Untersuchungen über die Harnveränderungen nach körperlichen Anstrengungen hielt ich es für wichtig, besonders auch die Schwefelverbindungen zu berücksichtigen; von Schwefelalkalien oder Schwefelwasserstoff, Verbindungen, die sehr leicht auch in den kleinsten Mengen zu entdecken sind, fand ich in den Lösungen der Extraktivstoffe keine Spur; die schwefelsauren Salze werden durch Zusatz von Chlorbarium zu diesen Lösungen ausgefällt, doch ist ihre Menge zu gering, um vergleichende Gewichtsbestimmungen zu erlauben. Wenn die Extraktivstoffe nachher abfiltrirt, eingedampft und mit Salpeter eingäschert wurden, zeigte sich in der mit Salzsäure angesäuerten Lösung des Rückstandes keine Spur von Fällung durch Chlorbarium; woraus hervorgeht, dass die schwefelsauren Salze schon vollständig durch das erwähnte Verfahren entfernt waren, und dass ausserdem die untersuchten Extraktivstoffe keinen Schwefel enthalten.

Was die Fette betrifft, so habe ich in einem besonders deshalb angestellten Versuche durchaus gleiche Mengen aus beiden Fleischportionen durch Alkohol und Aether ausgezogen. Harnstoff habe ich in den Alkoholextrakten nicht finden können.

Als Ursache der dargestellten Veränderungen betrachte

ich den bei der Muskelaktion Statt findenden chemischen Process; doch könnte vielleicht das Bedenken aufsteigen, dass als solche die Elektrizität oder selbst eine beginnende Fäulniss zu betrachten sei. Obgleich chemische Zersetzungen durch eine so geringe Quantität von Elektrizität, wie sie meine kleine Maschine lieferte, bisher noch nicht beobachtet sind, habe ich doch einen Gegenversuch darüber angestellt, indem ich zwei Froschschenkel durch laues Wasser von 30° R. ihrer Reizbarkeit beraubte, dann den einen eben so lange elektrisirte, als sonst die noch reizbaren Schenkel, und analysirte. Die Mengen der einzelnen Extrakte aus beiden Schenkeln waren durchaus gleich. Den zweiten Einwurf könnte man besonders aus der Angabe mehrerer Autoren zu begründen suchen, dass durch Elektrizität ihrer Reizbarkeit beraubte Muskeln und das Fleisch gehetzter Thiere schneller faule, so dass obige Aenderungen Wirkungen der Fäulniss sein könnten. Dem habe ich entgegenzustellen, dass ich erstens in besonders deshalb mit der erforderlichen Sorgsamkeit zur Vermeidung fremder Einflüsse angestellten Versuchen, in denen ich das gegen Fäulniss so empfindliche Lakmuspigment als Reagens anwandte¹⁾, nie eine schnellere Fäulniss des einen oder anderen Theils bemerkt habe, und dass zweitens in den obigen Versuchen nur bei No. VI der Aufguss kalt gemacht ist, die anderen aber alle nach je 6—12 Stunden aufgekocht sind, während sich die ersten Zeichen der Fäulniss in den deshalb angestellten Versuchen durch Entfärbung des Lakmus erst nach 36—48 Stunden zeigten.

Um die Gültigkeit der gefundenen Resultate auch für andere Thierklassen zu prüfen, stellte ich Versuche mit einer Quappe und einer Taube an. Von der ersteren benutzte ich den Schwanz, den ich durch einen Querschnitt in der Gegend des Afters vom Leibe trennte, und durch einen zweiten Quer-

1) S. meine Abhandlung über das Wesen der Fäulniss und Gährung im vorigen Jahrgang des Archivs.

schnitt in zwei ziemlich gleiche Theile theilte; den einen elektrisirte ich, indem ich an den zuleitenden Dräthen Nadeln befestigte und diese in die beiden Oeffnungen des Rückenmarkkanals einstach; die Zuckungen waren bei gleicher Intensität der Elektrizität unverhältnissmässig schwächer als in den Froschschenkeln, das Fleisch wurde nach Erlöschung der Reizbarkeit des nicht elektrisirten Theils (nach 4 Stunden) von der Haut und den Knochen getrennt, gewogen und mit kaltem Wasser infundirt. Ich erhielt:

	a) im elektrisirten Stück.	b) im nicht elektrisirten Stück.	Verhältniss a : b
Eiweiss	2,26	2,27	—
Wasserextrakt	1,23	1,39	0,88
Spiritusextrakt	2,20	1,93	1,14

Viel schwieriger sind die Versuche an warmblütigen Thieren anzustellen, wegen des raschen Erlöschens der Reizbarkeit in ausgeschnittenen oder freigelegten Theilen. Die besten Resultate erhielt ich noch, indem ich bei einer decapitirten Taube die Zuleitungsdräthe mittelst Nadeln mit dem grossen Brustmuskeln verband. Die des einen stach ich in den Oberarm, zwei aber, welche am andern befestigt waren, auf derselben Seite dicht neben der Krista des Brustbeins ein, und gab dann den elektrischen Schlägen eine mässige Intensität, so dass starke Reflexaktionen dadurch nicht hervorgerufen werden konnten; noch mehr gemässigt musste die Intensität der Schläge werden, als die Reizbarkeit des elektrisirten Brustmuskels anfang, durch die Aktion erschöpft zu werden, weil sonst die reflektirten Zuckungen der ungeschwächten Muskeln eben so stark wurden, wie die des direkt afficirten. Was man übrigens an Zeit verliert durch das schnelle Erlöschen der Reizbarkeit, wird zum Theil ersetzt durch die viel heftigere Aktion der gereizten Muskelpartien; so dass das Resultat

der Zersetzungen noch deutlich hervortritt, wenn es auch viel geringer ist, als bei den früher angeführten Thieren. Ich erhielt:

	a) im elektrisirten Muskel.	b) im nicht elektrisirten Muskel.	Verhältniss a : b
Eiweiss	2,04	2,13	—
Wasserextrakt	0,64	0,73	0,88
Spiritusextrakt	1,68	1,58	1,06

Unerledigt muss ich allerdings in diesem Aufsätze noch eine der wichtigsten Fragen lassen, ob nämlich der Muskelfaserstoff mit an der Zersetzung Theil nimmt. A priori wäre es wohl wahrscheinlich, weil wir die Proteinverbindungen überall als Träger der höchsten Lebensenergien finden, und speciell in unserem Falle das Erscheinen einer grösseren Quantität schwefelsaurer und phosphorsaurer Salze im Urin nach Muskelanstrengungen gerade für eine Zersetzung schwefel- und phosphorhaltiger Verbindungen spricht, indessen war mir eine direkte Entscheidung durch Versuche bisher noch nicht möglich, weil die Fehler, welche aus der nicht zu regulirenden grösseren oder geringeren Anfüllung mit Blut, der grösseren oder geringeren Anfeuchtung entspringen, den relativen Gehalt an festen Theilen nicht genau genug vergleichbar machten. Es schwanken nämlich die beobachteten Abwägungen so, dass bald die eine, bald die andere Seite um $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{2}$ Procent grösser ist, und höher möchte sich eine etwaige Zersetzung des Faserstoffs nicht belaufen; die durchschnittliche Menge der festen zurückbleibenden Theile beträgt 20 Procent vom frischen Fleische bei den Fröschen und Tauben, 12,5 bei den Fischen. Gegen eine Zersetzung des Faserstoffs scheint in den obigen Versuchen der Umstand zu sprechen, dass meistens sich die Mengen des verlorenen Wasserextrakts und gewonnenen Spiritusextrakts ziemlich entsprechen.

Ich glaube durch die angeführten Facta den versprochenen Nachweis geführt zu haben, dass während der Aktion der Muskeln eine chemische Umsetzung der in ihnen enthaltenen Verbindungen vor sich geht; die gewonnenen Erfahrungen stehen allerdings noch vereinzelt und ohne inneren Zusammenhang da, doch habe ich mich hier auf ihre Darlegung beschränkt, weil meine weiteren Untersuchungen über diesen Punkt, aus denen vielleicht ein tieferes Verständniss des Processes hervorgehen möchte, mir noch einer genaueren Begründung und specielleren Durchführung fähig zu sein scheinen, und dazu noch eine genauere Untersuchung der Extraktivstoffe nöthig ist, weshalb ich ihre Veröffentlichung noch verschieben will.