



LXXXII.

Ueber das Wesen der Fäulniss und Gährung.

Aus Joh. Müller's Archiv für Anatomie und Physiologie.
Jahrgang 1843. S. 453—462.

⁴⁵³ Ueber den Grund der sogenannten freiwilligen Zersetzungsprocesse des Lebens beraubter organischer Substanzen sind bisher unter Chemikern und Physiologen höchst widersprechende Ansichten herrschend gewesen. Beide Theile hatten sich überzeugt, dass solche Stoffe nicht in Fäulniss oder Gährung übergehen, wenn sie in verschlossenen Gefässen ohne Zutritt der Luft bis zum Siedepunkte erhitzt werden; Gay-Lussac zeigte ausserdem, dass auch ohne Anwendung einer erhöhten Temperatur die Gährung des Traubensaftes vermieden werden könne, wenn man die Beeren bei sorgfältigem Abschluss der Luft unter Quecksilber auspresste. Es stimmten deshalb alle darin überein, dass jene Zersetzungen keine freiwilligen seien, sondern dass erst der Zutritt eines anderen in der Atmosphäre enthaltenen Agens den Anstoss dazu geben müsse. Da es sich nun fand, dass ein Theil des hinzutretenden Sauerstoffes sich mit den Bestandtheilen der organischen Stoffe verbinde, so glaubten sich die meisten Chemiker zu dem Schlusse berechtigt, dass eben der Sauerstoff durch seine hervorstechende Verwandtschaft zu diesen Stoffen den Anstoss zum Zersetzungsprocesse gebe, entweder indem durch Oxydation Substanzen entstanden, welche durch katalytische Kraft das Zerfallen der ⁴⁵⁴ Masse bewirken, oder indem nach Liebig's Theorie der Gährung die chemische Bewegung, welche mit der Oxydation (Verwesung) verbunden sei, sich auf die übrigen Atome fort-

pflanze und sich in diesen bei nicht hinreichendem Sauerstoffzutritt als blosse Metamorphose der Verbindung darstelle.

Daneben war es jedoch längst bekannt, dass sich in allen faulenden thierischen und pflanzlichen Substanzen mikroskopische Organismen in ungeheurer Zahl bilden, man hatte bei dem Streite über die *Generatio aequivoca* auf das sorgfältigste die Bedingungen, unter welchen sich dieselben entwickeln, bestimmt und gefunden, dass sobald ein ausgekochter fester oder flüssiger, organischer Stoff nur mit ausgekochtem Wasser und ausgeglüheter Luft in Berührung kommt, weder Fäulniss noch Entwicklung von Organismen bemerkt wird, dass sich beide aber sehr bald einstellen, sobald auch nur ein Minimum von einem jener Stoffe hinzutritt, ohne vorher die Siedhitze passiert zu haben; dass ferner auch durch Beimischung starker chemischer Agentien, wie der Säuren, der schweren Metallsalze stets jene beiden Processe zugleich verhindert oder aufgehoben werden. Die immer mehr ausgebreitete Anwendung des Mikroskops lehrte bald auch die Existenz bestimmter Organismen bei der weinigen und sauren Gährung der Zuckersäfte, des Alkohols, der Milch etc. kennen. Besonders wurde Schwan's Beobachtung von der vegetabilischen Natur der Hefe von grosser Wichtigkeit, weil dieselbe eine sehr constante Form darbietet und sich durch Uebertragung der Pflanzenzellen auch in reiner Zuckerlösung, die sonst nicht gährungsfähig ist, Gährung hervorbringen lässt. Auch an diesem Processe wies Schwan nach, dass er durch ausgeglühete Luft nicht eingeleitet werden kann. In Betracht der so stetigen Verbindung zwischen den Zersetzungsprocessen und der Entwicklung mikroskopischer Organismen, sowie der Gleichheit der Mittel, durch welche beide Vorgänge gehemmt werden, kamen viele Physiologen zu der Ansicht, dass die Zersetzung nur Folge des Lebensprocesses sei, dass sich jene Organismen von den zersetzten Materien genährt und die Zersetzungsproducte durch die Secretionen von sich gegeben hätten.

Von vielen unserer grössten Chemiker wurden jedoch die meisten Facta, worauf sich diese Ansicht stützt, ignorirt und als physiologische Phantasien betrachtet. Die vegetabilische ⁴⁵⁵



Natur der Hefe verwarfen sie, sich auf eine Beobachtung Ehrenberg's stützend, dass auch unorganische Niederschläge sich zuweilen zu rosenkranzförmigen und ästigen Figuren aneinander reihen. Dagegen sind in neuerer Zeit entwickeltere Formen gährerregender Vegetabilien bekannt geworden, wie sie sich namentlich in gährendem diabetischen Harn finden, welche durch Bildung grösserer, länglicher, kernhaltiger Zellen, durch deutliche Entwicklung kugelliger Sporenkörner keinen Zweifel über ihre vegetabilische Natur lassen, und welche ebenfalls fähig sind, wie ich mich selbst überzeugt habe, in Zuckerwasser Gährung hervorzubringen. Gegen die Versuche, durch welche dargethan wird, dass geglühte Luft unfähig sei, diese Zersetzungsprocesse einzuleiten, wirft Liebig in der letzten Ausgabe seiner Agricultur-Chemie ein, dass überhaupt thierische Stoffe in reinen Gefässen viel langsamer faulen als in solchen, welche durch organische Reste verunreinigt sind; Harn und Fleisch soll sich in sorgfältig gereinigten Gefässen 2—3 Wochen ohne bemerkbare Veränderung erhalten. Letzteres habe ich jedoch nie gesehen, wenigstens traten im Laufe des letzten, ziemlich warmen Sommers selbst in ausgekochten Gefässen und Stoffen, sobald sie auch nur einige Minuten nach dem Erkalten frei mit der Luft in Berührung gewesen waren, stets nach 24 bis 72 Stunden die ersten Zeichen der Fäulniss unverkennbar ein; ausserdem lässt es sich durch ganz einfache, leicht auszuführende Versuche so stringent beweisen, als überhaupt nur ein chemisches Experiment beweisen kann, dass geglühte Luft vollkommen unfähig ist Fäulniss oder Gährung hervorzurufen.

⁴⁶⁶ Die Methode, deren ich mich bediente, ist folgende: Ein Glaskolben, der verschiedene organische Substanzen, Theile von Thieren, Fleischstücke, klare Leimlösung oder Traubensaft enthielt, wurde durch einen ganz mit Siegellack überzogenen Kork verschlossen, durch welchen zwei dünne, rechtwinkelig gebogene, dicht nebeneinander verlaufende Glasröhren führten, deren eine in eine enge Spitze ausgezogen, die andere aber horizontal in einem rechten Winkel abgebogen war, um als Saugrohr zu dienen. Nachdem die Flüssigkeit des Kolbens so weit zum Kochen gebracht war, dass aus beiden Röhren

die Dämpfe stark ausströmten, wurde die eine durch etwas Siegellack geschlossen und die andere während des Erkaltes des Kolbens durch eine Spiritusflamme an einer Stelle bis zum Glühen erhitzt, und nach vollständiger Erkalting wurde mit der Flamme bis zum Ende des Rohres allmählich hinabgegangen und das letztere gleichfalls mit Siegellack verschlossen. Die dabei eingeströmte Luft war meist bald nach der vollendeten Abkühlung vollständig ihres Sauerstoffes beraubt, wie ich mich durch Untersuchung derselben mittels Phosphors überzeugte. Waren die angewandten Flüssigkeiten klar z. B. Glutininlösungen, so entstand dabei ein ganz geringer Niederschlag, übrigens blieb die Flüssigkeit ungeändert. Um nun neuen Sauerstoff hinzuzubringen, erhitzte ich die beiden nebeneinanderlaufenden Röhren an einer Stelle, öffnete dann beide Enden, und sog leise durch das zweite gebogene Rohr die Luft aus dem Kolben aus, wobei von aussen neue durch die enge Oeffnung des ersten langsam einströmte und die erhitzte Stelle desselben passirte. Auf diese Art konnten beliebige Quantitäten Luft in beliebigen Zwischenzeiten hineingeschafft werden. Die einzige Veränderung, die an den organischen Materien sichtbar wurde, war eine geringe Vermehrung des Niederschlages; übrigens waren dieselben selbst in den heissesten Zeiten des Sommers nach 8 Wochen an Geruch, Geschmack, Ansehen und in ihrem Verhalten gegen Reagentien unverändert; liess man aber auch nur eine geringe Menge un-⁴⁵⁷geglühter Luft ein, oder war der Verschluss des Kolbens nicht ganz fest, so entstand meist schon nach 2 bis 4 Tagen Fäulniss in ihren gewöhnlichen Erscheinungen mit Infusorienbildung.

Als das empfindlichste Reagens gegen die Fäulniss zeigte sich mir für diese und andere Versuche eine mit Lackmus gefärbte klare Glutininlösung; denn ehe noch durch den Geruch die Fäulniss mit Sicherheit erkannt werden konnte, äusserte sie sich schon durch eine Desoxydation und Entfärbung des Pigments. Die Farbe des letzteren stellt sich schnell wieder her, wenn man die Flüssigkeit in flachen Gefässen der Luft aussetzt, oder sie mit derselben schüttelt; in geschlossenen oder engen Gefässen verschwindet sie aber sehr bald wieder,



bleibt dagegen, wenn man die Fäulniss durch Kochen unterbricht, unverändert, bis die letztere wieder von Neuem eintritt.

Hierbei ist jedoch zu bemerken, dass sich die Flüssigkeit auch ohne Fäulniss entfärbt, wenn sich darin feste Fleischtheile befinden, oder durch Oxydation eine grössere Menge eines festen Niederschlages gebildet wird, weil sich dann der Farbstoff mit diesem verbindet; dann färbt sich die Flüssigkeit auch durch Sauerstoffzutritt nicht wieder. Mit dem Mikroskop findet man in der durch Fäulniss entfärbten Flüssigkeit eine fein granulirte Masse, welche sich bei 400maliger Vergrösserung als eine Zusammenhäufung kleiner Kügelchen erkennen lässt, und grössere stabförmige Thiere, welche sich langsam und um ihre Längachse rotirend fortbewegen.

Uebrigens darf man das hier aufgefundene Factum zunächst nur auf die Zersetzungen der stickstoffhaltigen näheren Organbestandtheile der lebenden Wesen beziehen, namentlich auf die proteinhaltigen und leimartigen Verbindungen, indem die langsamen Zersetzungen anderer Stickstoffverbindungen unabhängig vom Zutritt der Luft auch in verschlossenen und ausgekochten Gefässen vor sich gehen. Ich habe in dieser Beziehung bis jetzt erst den Harnstoff und die Cyanwasserstoffsäure untersucht. Ersteren stellte ich, um ihn ganz frei von anderen thierischen Stoffen zu erhalten, aus dem cyansauren Ammoniak dar, seine Zersetzung in kohlensaures Ammoniak unterscheidet sich schon dadurch wesentlich von der Fäulniss, dass sie in der Siedehitze schneller vor sich geht als bei gewöhnlicher Temperatur. Ich verschloss die Lösungen der beiden genannten Stoffe in zugeschmolzenen Glasröhren, und legte sie so in kochendes Wasser; sie zersetzten sich ebenso schnell, wie andere Theile derselben Lösungen, welche frei mit der Luft in Berührung waren. Ist Harn in ausgekochten Gefässen eingeschmolzen, so geht diese langsame Zersetzung des Harnstoffes vor sich, ohne eine faulige Zersetzung der übrigen thierischen Stoffe hervorzurufen.

Um noch auf eine andere Weise die Einwirkung des Sauerstoffes auf organische Stoffe zu untersuchen, schloss ich Fleisch, Leimlösungen, Traubensaft ausgekocht ein, und bewirkte durch einen mittels Platindrähten hindurchgeleiteten

elektrischen Strom eine Wasserzersetzung; aber auch hier war das entwickelte Sauerstoffgas nicht im Stande, Fäulniss oder Gährung hervorzubringen. Dieses Resultat widerspricht einem Versuche von Gay Lussac, welcher in unter Quecksilber ausgepresstem Traubensaft durch den elektrischen Strom Gährung hervorgerufen haben will; es kann aber auch bei der gewissenhaftesten Reinigung der Gefässe, des Quecksilbers etc., wie es sich bei den Untersuchungen über *Generatio aequivoca* zeigte, kein Experiment bindende Kraft haben, wobei irgend ein Theil des Apparates, oder irgend eine der angewendeten Substanzen nicht vorher bis zur Siedhitze erwärmt ist. Dasselbe lässt sich einwenden gegen die Versuche desselben ausgezeichneten Chemikers, bei denen nach der Einbringung einer geringen Quantität Sauerstoffes Gährung entstand, Versuche, auf welche Liebig ein besonderes Gewicht legt, weil sich nicht einsehen liess, wie in das zur Gasentwicklung gebrauchte Manganhyperoxyd oder chloresaurer Kali organische Keime hineinkommen könnten.

Aus allen diesen Experimenten geht hervor, dass weder der Oxydationsprocess noch die der Fäulniss ähnliche freiwillige Zersetzung des Harnstoffes, noch die mächtige, chemische Bewegung, welche durch den elektrischen Strom hervorgerufen wird, im Stande sind, die Fäulniss oder Gährung einzuleiten. Auch kann keiner der gewöhnlichen, durch Siedehitze nicht veränderlichen Bestandtheile der Atmosphäre den Anstoss geben, weder Stickstoff noch Kohlensäure, noch Wasserstoff oder das neuerdings von Liebig nachgewiesene Ammoniak. Uebrig bleiben nur noch zwei Substrate, denen wir diese Wirkung zuschreiben können, nämlich die in der Luft verbreiteten Exhalationen fauliger Substanzen, wie sie von Liebig zugleich mit dem Ammoniak aus dem Regenwasser abgeschieden sind, oder die Keime organischer Wesen, auf deren allgemeine Verbreitung man aus den Erscheinungen scheinbarer *generatio aequivoca* schliessen muss. Die einwohnende Thätigkeit beider wird durch die Siedhitze aufgehoben, und beiden können wir die Fähigkeit zuschreiben, Fäulniss zu erregen, möglicherweise könnten die Anhänger der *Generatio aequivoca* auch den ersteren die Fähigkeit zuschreiben,



Organismen zu erzeugen, sie gleichsam als gasförmig verbreitete Zeugungsstoffe betrachten. Die Frage, welches dieser Agentien das wirksame sei, hat durch Liebig's geistvolle Deductionen eine grosse Wichtigkeit nicht nur für die organische Chemie, sondern auch für die Lehre von den Contagien und Miasmen erlangt. Ich habe deshalb fäulnissfähige Stoffe so abzusperren gesucht, dass der Zutritt auch noch so kleiner fester Körperchen, wie es die Keime mikroskopischer Organismen sind, verhindert werde, nicht aber der von flüssigen oder gasförmigen Stoffen. Durch chemische Mittel konnte die Trennung beider Agentien nicht gelingen, weil dieselben stets Fäulniss und Leben zugleich zerstören; aber sie ist mir vollständig auf rein mechanischem Wege gelungen, indem ich in abgesperrte fäulnissfähige Flüssigkeiten durch eine Blase hindurch mittelst der Endosmose faulende Flüssigkeiten oder reines Wasser eintreten liess. Zu diesem Ende überband ich eine Oeffnung einer tubulirten Vorlage mit einem Stück Blase, und leitete aus der anderen eine Glasröhre mit ausgezogener Spitze hinaus, brachte die zu untersuchenden Substanzen in der Vorlage zum Sieden, erhitzte während der Abkühlung derselben das Rohr, schmolz es endlich zu, und setzte die Blase in eine fäulnissfähige Flüssigkeit oder in Wasser. Oder noch einfacher: ich füllte ein etwas weites Reagirgläschen mit der zu untersuchenden Flüssigkeit ganz an, band eine Blase mit Einschluss möglichst weniger Luft über, erhitzte es vorsichtig bis 100° C., wobei sich die kleinste Schadhafteigkeit der Blase durch Austritt der innen stark gepressten Flüssigkeit zu erkennen gab, und stellte es nach vollendeter Abkühlung umgekehrt in eine andere Flüssigkeit. Die Fäulniss trat in diesen Fällen in der eingeschlossenen Substanz fast eben so schnell ein, wie in einer nicht abgesperrten, gab sich durch den bekannten widerlichen Geruch und Geschmack, durch Entfärbung des Lackmus, Entwicklung von Gasarten aus Proteinverbindungen, durch Verwandlung des Leims in extractive Materien zu erkennen; dagegen ist das Ansehen einer auf diese Weise faulenden Flüssigkeit ein durchaus anderes; dieselbe bleibt nämlich vollkommen klar, Fleischstücke zerfliessen nicht zu einem trüben Brei, sondern behalten trotz der von ihnen ausgehenden Gasentwicklung

vollständig ihre Structur, sogar bis zu den Querstreifen der Primitivbündel, werden consistenter, wie ganz hartgekochtes Eiweiss, und bei der mikroskopischen Untersuchung findet man nicht die geringste Spur von Infusorien oder regelmässigen feinen vegetabilischen Bildungen, die sich sonst in so grosser Menge zu zeigen pflegen. Dass hier nicht bloss eine Transfusion der Fäulnissproducte von aussen in den inneren Raum stattfindet, lässt sich am besten daran erkennen, dass die Gasentwicklung von Fleischstücken, sobald sie einmal angefangen hat, nicht aufhört, auch wenn man das Gefäss aus der äusseren Flüssigkeit herausnimmt und die Blase durch eine Schicht Siegelack vor der Berührung mit der Luft schützt. Das hierbei entwickelte Gas wird zu $\frac{2}{3}$ von kaustischem Kali absorbiert, und schwärzt schnell eine Bleisalzlösung. Aus diesen Versuchen geht hervor, dass die Fäulniss unabhängig von dem Lebensprocesse bestehen kann und nur in der Form durch diesen geändert wird, dass zu ihrer Einleitung der Zutritt faulender Flüssigkeiten oder Dünste hinreicht, und dass organische Wesen nur dann entstehen, wenn die Möglichkeit des Zutrittes fester Körper (also auch organischer Keime) vorhanden ist.

Dieselben Versuche habe ich an Weinmost angestellt, wobei ich die den eingeschlossenen Most abschliessende Blase in eben solchen gleichfalls ausgekochten Most stellte. Letzterer ging in 36 bis 48 Stunden in heftige Gährung über, die in acht Tagen grösstentheils vollendet war, der abgesperrte Most dagegen zeigte durchaus keine Veränderung, keine Hefebildung und keine Gasentwicklung. Durch Endosmose vermehrte sich sein Volumen etwas, und er nahm einen leicht weinigen Geruch und Geschmack an; entfernte man die äussere Flüssigkeit, so nahm sein Volumen nicht weiter zu, auch war im Verlaufe von acht Tagen durchaus keine weitere Veränderung zu bemerken. Wurde nach Ablauf dieser Zeit das Gefäss geöffnet, so trat die Gährung später nicht so leicht ein wie in ganz frischem Most, entwickelte sich aber sehr schnell beim Zusatz der geringsten Menge gährender Flüssigkeit. Die weinige Gährung ist demnach an den Zutritt eines festen Körpers gebunden, der durch die Blase zurückgehalten wird, und unter welchem wir uns nur die Hefe denken können, deren vegetabilische Natur



nicht mehr zu bezweifeln ist. Dem Fäulnisprocesse entspricht in den Fruchtsäften die sogenannte schleimige Gährung, welche mit üblen Gerüchen und meist mit Schimmelbildung verbunden ist, und unter solchen Umständen eintritt, welche die Ausbildung der weinigen Gährung verhindern.

Die Ansicht, welche sich aus diesen Resultaten von der Fäulnis bildet, ist folgende:

1) Die Fäulnis ist ein Zersetzungsprocess der proteinhaltigen und leimartigen Materien, der sich von ähnlichen Zersetzungsprocessen anderer stickstoffhaltiger Verbindungen, z. B. derer des Cyans, durch die Fähigkeit unterscheidet, sich auf andere Massen derselben Stoffe fortzupflanzen, und nie anders als durch eine solche Fortpflanzung, vielleicht auch aus dem Lebensprocess zu entstehen scheint. Von diesen primären Zersetzungen sind jedoch die secundären anderer nicht fäulnisfähiger Stoffe, welche faulenden Flüssigkeiten zugemischt sind, zu unterscheiden.

2) Sie kann unabhängig vom Leben bestehen, bietet aber den für die Entwicklung und Ernährung von lebenden Wesen fruchtbarsten Boden dar, und wird dadurch in ihren Erscheinungen modificirt. Eine solche, durch Organismen modificirte und an diese gebundene Fäulnis ist die Gährung.

3) Sie gleicht dem Lebensprocesse auffallend durch die Gleichheit der Stoffe, in denen sie ihren Sitz hat, durch ihre Fortpflanzungsfähigkeit, durch die Gleichheit der Bedingungen, welche zu ihrer Erhaltung oder zu ihrer Zerstörung nöthig sind.

Zusatz (1882). Die neueren Untersuchungen über dieses Thema machen es wahrscheinlich, dass der Process, den ich hier als reine Fäulnis behandelt habe, sich nur durch die Art und Grösse der entstehenden Organismen unterscheidet. Die eindringenden Organismen müssen im Stande sein, eine gegen Wasserdruck standhaltende nasse Membran zu durchdringen, also actionsfähigen Zustand bei sehr geringer Grösse haben; oder sie müssen durch die Membran hindurch wachsen können. Dadurch wird die Art der eindringenden Organismen erheblich beschränkt.

LXXXIII.

Ueber den Stoffverbrauch bei der Muskelaction.

Aus Joh. Müller's Archiv für Anatomie und Physiologie.
Jahrgang 1845. S. 72—83.

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 allmählichen Wiederherstellung der Kräfte durch Ruhe gefolgert, dass zur Hervorrufung der mechanischen Effecte 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 Factum war die Erfahrung, dass das Fleisch zu Tode gehetzter Thiere sich im Geschmacke wesentlich von dem schneller getödteter unterscheidet. Einen genaueren Nach-



weis 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, sowie der schwefel- und phosphorsäuren 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 Excretionen gefundenen Endproducten 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 herstellten, welche durch eine Reihe sorgfältiger Wiederholungen vollkommen bestätigt wurden. Indem ich die Resultate dieser Versuche hier bekannt mache, kann ich allerdings erst einzelne Facta geben, noch nicht eine vollständig zusammenhängende Uebersicht des ganzen Processes, weil zu einer solchen eine viel genauere Kenntniss der chemischen Eigenschaften und der elementaren Zusammensetzung der sogenannten Extractivstoffe 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 Blutumlaufes entzogen, also in abgetrennten Theilen oder an getödteten Thieren den Versuchen unterworfen werden. Diese Forderung macht⁷¹ nöthig, uns wieder an die alten Märtyrer der Wissenschaft, die Frösche, zu wenden, weil bei den warmblütigen 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 6paarigen 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 Drahte nämlich, welcher zur inneren Belegung der Flasche leitet, ist mittelst einer gebogenen Glasstange ein zweiter, durch einen Kork verschiebbarer Draht angebracht, welcher dem ersten näher oder ferner gestellt werden kann, um kleinere oder grössere Funken herauszulocken. Dieser zweite Draht 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 Drähten 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 müssen, welche bei einer grossen galvanischen Säule nicht zu umgehen wäre.

Die Versuche wurden folgendermaassen ausgeführt: Zwei bis vier Fröschen wurden die Hinterschenkel dicht am Leibe abgeschnitten, von den Füßen im Fussgelenke getrennt, in zwei Parteien getheilt, sodass 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 vom⁷⁵ 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 Beines mit dem oberen des nächsten zusammenstiess, die beiden äussersten Enden dieser Kette aber mit den Zuleitungsdrähten von der inneren und äusseren 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 Drahtes 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 Partien 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 Tuch 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 Controle 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 Erhitzen zeigte; die zusammengegossenen Flüssigkeiten wurden aufgekocht, 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 letzteren 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 % 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 anderen Bestandtheilen finden werden, so gering, dass wir ihn vorläufig für unwesentlich halten müssen; die Unterschiede der Eiweissmengen zusammengehöriger Fleischportionen beliefen sich bis auf 0,2 %.

In der aufgekochten Flüssigkeit blieben zurück die Extractivstoffe des Fleisches; um dieselben noch vollständiger auszuziehen, wurde das vom Eiweiss befreite, in anderen Versuchen auch gleich das frische Fleisch mit neuen Portionen destillirten Wassers aufgekocht und digerirt. Durch das Aufkochen wurde zugleich Hemmung jedes etwaigen Anfanges 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 Extractivstoffe (das Alkoholextract) zu sondern, oder bis zur dünnen Syrupsconsistenz, und zwar auf beiden Seiten bis zu gleichem Gewicht, wenn die in wasserhaltigem Alkohol löslichen Bestandtheile (Spiritusextract) ausgezogen werden sollten. Zu dem letzteren Zwecke wurde die zehnfache 77
Quantität 90procent. Weingeistes zu beiden hinzugefügt, sodass durch die Vermischung etwa ein 80procent. entstand, die Lösung vom Niederschlage (Wasserextract) abfiltrirt, vorsichtig zur Trockne in Glasschälchen von bekanntem Gewicht eingedampft und noch warm mit der Schale gewogen, weil sie schon während des Erkaltes ihr Gewicht durch Anziehen hygroskopischen Wassers verändern. Das Wasserextract 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 Verhältnisszahlen, 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 Extracte stellte sich nun in allen Versuchen ohne Ausnahme das Resultat heraus, dass das Wasserextract in den elektrisirten Fleischportionen vermindert, umgekehrt das Spiritus- und Alkoholextract vermehrt waren gegen die des nicht elektrisirten Fleisches. Ich führe hier die durch eine Reihe von genaueren Versuchen gewonnenen Zahlenverhältnisse auf.

78

Nummer des Versuches	Alkoholextract auf 100 Theile des frischen Fleisches		Verhältniss a:b
	a) im elektrisirten Fleische	b) im nicht elektrisirten Fleische	
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 95procent. Alkohol			
VI	1,020	0,748	1,36

Nummer des Versuches	Wasserextract			Spiritusextract		
	a) im elektrisirten Fleische	b) im nicht elektrisirten Fleische	Ver- hältniss a:b	c) im elektrisirten Fleische	d) im nicht elektrisirten Fleische	Ver- hältniss 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 Wasserextracte im Mittel 0,3 ziemlich entspricht dem der Spiritusextracte 0,24.

Was die weitere Trennung der Extractivstoffe durch Metall-
79 salze betrifft, so giebt Sublimat nur einen geringen Niederschlag;

neutrales und basisches essigsäures 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 Niederschlage des Wasserextractes durch das neutrale Salz abfiltrirten Flüssigkeit bewirkt das basische noch eine geringe Trübung, nicht aber in der des Spiritus-extractes. Bei möglichst vorsichtiger Fällung erhielt ich in den Versuchen VIII und IX vom Niederschlage durch das neutrale Salz aus dem Spiritusextract des elektrisirten Fleisches 1,04 und 1,76, aus dem des nicht elektrisirten 0,95 und 1,23; aus dem Wasserextract 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 Extractivstoffe 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 Extractivstoffe nachher abfiltrirt, eingedampft und mit Salpeter eingeäschert 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 Extractivstoffe 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 Alkoholextracten nicht finden können.

Als Ursache der dargestellten Veränderungen betrachte ich 80 den bei der Muskelaction stattfindenden 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 ebenso lange elektrisirte, als sonst die noch reizbaren Schenkel, und analysirte. Die Mengen der einzelnen Extracte 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, sodass 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 Lackmuspigment als Reagens anwandte¹⁾, nie eine schnellere Fäulniss des einen oder anderen Theiles 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 Lackmus erst nach 36–48 Stunden zeigten.

Um die Gültigkeit der gefundenen Resultate auch für andere Thierclassen 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 Querschnitt in zwei ziemlich gleiche Theile theilte; den einen elektrisirte ich, indem ich an den zuleitenden Drähten Nadeln befestigte und diese in die beiden Oeffnungen des Rückenmarkcanals 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 Theiles (nach 4 Stunden) von der Haut und den Knochen getrennt, gewogen und mit kaltem Wasser infundirt. Ich erhielt:

1) S. meine Abhandlung über das Wesen der Fäulniss und Gährung in Müller's Archiv 1844 (oben S. 729).

	a) im elektrisirten Stück	b) im nicht elektrisirten Stück	Verhältniss a : b
Eiweiss	2,26	2,27	—
Wasserextract	1,23	1,39	0,88
Spiritusextract	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 Zuleitungsdrähte mittelst Nadeln mit dem grossen Brustmuskel verband. Die des einen stach ich in den Oberarm, zwei aber, welche am anderen befestigt waren, auf derselben Seite dicht neben der Krista des Brustbeines ein, und gab dann den elektrischen Schlägen eine mässige Intensität, sodass starke Reflexactionen dadurch nicht hervorgerufen werden konnten; noch mehr gemässigt musste die Intensität der Schläge werden, als die Reizbarkeit des elektrisirten Brustmuskels anfang, durch die Action erschöpft zu werden, weil sonst die reflectirten Zuckungen der ungeschwächten Muskeln ebenso stark wurden wie die des direct afficirten. Was man übrigens an Zeit verliert durch das schnelle Erlöschen der Reizbarkeit, wird zum Theil ersetzt durch die viel heftigere Action der gereizten Muskelpartien; sodass das Resultat der Zersetzungen noch ⁸¹ 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	—
Wasserextract	0,64	0,73	0,88
Spiritusextract	1,68	1,58	1,06

Unerledigt muss ich allerdings in diesem Aufsatz 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 directe 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 $\frac{1}{8}$ — $\frac{1}{2}$ % grösser ist, und höher möchte sich eine etwaige Zersetzung des Faserstoffes nicht belaufen; die durchschnittliche Menge der festen zurückbleibenden Theile beträgt 20 % vom frischen Fleische bei den Fröschen und Tauben, 12,5 bei den Fischen. Gegen eine Zersetzung des Faserstoffes scheint in den obigen Versuchen der Umstand zu sprechen, dass meistens sich die Mengen des verlorenen Wasserextractes und gewonnenen Spiritusextractes ziemlich entsprechen.

⁸³ Ich glaube durch die angeführten Facta den versprochenen Nachweis geführt zu haben, dass während der Action 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 Extractivstoffe nöthig ist, weshalb ich ihre Veröffentlichung noch verschieben will.

LXXXIV.

Ueber die Wärmeentwicklung bei der Muskelaction.

Aus Joh. Müller's Archiv für Anatomie und Physiologie, Jahrg. 1848. S. 144—164. Vorgetragen in der Sitzung der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin am 12. Nov. 1847.

Becquerel und Breschet haben bei ihren thermoelektrischen Untersuchungen¹⁾ über die Wärmeverhältnisse des menschlichen Körpers gefunden, dass die Temperatur der Muskeln sich steigert, sobald dieselben in Thätigkeit gesetzt werden. Sie fanden im Biceps brachialis eines Mannes nach mehrmals aufeinander folgenden Contractionen desselben eine Steigerung von 0,5° C., bei fünf Minuten lang fortgesetztem Sägen um 1°. Ebenso fand Gierse²⁾ bei Hunden die Hauttemperatur eines Schenkels mit angespannten Muskeln immer merklich höher als die des anderen vollständig relaxirten. Entsprechend dieser örtlichen Steigerung der Temperatur macht sich auch eine allgemeine des ganzen Körpers während bedeutender Muskelanstrengungen nicht nur dem Gefühle, sondern auch dem Thermometer merklich. Diese ist in sehr genauen Beobachtungsreihen von Gierse bei Hunden im Mastdarm bis zu 1° gefunden, von J. Davy³⁾ bei Menschen zu 0,5° bis 1,0°. Indessen ist aus diesen Untersuchungen nicht zu entscheiden, welches die Quelle dieser Temperaturerhöhung in den Muskeln sei; ob dieselbe von den in den Muskeln selbst vorgehenden

1) Ann. des sciences natur. Nouv. Série. T. III. p. 272.

2) Quænam sit ratio caloris org. part. inflamm. etc. Dissert. inaug. Halæ 1842.

3) Philos. Transact. 1845. p. II.



Processen herrühre, oder ob sie nur eine Folge der durch Verstärkung der vegetativen Functionen vermehrten allgemeinen Körperwärme und des reichlicheren Zuflusses des arteriellen Blutes zu den Muskeln sei. Da das letztere nach den thermoelektrischen Bestimmungen von Becquerel und Breschet an Hunden um $0,8^{\circ}$ bis $1,0^{\circ}$, nach den thermometrischen von J. Davy¹⁾ an Schafen und Ochsen um $0,55^{\circ}$ bis $0,83^{\circ}$ wärmer sein soll als das Venenblut, so würde ein reichlicherer Zufluss des Blutes zu den Muskeln schon hinreichen die Erwärmung derselben zu erklären, falls diese Beobachtungen, gegen deren Richtigkeit viele Einwürfe erhoben werden können, sich bestätigen sollten. Um über die erwähnte Frage eine sichere und entscheidende Antwort zu bekommen, erschien es nöthig, dass die Wärmeentwicklung an Muskeln untersucht werde, welche dem Blutumlauf entzogen sind. Zwei frühere thermometrische Versuche von Buntzen²⁾ an den Schenkelmuskeln einer frisch getödteten Kuh und eines Lammes schienen mir bei der grossen Schwierigkeit solcher Versuche einer Bestätigung zu bedürfen. Um ein möglichst wohl verbürgtes Resultat zu sichern, sind die kaltblütigen Thiere, und unter ihnen die Frösche, viel geeigneter, sowohl wegen der Dauer ihrer Reizbarkeit, als auch weil bei ihrer verschwindend kleinen Eigenwärme sich am leichtesten ein constantes Gleichgewicht der Temperatur erreichen lässt. An ihnen sind deshalb auch die folgenden Untersuchungen angestellt worden, und zwar mit Hülfe eines thermoelektrischen Apparates.

Die Wirksamkeit eines solchen beruht bekanntlich auf der Thatsache, dass in einem Metallringe, der aus zwei verschiedenen Metallen zusammengesetzt ist, ein elektrischer Strom entsteht, sobald die Löthstellen verschiedene Temperaturen haben, und dass dieser elektrische Strom sichtbar gemacht und gemessen werden kann durch seine Wirkung auf Magnetnadeln, indem er diese quer gegen seine eigene Richtung zu stellen strebt. In dem von mir angewendeten Appa-

1) Philos. Transact. 1814. p. 590.

2) Beitrag zu einer künftigen Physiologie. Kopenhagen 1805. Auszug davon in Gilbert's Annalen der Physik. Bd. XXV. p. 157.

rate zerfällt dieser Ring in zwei Theile, deren einer, eine eigenthümlich construirte thermoelektrische Säule, zur Erregung, der andere, der Multiplicator, zur Messung des Stromes dient. Der letztere enthält zwei Kupferdrähte von $0,75''$ Durchmesser, deren jeder 50 Windungen macht, und die bei allen hier anzuführenden Versuchen neben einander zur Leitung verbunden wurden, sodass sie wie ein ebenso langer Draht vom doppelten Querschnitt wirkten. Leider war es mir nicht gelungen, Draht aus galvanoplastischem Kupfer zu erhalten, weil alle Versuche, dasselbe auszuziehen, missglückten; die Drahtmassen lenkten deshalb durch einen geringen Eisengehalt die astatischen Nadeln um 10° nach rechts oder links vom Nullpunkt der Theilung ab. Diese Ablenkung wurde durch den von Ruhmkorff angegebenen Compensator¹⁾ beseitigt, welcher in zwei, über dem Instrument angebrachten, mit ungleichnamigen Polen nach unten gekehrten, mit den oberen Enden nahe zusammenstossenden Magneten besteht. Der Compensator wird so gestellt, dass er die Magnetnadeln auf den Nullpunkt der Theilung einstellt; durch allmähliche Näherung oder Entfernung der unteren Enden der Magnete gegen einander kann man ihrer Richtkraft auf die Nadeln jeden beliebigen Werth geben. Stellt man dieselben so ein, dass ihre Kraft eben ausreicht, die ablenkenden Wirkungen der Drahtmassen zu überwinden, so hat man den höchsten Grad der Empfindlichkeit gegeben. Die Kreistheilung ist auf eine versilberte Kupferplatte aufgetragen, welche durch ihren dämpfenden Einfluss die Schwankungen der Magnetnadeln sehr schnell beseitigt. In Betreff der Vorsichtsmaassregeln, welche bei der Behandlung so empfindlicher Multiplicatoren anzuwenden sind, kann ich am besten auf die vollständige und gründliche Erörterung derselben verweisen in E. du Bois-Reymond, Untersuchungen über thierische Elektricität. Berlin 1848. Bd. I. p. 160—203.

Die angewendete thermoelektrische Kette muss ich näher

1) Matteucci, Traité des phénomènes électrophysiologiques des animaux. Paris 1844. p. 25, abgebildet Fig. 2.



beschreiben, weil sie von den bisherigen Formen dieser Ketten gänzlich abweicht. Man hat früher die Temperaturbestimmungen an thierischen Theilen auf thermoelektrischem Wege immer nur mit einem wirksamen Elemente gemacht, und zwar sind von Becquerel und Breschet Combinationen von Eisen und Kupfer gewählt worden; dieselben hat auch Dutrochet¹⁾ benutzt. Ich zog es vor, drei Elemente hinter einander anzuwenden, um so die elektromotorische Kraft des Stromes zu verdreifachen. Um dieselben aber in die thierischen Theile einzubringen, musste man sie trennen und leicht wieder verbinden können. Letzteres geschah dadurch, dass die Enden derselben zwischen zwei isolirenden Elfenbeinplättchen gepresst wurden gegen Kupferstreifen, durch welche die Leitung bis zum nächsten Element hergestellt wurde. Die Elemente selbst bestanden aus einem Mittelstück von Eisen, an dessen beide Enden Neusilber angelöthet war, weil diese beiden Metalle 148 eine etwa $2\frac{1}{2}$ Mal so grosse thermoelektrische Kraft haben als Kupfer und Eisen.²⁾

Bei der Form, welche man den erregenden Metallcombinationen giebt, kommt es hauptsächlich darauf an, dass der Querschnitt derselben nicht zu klein sei, um nicht einen zu grossen Leitungswiderstand darzubieten, welcher bei den gewählten beiden Metallen schon an sich sehr gross ist, und dann, dass die von aussen kommende Wärme leicht zu allen Punkten des Querschnittes hingeleitet werde, damit die Löthstellen möglichst genau und gleichmässig die Temperatur des umgebenden Körpers annehmen. Beide Bedingungen zugleich werden am besten durch Streifen dieser Metalle von geringer Dicke erfüllt. Die von mir gebrauchten sind $4\frac{1}{2}$ '' lang, $1\frac{1}{2}$ '' breit, $0,15$ '' dick; zusammengelöthet aus einem Mittelstück von Eisen, $1\frac{1}{2}$ '' lang, und zwei seitlichen ebenso langen von Neusilber. Dieselben sind mit Ausnahme der Enden stark mit Schellack gefirnisset, um den Uebergang der elektrischen Strömungen durch die nassen thierischen Theile hindurch von einem Streifen zum andern zu verhindern. Ihre Enden sind

1) Ann. des sciences natur. T. XIII. 1840.

2) S. Hankel in Poggendorff's Ann., Bd. LXII. p. 479.

zugeschärft, um sie leicht durch die Muskeln hindurchstechen zu können.

Der Apparat, durch welchen diese Elemente zur Kette verbunden werden, ist in halber Grösse dargestellt auf Taf. IV. Fig. 14 und 15. Fig. 14 ist die Ansicht von oben bei drei Elementen; a, a_n, b, b_n, c, c_n sind die elektromotorischen Streifen, ihre Mittelstücke h, h von Eisen, das übrige Neusilber; l, n, n, l_n ist ein Brettchen, belegt mit einer Glasplatte l, m, m, l_n ; die Messingstücke g und g_n mit den Schrauben f und f_n sind die Pressen, durch welche die Enden der Streifen gegen die breitgeklopften Enden der Kupferdrähte $\alpha, \beta, \gamma, \alpha_n, \beta_n$ und γ_n gepresst werden. Diese Drähte gehen auf die untere Fläche des Brettes herab und stehen hier in gegenseitiger Verbindung, und zwar α mit dem unteren Ende der Klemmschraube p, α_n mit β, β_n mit γ, γ_n entweder unmittelbar mit der Klemmschraube p_n , oder, wie bei meinem Instrument, welches für sechs Elemente eingerichtet ist, die in einer oberen und unteren Reihe liegen, mittelbar durch diese untere Reihe; q und q_n sind die zum Multiplicator leitenden Drähte. Der Weg des Stromes ist also folgender: $q, p, \alpha, a, a_n, \alpha_n, \beta, b, b_n, \beta_n, \gamma, c, c_n, \gamma_n, p_n, q_n$ und so zum Multiplicator zurück. Fig. 2 zeigt denselben Apparat von der Seite mit Weglassung der Kupferdrähte, eingerichtet für sechs Elemente. Das Brettchen ist wieder mit l, n bezeichnet, die Glasplatte mit l, m ; p ist eine Klemmschraube für das Ende des Multiplicatordrahtes q, g der Messingkörper der Presse, f die Schrauben derselben. Das mittlere Elfenbeinstück η ist fest eingefügt in das Messingstück g , die Elfenbeinplättchen ζ sind dagegen beweglich. Zwischen ihnen sind die Durchschnitte der platten Enden der Kupferdrähte bemerklich, welche in Rinnen der Platte η einliegen; die Enden der thermoelektrischen Streifen werden zwischen diese Kupferstreifen und die Plättchen ζ eingeschoben; ϵ sind bewegliche Messingplättchen, welche den Druck der Schrauben auf die Plättchen ζ übertragen; ii sind die Ränder eines Abschnittes des Brettchen, um dem Kopfe der unteren Schraube Raum zu geben. Sollen nur drei Elemente benutzt werden, wie es in allen zu beschreibenden Versuchen der Fall war,



so wird zwischen die untere Reihe der Kupferstreifen und das untere Plättchen ζ der beiderseitigen Pressen ein Kupferplättchen eingelegt, welches den Strom quer über die Streifen fortleitet, sodass er in der unteren Reihe nicht hin und her zu gehen braucht. Für den Fall, dass sechs Elemente gebraucht werden sollen, ist die Drahtleitung so angeordnet, dass, wenn die beziehlich unter c, b, a liegenden Elemente mit d, e, f bezeichnet werden, der Strom von c , nach d , von d , nach e , von e , nach f , von f , nach der Klemmschraube p , geht. Werden nun statt der drei unteren Streifen die Kupferplättchen eingelegt, so stehen dieselben in leitender Verbindung unter sich durch die Drähte d, e , und e, f , mit e , durch c, d , mit der Schraube p , durch f, p , und so ist dann die Leitung zwischen c , und p , hergestellt.

Bei den Versuchen steht dieser Apparat in einem Kasten mit Glasdeckel, dessen vordere und hintere Wand durchbohrt sind. Durch die erstere treten die Enden der Multiplicatordrähte ein, durch die letztere zwei andere Kupferdrähte, welche nach aussen durch Quecksilbergefässe mit den Drähten des zur Reizung gebrauchten elektrischen Apparates verbunden werden können, nach innen durch andere Quecksilbergefässe mit Drähten, welche zu den thierischen Theilen gehen. Dadurch werden die thermoelektrischen Elemente vor äusseren Temperaturstörungen geschützt.

Da es darauf ankam, für einzelne Versuche auch die absoluten Temperaturunterschiede der Löthstellen wenigstens annähernd zu kennen, durch welche die beobachteten Ablenkungen der Magnetnadeln hervorgebracht werden, so musste versucht werden, das Verhältniss der Stromintensitäten für die einzelnen Winkelgrade zu bestimmen. Sind die Theilung und der Compensator so gestellt, dass die Nadel den Nullpunkt zeigt, sobald kein Strom durch die Drahtwindungen geht, und wird dieselbe dann durch einen Strom nach einer Seite der Theilung hin abgelenkt, so haben auf die Grösse dieser Ablenkung folgende Kräfte Einfluss: 1) Der Erdmagnetismus, welcher die Nadeln in ihre ursprüngliche Lage zurückzulenken strebt mit einer Kraft, welche dem Sinus des Ablenkungswinkels proportional ist. 2) Der Magnetismus des Compensators, welcher

die einlenkende Kraft des Erdmagnetismus verstärkt, und dessen Wirkung wenigstens bei kleinen Ablenkungen ebenfalls annähernd proportional ist demselben Sinus. 3) Der elektrische Strom, welcher die Nadel auf 90° einzustellen strebt, dessen ablenkende Kraft, bei gleicher Stellung der Nadeln gegen die Drahtwindungen seiner Intensität proportional ist, bei Aenderung dieser Stellung aber sich nach einem Gesetze ändert, welches für jeden einzelnen Multiplicator nur durch Versuche¹⁵¹ bestimmt werden kann. 4) Die magnetischen Kräfte der geringen Verunreinigung des Kupferdrahtes mit Eisen; diese streben bei dem von mir gebrauchten Multiplicator in den Graden zwischen 0° und 20° die Nadel vom Nullpunkte abzulenken, zwischen 20° und 90° dagegen, sie demselben zu nähern. Die Grösse dieser letzteren Kräfte für jeden einzelnen Grad der Theilung kann gemessen werden, wenn man bei geöffnetem Schliessungsdrahte und nach Entfernung des Compensators, durch Drehung des Kastens mit den Drahtwindungen und der Theilung, die Nadel auf die einzelnen Theilstriche einstellt. Hat man z. B., um die Nadel auf den Theilstrich 10° einzustellen, den Kasten um 7° drehen müssen, so steht die Nadel um 3° aus dem Meridian, und die Kraft der Ablenkung ist $\sin 3^\circ$, wenn die Einheit der ablenkenden Kraft diejenige ist, welche der Erdmagnetismus bei einer Ablenkung von 90° auf das Nadelpaar ausübt. Lässt man den Compensator stehen, und macht denselben Versuch, so wird man kleinere Ablenkungen der Nadeln bekommen, weil die Wirkung des Erdmagnetismus dadurch verstärkt ist; man wird aber die ablenkenden Kräfte wieder dem Sinus des Ablenkungswinkels nahehin gleich setzen können, nur ist die Einheit dieser Drehkraft um so viel grösser als die vorige, als die Wirkung des Erdmagnetismus durch den Compensator erhöht wird. Dieses Verfahren giebt zugleich ein Mittel ab, die Richtkraft des Compensators ihrer Grösse nach gegen die des Erdmagnetismus zu bestimmen.

Hat man für jeden Grad der Kreistheilung auf diese Art die magnetische Drehkraft der Drahtwindungen bestimmt, so lässt sich bei einem Nadelpaar, welches keinen Compensator nöthig macht, das Gradationsverfahren von Poggen-



dorff¹⁾ in Anwendung bringen, bestehend in der Beobachtung mehrerer Ablenkungen, welche derselbe Strom bei verschiedenen Stellungen des Kastens hervorbringt. Man kann dann daraus berechnen, wie gross die Drehkraft desselben Stromes für die beobachteten Stellungen der Nadel gegen den Kasten ist, wie gross also die Intensität des Stromes sein muss, um die Nadel auf die entsprechenden Winkel einzustellen. Für ein Nadelpaar, welches den Compensator nöthig macht, würde dazu noch eine zweite Versuchsreihe derselben Art mit aufgesetztem Compensator nöthig sein, um auch die Wirkung dieses Theiles für jeden Grad der Ablenkung zu ermitteln. Es würde also eine genaue und vollständige Graduation des Multiplicators ein zwar mühsames, aber ausführbares Geschäft sein. Leider fand ich bald bei meinen dazu angestellten Versuchen, dass der Zustand eines empfindlichen Instrumentes nicht stationär genug ist, um diese Mühe zu lohnen. Leichte Aenderungen in den Magnetismen der Nadeln, in der Centrirung derselben, in ihrer verticalen Höhe, Temperaturverhältnisse ändern so viel an den Ablenkungen, dass eine dauernd gültige Graduation viel complicirtere Vorichtsmaassregeln nöthig machen würde, als ich sie anwenden konnte. Doch stellte sich ein Resultat heraus, worauf sich mein späteres annäherndes Verfahren gründete. Die ablenkenden Kräfte der Ströme sind nämlich innerhalb der ersten 20 Grade bei meinem Multiplicator fast constant, sie steigen nämlich bis 7° ein wenig, fallen dann wieder, sodass sie bei 14° denen bei 0° fast gleich und bei 20° ein wenig kleiner sind, und die Ablenkungswinkel der Nadeln würden deshalb in den ersten 20 Graden den Stromintensitäten fast proportional sein, wenn nicht auch noch die Magnetismen der Drahtwindungen störend einwirkten. Abgesehen von den letzteren, würde z.B., wenn wir die Intensität des Stromes, der auf 10° ablenkt, gleich 10 setzen, die bei 5° sein: 5,0, bei 15°: 15,1, bei 20°: 20,6, sodass innerhalb dieser Grenzen die höchste Abweichung von der Proportionalität nur ¹⁵³ $\frac{3}{100}$ der gemessenen Grösse beträgt, und bei dem hier zu erzielenden Grade von Genauigkeit vernachlässigt werden kann.

1) Poggendorff's Annalen, Bd. LVI. p. 324.

Auf diesen Umstand lässt sich nun ein für die ersten 20 Grade ausreichendes und leicht so oft als nöthig zu controllirendes Verfahren der Graduation gründen. Setzen wir nämlich die Intensität der ablenkenden Ströme gleich der Zahl der Grade des Ablenkungswinkels, den die Nadel ohne die Störung durch die Drahtmassen erreichen würde, und haben wir beobachtet, dass bei einer Ablenkung des Kastens um 7° die Nadel sich ohne Strom auf 10° einstellt, so wissen wir, dass die Drehkraft der Drahtmassen bei Stellung der Nadel auf den Theilstrich 10° gleich ist der des Stromes von der Intensität 3. Soll daher ohne Verschiebung des Kastens die Nadel durch einen Strom auf 10° abgelenkt werden, so braucht dieser nur die Intensität 7 zu haben. Wir erhalten also die Intensität des Stromes einfach dadurch, dass wir statt des beobachteten Ablenkungswinkels der Nadel die Gradzahl desjenigen Ablenkungswinkels des Kastens setzen, bei welchem ohne Strom die Nadel auf den beobachteten Theilstrich zeigt. Man kann leicht nach jeder einzelnen Beobachtungsreihe die entsprechenden Verschiebungen des Kastens aufsuchen. Ich lasse hier für die niedrigsten Grade der Theilung die Angabe der Intensitäten folgen, wie ich sie zur Zeit der Anstellung meiner Hauptversuche erhielt:

Ablenkungswinkel	Intensität	Ablenkungswinkel	Intensität
1°	0,2	9°	5,8
2°	0,5	10°	7,0
3°	1,0	11°	8,1
4°	1,7	12°	9,3
5°	2,4	13°	10,5
6°	3,1	14°	12,2
7°	3,9	15°	13,6
8°	4,8	20°	20

Den so gefundenen Stromintensitäten sind nun die Temperaturunterschiede der Löthstellen proportional. Um aber auch die absolute Grösse der letzteren berechnen zu können, wurden die Löthstellen in Quecksilberbäder gebracht, deren Temperaturunterschied durch ein empfindliches Thermometer bestimmt werden konnte. Diese Quecksilberbäder bestanden



aus zwei Pappkästchen, in denen je zwei gegenüberliegende Seitenwände einen Schlitz hatten. Die thermoelektrischen Streifen wurden in dieselben so eingekittet, dass in jedem Kästchen je drei zusammengehörige Löthstellen lagen. Ich fand für den Ablenkungswinkel 20° , also die Stromintensität 20, den Temperaturunterschied der Quecksilberbäder $0,74^\circ \text{C}$, für 10° Intensität 7, aber $0,26^\circ \text{C}$. Daraus finden sich für die Intensität 1 der Unterschied $\frac{0,74}{20} = \frac{0,26}{7} = 0,037$. Mit der letzteren Zahl muss man also die Zahlen, welche in unserer Tabelle die Intensitäten bezeichnen, multipliciren, um den zugehörigen Temperaturunterschied der Löthstellen in Graden der 100 theiligen Skale zu finden. Es folgt daraus, dass der Werth des ersten Grades $0,0074^\circ \text{C}$ entspricht, und da man sehr gut noch $\frac{1}{10}$ Grade abschätzen kann, so kann man in der Nähe des Nullpunktes noch Temperaturunterschiede geringer als $\frac{1}{1000}$ Grad erkennen.

Zur Erregung der Contraction in den Muskeln gebrauchte ich einen kleinen Neef'schen Elektromotor, über dessen Construction ich noch Einiges bemerken muss. Die Wirksamkeit dieses Apparates beruht bekanntlich darauf, dass durch einen unterbrochenen elektrischen Strom eine Masse von weichem Eisen abwechselnd magnetisirt und entmagnetisirt wird, und dass jeder Wechsel in der Magnetisirung in dem umgewickelten Draht einen kurzen elektrischen Inductionsstrom erzeugt von abwechselnd entgegengesetzter Richtung. Bei den gewöhnlichen käuflichen kleinen Apparaten dieser Art dient dieselbe Drahtumwicklung zur Leitung des primären Stromes der erregenden galvanischen Kette und der Inductionsströme, und die thierischen Theile, auf welche gewirkt werden soll, befinden sich in einer Nebenleitung, sodass immer ein Theil des Hauptstromes durch sie hindurchgeht. Weil es bei meinen Versuchen zu fürchten war, dass sich ein Theil dieses Stromes auch in die Drahtleitung des Multiplicators abzweigen und die Magnetnadel dauernd ablenken könnte, liess ich die Einrichtung des Neef'schen Apparates dahin abändern, dass der primäre Strom eines Grove'schen Zinkplatinelementes durch einen $1''$ dicken Kupferdraht, der in einer einfachen Lage um den Eisenkern gewickelt war, geleitet wurde, für die Inductionsströme aber ein

zweiter dünnerer diente, der etwa 700 Windungen machte. Die Strömungen, welche bei der Eröffnung der primären Kette durch das Verschwinden des Magnetismus entstehen, sind viel intensiver, aber dauern um ebenso viel kürzere Zeit, als die bei Schliessung der Kette, sodass sich bei schneller Folge derselben ihre Wirkungen auf eine Magnetnadel, deren Magnetismus nicht durch die Einwirkung der Ströme geändert wird, vollständig aufheben. Man erlangt durch diese Abänderung des Apparates ausserdem viel stärkere Wirkungen, weil der primäre Strom wegen der guten Leitungsfähigkeit des dicken Drahtes viel stärker ist. Die physiologische Wirkung dieser Ströme rührt hauptsächlich von dem starken Oeffnungsschlage her, da auf den Schliessungsschlag der menschliche Körper gar nicht, Froschmuskeln nur mässig reagiren. Die Zahl der Schläge in der Secunde konnte nach dem Tone, welchen die die Leitung unterbrechende Feder gab, auf 150—300 bestimmt werden. In allen Versuchen, wo nicht das Gegentheil erwähnt ist, war die Intensität der Schläge, deren volle Wirkung auf den menschlichen Körper ganz unerträglich, ja gefährlich ist, durch Einschaltung eines mit Brunnenwasser gefüllten Glasröhrchens in die Leitung so weit geschwächt, dass in den Fingern nur noch ein kaum merkliches Prickeln empfunden werden konnte. Der Neef'sche Apparat muss 6—8 Fuss vom Multiplicator aufgestellt werden, um nicht durch den Magnetismus seiner Eisenmassen die 150 Magnetnadeln abzulenken. Sollte die Reizung der thierischen Theile beginnen, so wurden beide Enden der Inductionsleitung zugleich mit den Drähten des oben beschriebenen Kastens in Verbindung gesetzt, welcher die Thermokette mit den thierischen Theilen enthielt. Die Wirkung solcher discontinuirlichen Ströme ist bekanntlich eine anhaltende Zusammenziehung der von den getroffenen Nerven versorgten oder unmittelbar getroffenen Muskeln, welche nicht eher nachlässt, als wenn die Reizbarkeit derselben zu erlöschen beginnt. Nach einiger Ruhe oder bei Umkehrung der Stromesrichtung kann man dieselbe Wirkung in schwächerem Maasse wieder hervorbringen.

Will man die Wärmeentwicklung in den Muskeln beobachten und sich bei Feststellung des Resultates möglichst



vor fremden Einflüssen schützen, so ist es am besten, die Contraction derselben vom Rückenmark aus zu bewirken, weil dabei der Muskel von den elektrischen Strömen ganz unberührt bleibt. Zu dem Ende schnitt ich den einen Schenkel eines Frosches einfach ab, während ich den anderen so präparirte, dass er noch durch die Nerven mit dem Rückenmark in Verbindung stand, und stach durch beide die drei thermoelektrischen Streifen hindurch, sodass sich je drei zusammengehörige Löthstellen in dem Muskelfleische jedes Oberschenkels befanden. Man führt dies am besten aus, wenn man die Streifen parallel nebeneinander und in der Entfernung, welche sie nachher haben müssen, zwischen zwei Brettchen einklemmt, sodass aber ihre Enden hervorstehen, dann die Haut an der inneren Seite des Oberschenkels spaltet und durch diese Spalte die Streifen einstösst; sie dringen leicht durch das Fleisch hindurch bis unter die Haut der äusseren Seite, welche letztere man wieder mit der Scheere an der betreffenden Stelle spalten muss. So kann man ohne Zerrung der Muskeln die Streifen durch die Schraubenklemmen zur Kette verbinden. Das im Wirbelcanal enthaltene Rückenmark wird dann auf ein besonderes
¹⁵⁷ Glasplättchen gelegt, und an seinem Kopf- und Beckenende werden Drähte durch die anhängenden Muskelmassen gestossen, um durch dieselben die Verbindung mit den Enden des Inductionsdrahtes herzustellen. Die ganze Vorrichtung wird in den Kasten mit Glasdeckel eingeschlossen, in welchem zugleich mehrere kleine Wassergefässe aus porösem Thon aufgestellt sind, um die Luft mit Wasser zu sättigen. Hierdurch wird einmal das Austrocknen der Nerven verhindert, dann aber auch den Ungleichheiten der Temperatur vorgebeugt, welche durch Verdunstung in den Schenkeln entstehen könnten. Nachdem man nun gewartet hat, bis die Nadel durch ihre Rückkehr auf den Nullpunkt der Theilung die eingetretene Temperaturgleichheit der beiden Schenkel anzeigt, oder doch einen hinreichend constanten Stand in der Nähe jenes Punktes gewonnen hat, wozu gewöhnlich $\frac{1}{2}$ bis $\frac{3}{4}$ Stunde nöthig ist, wird der Inductionsstrom durch das Rückenmark geleitet, wodurch ein tetanischer Zustand der

Muskeln etwa 2–3 Minuten lang unterhalten werden kann. Während dieser Zeit weicht die Nadel $7-8^{\circ}$ nach der Seite hin ab, welche einer Erwärmung des gereizten Schenkels entspricht. Durch diese Ablenkung wird eine Temperaturverschiedenheit der Löthstellen von $0,14^{\circ}$ bis $0,18^{\circ}$ C. angezeigt. Hört man mit der Reizung auf, oder erlischt die Reizbarkeit der Muskeln, so geht die Nadel sehr langsam wieder auf den Nullpunkt zurück. Davon, dass die beobachtete Ablenkung der Magnetnadel weder von einer elektromagnetischen, noch von einer thermischen Wirkung der angewendeten Inductionsströme herrührt, kann man sich schliesslich am besten dadurch überzeugen, dass man nach erloschener Reizbarkeit der Schenkel den ungeschwächten Inductionsstrom des Neef'schen Apparates einwirken lässt. Ist die Isolation der thierischen Theile gut, so entsteht nicht die geringste Bewegung der Magnetnadel.

Man kann auch ohne Gefahr eines falschen Resultates die erregenden Ströme unmittelbar durch die Schenkel leiten, wenn man sich nur zum Schluss überzeugt, dass nach erloschener Reizbarkeit die angewendete Intensität derselben keine in Betracht kommende Wärmewirkung hervorbringt.
¹⁵⁸ Unter den von mir angewendeten Verhältnissen konnte bei erloschener Reizbarkeit die Nadel durch den geschwächten Strom höchstens um einen Grad in der Nähe des Nullpunktes vorwärts bewegt werden, und auch dazu war eine sehr viel längere Zeit nöthig, als um bei frischen Muskeln durch die Contraction einen Ausschlag von $10-11^{\circ}$ zu erzielen. Diese Art des Experimentes hat den Vortheil, dass die Reizbarkeit der Muskeln viel länger vorhält als die der Nervenstämmen. Man kann deshalb die Einstellung der Nadel auf den Nullpunkt viel längere Zeit hindurch abwarten, die Reizungen mehrere Male und an beiden Schenkeln abwechselnd wiederholen, und die Verminderung des thermischen Erfolges in gleichem Verhältniss mit der Energie der Zusammenziehung beobachten.



Ueber Wärmeentwicklung in den Nerven.

Da sich so die Wärmeentwicklung in der Muskelsubstanz selbst bei der Contraction derselben nachweisen lässt, erschien es mir als nicht unwahrscheinlich, dass dasselbe auch in den Nerven ausführbar sein könnte, während dieselben Erregungen von den Centraltheilen zu den peripherischen oder umgekehrt fortleiten. Diese Vermuthung gewann noch dadurch an Wahrscheinlichkeit, dass durch E. du Bois-Reymond bei den Untersuchungen über thierische Electricität ganz ähnliche elektrische Ströme in den Nerven gefunden sind wie in den Muskeln¹⁾, und, wie ich aus mündlicher Mittheilung weiss, ganz ähnliche Abänderungen derselben, sobald durch den Nerven eine Contraction der betreffenden Muskeln hervorgerufen wird. Als eng verbunden mit diesen Strömen sollte man daher auch hier chemische Aenderungen und Wärmeentwicklung anzutreffen erwarten. Meine in dieser Hinsicht angestellten Versuche haben ein rein negatives Resultat gehabt. Ich halte es jedoch für angemessen, die Art ihrer Anstellung hier näher zu beschreiben, weil sich einmal aus ihnen so viel ergibt, dass die Temperaturänderungen in den Nerven, wenn überhaupt dergleichen stattfinden, wenigstens nicht über wenige Tausendtheile eines Grades hinausgehen, und weil ich zweitens bei diesen Versuchen auf einige Fehlerquellen aufmerksam geworden bin, deren Nichtbeachtung leicht zu einem anscheinend entgegengesetzten Resultate führen kann.

Ich brauchte zu diesen Versuchen denselben thermoelektrischen Apparat von drei Elementen, wie zu den vorigen. Die beiden Schenkel eines möglichst grossen Frosches wurden so präparirt, dass dieselben mit dem vom Gehirn getrennten, in den Wirbelcanal noch eingeschlossenen Rückenmark nur noch durch die Plexus ischiadici zusammenhingen. Die thermoelektrischen Elemente wurden zwischen dem rechten und linken Plexus hindurchgeführt, und die Anordnung so getroffen, dass die Nervenbündel an der oberen und unteren

1) Poggend. Ann. Bd. LVIII. p. 7.

Seite von einer Reihe dreier entsprechender Löthstellen lagen, und die letzteren auf diese Weise ganz von Nervenmasse umgeben waren. In dieser Lage erhalten wurden die Nerven durch Korkstückchen mit einer kleinen Rinne zu ihrer Aufnahme. Das untere dieser Korkplättchen wurde zwischen die thermoelektrischen Streifen und die Glasplatte ihres Trägers eingeklemmt. Seine den Streifen parallelen Seiten waren mit einem nach oben hervorstehenden Rand von Pappe versehen, welche mit einer dicken Schicht von Siegellack überzogen war, und zwischen diese Ränder wurde das obere Plättchen eingeklemmt. Die Ränder hatten natürlich an der Stelle, wo die Rinnen der Plättchen endeten, Einschnitte für die Nerven. So war das Nervenbündel, welches die Löthstellen einhüllte, zunächst umgeben von einer Korkmasse, welches die Ableitung seiner eigenen Wärme und die Zuleitung der äusseren, namentlich der in den Muskeln¹⁰⁰ des Rückens und der Schenkel entwickelten, möglichst verhinderte und dadurch die Temperatur der eingeschlossenen Theile ziemlich constant machte. Vor der Berührung mit den thierischen Theilen war diese Korkmasse durch die Siegellackschichten geschützt und elektrisch isolirt. Das Rückenmark wurde auf einer besonderen Glasplatte isolirt, sodass die einzige elektrische Leitung zwischen ihm und den Schenkeln die durch die Nerven war. Es kommt auf die Erreichung dieser Bedingung viel an, damit sich nicht ein Theil der Inductionsströme durch die Nerven und eine zweite Nebenleitung hindurch abzweige. Die Reizung durch den geschwächten Strom des Neef'schen Apparates und die Verbindung des Rückenmarkes mit demselben geschah wie bei den früheren Versuchen. Für die Sättigung der Luft mit Feuchtigkeit musste noch sorgfältiger gesorgt werden als früher, weil nur eine Reihe Löthstellen mit nassen Theilen in Berührung war und durch Verdunstung abgekühlt wurde. Es geschah dies theils wieder durch poröse thönerne Wassergefässe, theils durch feuchte Pappscheiben, welche unter und über dem thermoelektrischen Apparate ausgebreitet waren. Nachdem der ganze Apparat zusammengestellt war, blieb er stehen, bis die Ablenkung der Magnetaedel entweder ganz



verschwunden war, oder sich der geringe Rest derselben doch in längerer Zeit nicht mehr merklich änderte. Um möglichst feine Resultate zu gewinnen, wurde im letzteren Falle die Theilung des Multiplicators mit den Drahtwindungen so weit gedreht, bis die Nadel auf 0° zeigte, weil sie an dieser Stelle der Theilung am empfindlichsten ist. Dann wurde der Tetanus der Schenkel hervorgebracht; derselbe dauerte etwa 2 Minuten. Waren die Bedingungen eines fehlerfreien Versuches gut erfüllt, so wurde die Stellung der Nadel während der Contractionen der Muskeln nicht im geringsten geändert. Ist aber die Isolation der thierischen Theile nicht ausreichend, 161 sodass neben den Nerven noch eine zweite Leitung zwischen Rückenmark und Schenkeln vorhanden ist, so zweigt sich ein Theil des Inductionsstromes durch diese und die Nerven ab und entwickelt in den letzteren eine bei so feinen Hilfsmitteln wahrnehmbare Wärmemenge. In solchen Fällen entstand bei der Schliessung des Neef'schen Elektromotors zuweilen ein Ausschlag von $\frac{1}{2}$ — 1° im Sinne einer Erwärmung der Nerven. Derselbe entsteht dann aber auch nach erloschener Reizbarkeit der letzteren immer wieder, und in noch höherem Grade, wenn man den ungeschwächten Strom des Neef'schen Apparates anwendet, wodurch ich ihn dann bis zu 4 oder 5° steigern konnte.

Zu beachten sind ferner bei diesen Versuchen die unipolaren Strömungen, weil ihr Durchgang durch die Nerven ebenfalls merkliche Ausschläge der Magnetnadeln erzeugt. Es sind dies Bewegungen der Elektrizität in nicht zur Kette geschlossenen Leitungen, welche mit dem Leitungsdrahte eines kräftigen Inductionsapparates zusammenhängen. Die bisher veröffentlichten Angaben von E. du Bois-Reymond befinden sich in den Fortschritten der Physik im Jahre 1845, dargestellt von der physikalischen Gesellschaft zu Berlin, S. 538—544. Dieselben traten namentlich ein bei meinen Versuchen, wenn die Verbindung der Schenkel nur mit einem Ende des Inductionsdrahtes hergestellt war, während das andere mit dem Erdboden in leitender Verbindung stand. Durch die Magnetisirung und Entmagnetisirung des Eisens im Neef'schen Apparate werden

die elektrischen Fluida abwechselnd nach den beiden Enden des Inductionsdrahtes hingetrieben, wodurch sich bei offener Kette diese Enden abwechselnd mit entgegengesetzten Elektrizitäten von ziemlich bedeutender Spannung laden und ihre Ladungen den mit ihnen zusammenhängenden Leitern, hier durch die Nerven hindurch den Schenkeln, mittheilen. Es entstehen dabei lebhaft Zuckungen der letzteren, und die Magnetnadel wich gewöhnlich etwa um 1° im Sinne einer Erwärmung der Nerven ab. Wurde dagegen die Inductions- 162 leitung geschlossen, indem auch ihr anderes Ende mit dem Rückenmark in Verbindung gesetzt wurde, so reichte der von mir angewendete geschwächte Inductionsstrom nicht mehr aus, unipolare Strömungen zu erregen, und die Ablenkung der Magnetnadel blieb aus, während die Contractionen der Schenkel viel heftiger waren. Es ist deshalb bei den beschriebenen Versuchen nothwendig, die Verbindung beider Enden des Inductionsdrahtes mit dem Rückenmark gleichzeitig herzustellen. Der Grund dazu, dass in den Nerven so schwache Strömungen schon merkliche Temperaturänderungen verursachen, liegt in ihrem grossen Leitungswiderstande bei geringer Masse im Vergleich zu den Muskeln, deren Erwärmung selbst bei viel stärkeren Strömen vernachlässigt werden konnte.

Die kleinste wahrnehmbare Ablenkung der Nadel um $\frac{1}{10}$ des ersten Grades der Theilung entspricht nach dem oben Gesagten einem Temperaturunterschiede der Löthstellen von $0,00074^\circ$ C. Nun ist allerdings zu bemerken, dass bei einer Wärmeentwicklung in den Nerven die Temperaturänderung derselben mit den Löthstellen zusammen kleiner sein muss, als sie es in den Nerven allein bei einer möglichst schlecht wärmeleitenden Umgebung sein würde. Die Masse des Metalles, der sich die Wärme der Nervensubstanz mittheilt, ist hier nämlich nicht ein sehr kleiner Theil der erwärmten Masse, wie es bei den Versuchen über Erwärmung der Muskeln der Fall war. Dort konnte man annehmen, dass die von der Magnetnadel angezeigte Temperaturänderung nahehin der der thierischen Substanz entsprach; hier könnte vielleicht ein Wärmequantum, entsprechend einer Temperatur-



erhöhung von $0,002-0,003^{\circ}$, entwickelt werden, ohne sich durch einen elektrischen Strom sichtbar zu machen. Des Vergleiches wegen hielt ich es für nützlich, die Wärmeentwicklung in den Muskeln unter ähnlichen ungünstigen Umständen zu beobachten. Bei kleinen Fröschen finden sich unter den dünneren Muskeln der Schenkel mehrere, die in Hinsicht auf ihre Dicke den beiden Nervenbündeln der Plexus ischiadici grösserer Thiere derselben Gattung ungefähr gleich zu stellen sind. Solche kleine frei gelegte Muskeln lassen sich zwar nicht so anhaltend und kräftig tetanisiren wie die von der Haut noch überzogenen Schenkel, aber doch hinreichend, um die Wärmeentwicklung bemerkbar zu machen. Ich wählte dazu den von Dugès¹⁾ Génio-péronéo-calcaneus, von Cuvier, Meckel und Zenker²⁾ Peronaeus genannten Muskel. Derselbe liegt unter dem äusseren Rande des grossen Wadenmuskels, entspringt vom Kniegelenk und setzt sich mit schmaler Sehne an die äussere Fläche des Calcaneus, während sich an die vordere Fläche desselben Knochens zwei Sehnen von drei kleinen Muskeln ansetzen, die sich nicht voneinander vollständig isoliren lassen, und welche Cuvier als Jambier antérieur zusammengefasst hat. Der Peronaeus lässt sich dagegen in seiner ganzen Länge gut isoliren, an seiner inneren Seite liegt der Hauptstamm des Nervus peronaeus. Diesen präparirt man mit ihm zusammen los, und schneidet dann die übrigen Theile des Unterschenkels fort, sodass der Fuss nur durch den Muskel und Nerven mit dem Oberschenkel in Verbindung bleibt. Den letzteren lässt man wiederum mit dem Rückenmark in Verbindung. Alsdann wird der Muskel über drei entsprechende Löthstellen hinweg in die Rinne eines der Korkstückchen gelegt, der ganze Apparat in den Kasten eingeschlossen, für Sättigung der darin enthaltenen Luft mit Wasser gesorgt, und nachdem die Temperaturen sich hinreichend ausgeglichen haben, vom Rückenmark aus tetanisirt.

1) Recherches sur l'Ostéologie et la Myologie des Batraciens etc. Par Ant. Dugès. Paris 1834. p. 137.

2) Batrachomyologia. Dissert. inaug. J. C. Zenker. Jenae 1825. pag. 46.

Die Nadel des Multiplicators schlug bis auf 3° aus, was ungefähr $0,035^{\circ}$ C. entspricht. Zum Schluss überzeugte ich mich, dass nach erloschener Reizbarkeit auch der ungeschwächte Inductionsstrom keine Wärme in dem Muskel durch Abzweigung hervorbrachte.

Aus dem Erfolge dieses Versuches lässt sich schliessen, dass die etwa vorhandene Wärmeentwicklung in den Nerven gegen die in den Muskeln verschwindend klein sei und jedenfalls nicht über wenige Tausendtheile eines Grades hinausgeht.



LXXXV.

Messungen über den zeitlichen Verlauf der Zuckung animalischer Muskeln und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Reizung in den Nerven.

Aus Joh. Müller's Archiv für Anatomie und Physiologie. Jahrg. 1850. S. 276—364. — Der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin mitgetheilt am 19. Juli 1850.

276 Die erste Abtheilung der vorliegenden Untersuchungen ist ein Theil einer, von mir nach weitläufigerem Plane begonnenen Arbeit. Ed. Weber hat die Gesetze ermittelt, nach welchen die Muskeln im ruhenden und im anhaltend erregten Zustande wirken, und dadurch die Grundlage für die Kenntniss ihrer mechanischen Wirkungen gelegt. Eine der Hauptfragen in diesem Gebiete kann aber nicht durch Untersuchung des continuirlich erregten Muskels erledigt werden, diejenige nämlich nach der mechanischen Arbeit, die er zu leisten vermag. Der andauernd gleichmässig erregte Muskel bringt durch die erschöpfendste Anstrengung keine Arbeit im Sinne der Mechanik hervor, er bewirkt nur, dass die Körpertheile in einer neuen Gleichgewichtslage ruhend verweilen. Um eine Arbeit zu leisten, Bewegungen des eigenen Körpers oder Veränderungen in der Aussenwelt hervorzubringen, muss der Muskel zwischen Ruhe und Erregung wechseln, und die Grösse seiner Arbeit wird wesentlich von der Geschwindigkeit des Wechsels abhängen. Ich habe aus diesem Gesichtspunkte begonnen, die Vorgänge bei der einfachen Zuckung des Muskels zu studiren; unter einer solchen verstehe ich eine Zusammenziehung, welche auf eine Reizung von verschwindend

277

kleiner Dauer erfolgt. Ausserdem wird durch die elektrischen Erscheinungen bestätigt¹⁾, dass wahrscheinlich jede scheinbar continuirliche Zusammenziehung des Muskels kein wirklich continuirlicher Zustand sei, sondern auf einem schnellen Wechsel entgegengesetzter Molecularzustände beruhe. Wir dürfen also wohl andauernde Zusammenziehungen als eine Reihe so schnell sich folgender, einfacher Zuckungen betrachten, dass jede vorübergehende beim Eintritt der folgenden noch nicht merklich nachgelassen hat. Bei diesem Verhältniss wäre also die einfache Zuckung der elementare Vorgang, aus welchem sich die anderen zusammensetzen, und deshalb verspricht das Studium desselben, uns den leichtesten Zugang zu den hier vorliegenden Problemen zu eröffnen.

Meine Untersuchung der mechanischen Verhältnisse der einfachen Zuckung löst bisher nur einen Theil der zu stellenden Fragen, und ich würde ihre vollständigere Durchführung erwartet haben, ehe ich sie veröffentlichte, wenn nicht die darin ermittelten Thatsachen den Weg gebahnt hätten, die Frage über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Reizung in den Nerven, welche im zweiten Theile der vorliegenden Abhandlung behandelt wird, zu entscheiden. Da die Resultate dieses letzteren nicht dargestellt werden können, ohne auf das, was ich über die Vorgänge der Zuckung ermittelt hatte, Bezug zu nehmen, und doch ein hinreichend grosses selbständiges Interesse haben, um eine Veröffentlichung auch dieser noch nicht vollendeten Untersuchungen zu rechtfertigen, wählte ich 278 den eingeschlagenen Weg. Eine kurze Andeutung der Methode und der Resultate der Untersuchung über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Reizung in den Nerven ist schon veröffentlicht in den Monatsberichten der Akademie der Wissensch. zu Berlin, 1850, Februarheft, und in den Comptes rendus de l'Acad. d. sc. T. XXX. p. 204.

1) S. E. du Bois-Reymond, Untersuchungen über thierische Elektrizität. Bd. II. Abschn. 3. Kap. IV. § 4.



§ 1.

Vorläufige Methode und ihre Resultate.

Die mechanischen Eigenschaften eines Muskels sind, nach den Untersuchungen von Ed. Weber, denen eines elastischen Bandes von veränderlicher Elasticität gleich, und wie bei diesem hängt der Zug, den er auf seine Befestigungspunkte ausübt, oder seine Spannung, von seiner Länge ab. Wenn der Muskel sich im Zustande der Erregung befindet, ist die Spannung bei gleicher Länge eine andere, eine grössere, und demgemäss die Länge, welche demselben Grade der Spannung entspricht, eine kleinere. Ich beabsichtige im Folgenden namentlich zu untersuchen, in welchen Zeiträumen diese Veränderungen nach der Einwirkung eines Reizes von verschwindend kleiner Dauer eintreten und wieder aufhören. Ed. Weber hat den Zustand, in welchen der Muskel durch Reizung versetzt wird, als den „thätigen“ bezeichnet. Da nun die Thätigkeit des Muskels in diesem Zustande nicht nur eine mechanische, sondern auch eine elektrische, thermische, chemische ist, und wir von vornherein nicht wissen, ob in jedem Falle alle diese verschiedenen Richtungen gleichzeitig vermehrt und vermindert werden, — wollen wir die mechanische Aeussereung der Thätigkeit in dieser Abhandlung mit dem
270 Namen der Energie des Muskels bezeichnen. Der Gegenstand unserer nächsten Untersuchung ist also die Frage:

In welchen Zeiträumen und Stadien steigt und sinkt die Energie des Muskels nach momentaner Reizung?

Die Dauer der Zuckung eines animalischen Muskels ist gewöhnlich nur ein kleiner Bruchtheil einer Secunde, abgesehen von einer länger dauernden, schwachen Nachwirkung. Da unsere Sinne zur unmittelbaren Wahrnehmung der einzelnen Zeitmomente innerhalb einer so kleinen Dauer nicht fähig sind, müssen wir künstlichere Methoden zu ihrer Beobachtung und Messung anwenden. Von solchen sind namentlich zwei hier zu berücksichtigen. Bei der einen werden durch einen geeigneten Mechanismus die Vorgänge, deren Zwischenzeit man erfahren will, auf einer mit gleichmässiger

Geschwindigkeit fortbewegten Fläche notirt. Die Zeitunterschiede erscheinen auf dieser als proportionelle Raumunterschiede wieder und können durch letztere gemessen werden. Davon hat schon Ludwig für physiologische Zwecke Gebrauch gemacht, um die Schwankungen des Blutdruckes in den Arterien und des Luftdruckes in der Brusthöhle darzustellen. Die zweite davon wesentlich verschiedene Methode der Zeitmessung ist die von Pouillet vorgeschlagene.¹⁾ Die Zeitdauer wird hier durch die Wirkung bestimmt, welche während derselben eine Kraft von bekannter Intensität hervorgebracht hat. Pouillet lässt einen galvanischen Strom, dessen Anfang und Ende genau dem Anfang und Ende des zu messenden Zeitraumes entsprechen, auf einen ruhenden Magnet wirken; dann ist die Grösse des Bogens der Schwingungen, in welche der Magnet versetzt wird, der zu messenden Zeitdauer proportional.

Ich ging an die bezeichnete Untersuchung zunächst mit der ersten Methode. Mittels eines einfachen Apparates, der vorläufig nur dazu dienen sollte, soviel von dem Verlaufe der einfachen Zuckung zu erfahren, als ich brauchte um den definitiven construiren zu können, liess ich in ganz ähnlicher Weise, wie es Ludwig mit den Höhen des Blutdruckmessers that, die Höhe aufzeichnen, bis zu welcher ein an den Muskel gehängtes Gewicht in den aufeinanderfolgenden Zeitpunkten der Zuckung erhoben wird. Die Versuche ergaben, dass eine genügende Vervollkommnung der Methode für die Zwecke der vorliegenden Frage durch die unvermeidliche Reibung der einzelnen Theile des Apparates vereitelt werde. Zugleich boten sich mir aber auch einige neue, den Verlauf der Zuckung betreffende Thatsachen dar, durch deren Kenntniss es möglich wurde, die zweite Methode der Zeitmessung auf die hier vorliegenden Verhältnisse anzuwenden. Da die Schilderung dieser zweiten, vollkommeneren Methode ohne die Kenntniss der erwähnten Thatsachen vielleicht grössere Schwierigkeiten darbieten würde, und da die erste Methode

1) Comptes rendus. T. XIX. p. 1334. — Poggend. Ann. d. Physik. Bd. LXIV. p. 452.



einen schnelleren, und durch einfachere Schlussfolgen zu erfassenden Ueberblick über den Verlauf der Zuckung gewährt, so halte ich es für geeignet, eine kurze Angabe ihrer Resultate hier herzusetzen, obgleich dieselben nur auf eine verhältnissmässig geringere Genauigkeit Anspruch machen können als die der zweiten.

An den ausgeschnittenen Wadenmuskel eines Frosches wurde mittelst einiger festen Zwischenstücke ein Gewicht gehängt. Eines dieser Stücke war ein gut polirtes gerades Stahlstäbchen, welches durch zwei vertical übereinander befindliche Oeffnungen zweier Metallplättchen ging, in denen es keine beträchtliche Reibung erlitt, aber doch verhindert wurde, Seitenschwankungen zu machen. Das Stäbchen trug an einem Querarm eine feine Stahlspitze, die entweder auf einer horizontal fortbewegten, leicht angerussten Glasplatte, oder auf einer rotirenden Cylinderfläche zeichnete. Die Bewegung wurde durch ein sinkendes Gewicht hervorgebracht, und war vielleicht keine streng gleichmässige, sondern eine leicht beschleunigte; jedenfalls war aber die Beschleunigung derselben innerhalb der hier in Betracht kommenden Zeiträume von $\frac{1}{10}$ bis $\frac{1}{3}$ Secunde zu gering, um die Zeichnungen wesentlich zu entstellen. Der zuckende Muskel zeichnete auf diese Weise Curven, deren horizontale Abscissen der Zeit proportional, deren verticale Ordinaten der Erhebung des Gewichtes gleich waren. Diese Curven hatten im allgemeinen die Gestalt der in Taf. V Fig. 3 dargestellten, welche mit Hilfe des Mikroskopes nach einer der auf dem berussten Glasplättchen gezeichneten Linien copirt ist. *AB* ist die Horizontallinie, welche gezeichnet worden wäre, wenn man den Muskel nicht gereizt hätte. An ihr und an der Curve sind durch verticale Striche die Endpunkte von Abscissen angegeben, deren Abstände einer gleichen Zeitdifferenz im Werthe von 0,03 bis 0,04 Secunde entsprechen; die verticalen Erhebungen sind $6\frac{2}{3}$ mal vergrössert. Den Muskel reizte ein durch ihn hingeleiteter, einzelner Oeffnungsschlag meines im Archiv, 1845, S. 154 (oben S. 754) beschriebenen Neef'schen Elektromotors, ebenso wie dort durch Einfügung grosser Leitungswiderstände in den Kreis des inducirten Stromes geschwächt.

Da der Apparat, wenn die Feder spielte, in der Secunde 300 solche Oeffnungsschläge und 300 entgegengesetzt gerichtete Schliessungsschläge geben konnte, die Dauer der letzteren aber beträchtlich grösser ist, als die der ersteren, so musste die Dauer eines jeden einzelnen Oeffnungsschlages viel kleiner sein als $\frac{1}{600}$ Secunde. Ich betrachte also den reizenden Strom im Vergleich zu den Zeiträumen, welche bei der Muskelzuckung in Betracht kommen, als momentan.

Die Curve giebt die Höhen an, bis zu welchen das Gewicht in den durch die Abscisse gemessenen Zeiträumen erhoben war. Diese Höhen sind nicht identisch mit denen, in welchen das Gleichgewicht zwischen der Schwere des Gewichtes und der augenblicklichen Muskelspannung stattfindet. Wir wollen diese letzteren „Höhen des Gleichgewichtes“ nennen. Die Trägheit des Gewichtes verhindert, dass dasselbe unter dem Einflusse der darauf wirkenden Kräfte sogleich seine Gleichgewichtslage einnehme; deshalb muss sich nothwendig die Curve der Erhebungshöhen von der der Höhen des Gleichgewichtes mehr oder weniger unterscheiden. Gleich der erste Blick lehrt, dass das Endstück der gezeichneten Curve aus Schwankungen um eine veränderliche Gleichgewichtslage besteht. Ein Gewicht, welches, an einem elastischen Faden von starker elastischer Nachwirkung schwebend, in verticale Schwankungen gesetzt wäre, würde ganz ähnliche Wellenlinien zeichnen. Aber auch das Anfangsstück der Curve besteht aus abwechselnd concaven und convexen Stellen, die sich allerdings nicht als so regelmässige Wellen zeichnen wie jene. Eine jede nach oben concave Stelle der Curve bezeichnet aber im ansteigenden Theile derselben eine Ansteigung mit beschleunigter, im absteigenden eine Absteigung mit abnehmender Geschwindigkeit. Beide Arten der Bewegung können nur dadurch entstanden sein, dass während derselben die Resultante der wirkenden Kräfte nach oben gerichtet war. Eine jede nach oben convexe Stelle bezeichnet dagegen im ansteigenden Theile eine Ansteigung mit abnehmender, im absteigenden eine Absteigung mit zunehmender Geschwindigkeit, und lässt auf eine nach unten gerichtete Kraft schliessen. In den concaven Stellen war also die



Spannung des Muskels grösser, in den convexen kleiner als die Schwere des Gewichtes; in jenen muss also die Curve der Gleichgewichtshöhen höher liegen als die gezeichnete Curve, in letzteren tiefer. An denjenigen Punkten aber, wo concave in convexe Stellen übergehen, müssen sich beide Curven schneiden und die Erhebungshöhen den Höhen des Gleichgewichtes gleich sein. Wir lernen auf diese Weise für eine Reihe von Zeitpunkten die Höhen des Gleichgewichtes kennen; sie sind in der Figur durch verticale, punktirte Linien bei *a*, *b*, *c* u. s. w. angegeben. Auch diese Höhen steigen anfangs und sinken dann allmählig nieder. Wir entnehmen daraus die bisher unbekannte Thatsache, dass auch in den animalischen Muskeln, wie es in den organischen nur in sehr viel längeren Zeiträumen der Fall ist, die Energie des Muskels nicht im Augenblicke einer instantanen Reizung sich vollständig entwickelt, sondern grösstentheils erst nachdem diese schon aufgehört hat, allmählig ansteigt, ein Maximum erreicht und wieder verschwindet. Bisher haben wir den Einfluss der Reibung auf die Form der gezeichneten Curve vernachlässigt. Eine solche findet theils im Innern des Muskels, theils zwischen Theilen des Apparates statt. Die Reibung wirkt immer in dem Sinne, dass sie die gerade stattfindende Bewegung verlangsamt, also in den ansteigenden Theilen der Curve so, wie es eine nach unten, in den absteigenden, wie es eine nach oben gerichtete Kraft thun würde, und zwar desto stärker, je grösser die Geschwindigkeit der Bewegung. Aus den regelmässigen Wellenlinien am Ende der Curve erfahren wir, dass die Reibung zu gering war, um die allgemeine Form der Bewegung daselbst merklich zu verändern, und können danach wohl das Gleiche für die übrigen Stellen vermuthen. Ich will aber ausserdem, um unser Hauptresultat zu sichern, den streng zu führenden Beweis hierher setzen, dass die Energie des Muskels, während das Stück *bc* gezeichnet wurde, grösser gewesen sein muss als beim Punkte *b* selbst. Das Stück *bc* ist nach oben concav, die Geschwindigkeit während desselben ist also eine beschleunigte gewesen, folglich in allen seinen Punkten grösser als die in *b*, ebenso die mit der Geschwindigkeit steigende

und sinkende Reibung. In *b*, der Uebergangsstelle zwischen einem concaven und convexen Theile muss nach dem oben Gesagten die Spannung des Muskels gleich der Summe der Schwere des Gewichtes und der Kraft der Reibung gewesen sein, in den anderen concaven Theilen von *bc* aber grösser als die Summe derselben Schwere, und der wegen vermehrter Geschwindigkeit ebenfalls vermehrten Reibung. Demnach ist die Spannung des Muskels trotz seiner zunehmenden Verkürzung in *b* kleiner gewesen als in den übrigen Theilen von *bc*; daraus folgt, dass auch seine Energie von *b* aus gestiegen ist.

Wird die Reibung bei solchen zeichnenden Versuchen beträchtlicher, so verwischt sich der Wechsel von convexen und concaven Stellen immer mehr. Deshalb ist in den übrigen sehr zarten und genauen Curven, welche ich durch die zeichnende Spitze im Glimmerblättchen einritzen liess, die Concavität *bc* fast in eine gerade Linie verwandelt, und von den Oscillationen des Endstückes ist meistens nur noch eine einzige sichtbar. Unter allen zum Zeichnen von mir angewendeten Materialien giebt angerusstes Glas die geringste Reibung; die, welche bei dieser Art des Zeichnens noch stattfindet, scheint hauptsächlich dem Muskel selbst, weniger den Theilen des Apparates anzugehören, und möchte sich deshalb kaum noch wesentlich verändern lassen. Da nun dadurch selbst bei möglichst vollkommener Einrichtung des Apparates eine grössere Genauigkeit der Messungen vereitelt wird, habe ich den bisher verfolgten Weg verlassen und die gewonnenen Resultate benutzt, mir einen anderen zu bahnen, auf welchem wir sie durch genauere Messungen bestätigt finden werden.

§ 2.

1. Die Anwendung der Methode von Pouillet für die Muskelzuckung.

Die Grundlage der Methode von Pouillet zur Messung kleiner Zeiträume besteht darin, dass die Zeit, während welcher ein galvanischer Strom von bekannter Intensität von einem



286 Drahtgewinde aus auf einen Magnet gewirkt hat, genau aus dessen veränderter Bewegung berechnet werden kann. Es ist bis jetzt noch keine Grenze der Kleinheit von Zeittheilen abzusehen, deren Messung auf diese Weise nicht möglich werden sollte, da man die Intensität des wirkenden Stromes und die Grösse seiner Wirkung auf den Magnet durch Vermehrung der elektromotorischen Elemente und der Windungen des Drahtgewindes beliebig steigern kann. Eine andere Beschränkung trifft aber den Gebrauch dieses Verfahrens. Man muss es nämlich zu bewirken wissen, dass Anfang und Ende des gedachten Stromes, welchen wir fortan den zeitmessenden nennen wollen, genau mit dem Anfang und Ende des mechanischen Vorganges zusammenfallen, dessen Dauer gemessen werden soll. In den zu beschreibenden Versuchen fing der zeitmessende Strom in dem Augenblicke an, wo ein instantaner elektrischer Schlag durch den Muskel oder seinen Nerven ging, und endigte dadurch, dass die Leitung, in welcher er kreiste, durch die Zusammenziehung des Muskels unterbrochen wurde. Gleichzeitig konnte aber die Spannung genau bestimmt werden, welche der Muskel erreichen musste, um die stromleitenden Metalle voneinander trennen zu können. Die zu berechnende Dauer des zeitmessenden Stromes ist also identisch mit der Zeit, welche zwischen der Reizung des Muskels oder seines Nerven und dem Augenblicke verfliesst, in welchem seine Spannung eine bestimmte Grösse erreicht hat. Durch eine Reihe solcher Messungen, bei denen man den Muskel verschiedenen grosse, entgegenstehende Kräfte überwinden lässt, erfährt man, in welchen Zeiträumen sich nacheinander die verschiedenen Grade der Energie desselben entwickeln.

Die von mir gebrauchten Vorrichtungen zerfallen in folgende wesentliche Theile:

- 1) diejenigen, welche zur Erregung, Leitung und zur Messung der Wirkung des zeitmessenden Stromes dienen;
- 2) diejenigen, welche einen zweiten Strom erregen und leiten, dessen Bestimmung es ist, den Muskel oder seinen Nerven zu reizen;

- 3) die, mittelst deren der Muskel den zeitmessenden Strom unterbricht.

Des leichteren Verständnisses wegen beginne ich mit der Beschreibung des letzten Apparates, von welchem ein vollständiger Durchschnitt in Fig. 1, der obere Theil eines darauf rechtwinkligen anderen Durchschnittes in Fig. 2 dargestellt ist. Das Gestell besteht aus zwei quadratischen Brettern *AA* und *BB*, welche durch vier hölzerne Säulen verbunden sind. Das untere ruht auf Stellschrauben, das obere trägt die beiden Messingsäulen *CD*, diese den Querbalken *DD*, darauf ruhen wieder die Säulchen *L*, mit dem Querbalken *FF*, endlich der Hohlzylinder *aabb*, dessen oberer, ebener Rand behufs der elektrischen Isolation aus Elfenbein besteht. Die darauf liegende, unten eben abgeschliffene Platte *HH* ist nicht befestigt, sondern liegt lose auf. Durch ihre Mitte geht die Schraube *I*, deren unteres Ende in ein stählernes Häkchen ausläuft, an welchem der Muskel hängt. Um den Wadenmuskel des Frosches daran zu befestigen, stiess ich dasselbe in das untere Gelenkstück des Oberschenkelbeines ein, welches Stück vom übrigen Knochen getrennt wurde, dagegen mit dem Muskel, der sich an ihm inserirt, in Verbindung blieb. Durch die Aufhängung mittels der Schraube ist es möglich, den Muskel nach Bedürfniss höher und tiefer zu stellen, nach rechts oder links zu verschieben und um seine Axe zu drehen. Derselbe hängt in einem fast vollständig geschlossenen Raume, dessen Luft mit Feuchtigkeit gesättigt werden kann, um das Austrocknen des Präparates zu verhindern. Dieser Raum wird gebildet durch die auf dem Querbalken *DD* ruhende, mattgeschliffene Glasplatte *EE* und die darüber befindliche Glasglocke, deren unterer Rand eben geschliffen ist, und deren obere Oeffnung durch zwei halbkreisförmige Messingstückchen *GG* und den in der Mitte hindurchtretenden Cylinder *aabb* geschlossen wird; es bleibt also nur die Oeffnung in dem cylindrischen unteren Ansatz *e* des Querbalkens *DD*. Die Art des Verschlusses der oberen Oeffnung macht es möglich, die Glocke zu entfernen und wieder aufzusetzen, ohne die Lage des Muskels zu verändern. Die Luft in der Glocke wird durch nasse Pappscheiben feucht erhalten, welche man



an den Wänden derselben und auf der Glasplatte *EE* anbringt; es wurde dadurch möglich, den ganz freiliegenden Nerven 3–4 Stunden leistungsfähig zu erhalten. Die Zuleitung des Stromes zum Nerven kann durch vier Kupferdrähte geschehen, von denen nur zwei *vv* in Fig. 2 gezeichnet sind. *w* ist der Nerv; die Drähte *vv* sind in Klemmschrauben befestigt. Die Körper der letzteren durchbohren die Glasplatte, und ihre unteren Theile *uu* stehen durch Kupferdrähte in leitender Verbindung mit dem Quecksilber in den vier Näpfchen *t*. Indem man durch beliebige zwei von diesen Näpfchen und die entsprechenden Drähte *v* den zur Reizung des Nerven dienenden Strom einleitet, kann man verschiedene Stellen des Nerven der Wirkung desselben aussetzen. Sollte der Schlag durch den Muskel selbst gehen, so wurde einer der Drähte *v* an sein oberes sehniges Ende gelegt, und statt eines zweiten zwischen der entsprechenden Klemmschraube und dem Haken *d*, welches in den Knorpel der Achillessehne eingehakt ist, ein äusserst feines, wie ein Seidenfaden biegsames Silberdrähtchen eingeschaltet, wie es zu Posamentirarbeiten gebraucht wird. Am Muskel hängt eine Schale *K* für Gewichte, vermittelt folgender Zwischenstücke. 1) Ein oder zwei stählerne Haken *d* und *e*. 2) Ein viereckiger stählerner Rahmen *f*, in dessen unteres Querstück ein Elfenbeinplättchen mit konischer Vertiefung eingelegt ist. Diese Vertiefung ist bestimmt zur Aufnahme der oberen Stahlspitze des folgenden Stückes. 3) Das stromleitende Zwischenstück *ghikl*, welches ich unten genauer beschreiben werde. 4) Ein zweiter viereckiger Rahmen *f*, von derselben Gestalt wie *f*, welcher aber kein isolirendes Elfenbeinplättchen zu tragen braucht. 5) Der stählerne Haken *r*, an welchem endlich vermittelt messingener Ketten die Schale *K* hängt. Das stromführende Zwischenstück nenne ich so, weil es gleichzeitig zur Leitung des zeitmessenden Stromes dient. Seine Zusammensetzung erhält am besten aus Fig. 2, wo es durch den Muskel von seiner Unterlage abgehoben dargestellt ist. Es besteht aus zwei geraden Stahlstängchen *gl*, welche durch fünf messingene Querbalken verbunden sind, *g*, *h*, *i*, *k* und *l*. Von diesen tragen *g* und *l* stählerne Spitzen, welche in die konischen

Vertiefungen von *f*, und *f*, eingreifen. In *h* und *k* befinden sich kupferne Schrauben mit Gegenmutter, von denen die erstere am unteren Ende eine abgerundete Kuppe *m* von Gold, die andere eine gut amalgamirte Spitze hat; beide dienen zur Ein- und Ausleitung des zeitmessenden Stromes. Die Goldkuppe *m* ist bestimmt, auf dem Goldplättchen *n* zu ruhen, welches der mittels Klemmschrauben verstellbare Querbalken *MM* trägt. Die amalgamirte Spitze kann mit dem Quecksilber in dem Näpfchen *o* in Berührung gesetzt werden. Das letzte Querstück *i* enthält eine Stahlspitze, welche nur bei solchen Versuchen gebraucht wird, wo man gleichzeitig die Höhe der Erhebung des Gewichtes messen will. Das Näpfchen *o* befindet sich in einer isolirenden Platte von Gutta-Percha *pp*, welche auf dem Querbalken *NN* ruht. Die Platte ist bei *y* zerschnitten, und durch einen Lederstreifen wieder zu einem Charniargelenk verbunden. Das kleinere Stück derselben ist an das Messingstück *NN* durch Erwärmen angeklebt, das grössere liegt frei auf und wird durch den federnden Draht *qq* angedrückt. Letzterer bringt zugleich das Quecksilber des Näpfchens *o* in leitende Verbindung mit dem von *s*.

Der Sinn dieser Anordnung ist folgender. Denken wir, der Muskel trage vermittelt der erwähnten Zwischenstücke ein gewisses Gewicht, welches wir seine Belastung nennen wollen, und er werde durch Drehung der Scheibe *HH*, während die Schraube *I* nicht mitgedreht wird, so weit gesenkt, dass die Goldkuppe *m* das Goldplättchen *n* gerade berühre. Unter diesen Umständen ist die Spannung des Muskels gleich der Schwere seiner Belastung. Die geringste Steigerung seiner Energie wird die Belastung um ein Weniges erheben und *m* von *n* entfernen müssen. Nachdem der Muskel so eingestellt ist, werde noch ein gewisses Gewicht auf die Schale *K* gelegt, welches wir die Ueberlastung nennen wollen. Die angehängten Theile können dadurch nicht weiter herabgezogen, der Muskel nicht stärker gespannt werden, weil sich die Goldkuppe *m* auf das Plättchen *n* aufstützt. Wenn jetzt der Muskel gereizt wird, ist es klar, dass er das Gewicht erst dann erheben kann, wenn seine elastische Spannung gleich



der Summe der Belastung und Ueberlastung geworden ist. Es wird also jetzt der zeitmessende Strom, welcher von n auf m , dann durch das stromführende Zwischenstück und die amalgamirte Kupferspitze in das Quecksilber von o übergeht, erst in dem Augenblicke unterbrochen werden, wo die elastische Spannung des Muskels sich um eine, durch die Schwere der Ueberlastung genau zu messende Grösse vermehrt hat. Das war es gerade, was wir von unserem Apparate verlangten.

Es ist hier noch zu bedenken, dass am Ende der Zuckung, wenn die Goldkuppe m wieder auf das Plättchen n herabsinkt, der zeitmessende Strom wieder geschlossen und dadurch die Messung vereitelt werden würde, wenn nicht gleichzeitig die Leitung desselben noch an einem anderen Punkte dauernd unterbrochen würde. Um diesen Zweck zu erreichen, ohne dabei die freie Beweglichkeit der aufgehängten Theile zu beeinträchtigen, habe ich mehr Nachsinnen und complicirte Hilfsmittel aufgeboten, als wegen irgend eines anderen Theiles des Apparates, bis sich zuletzt der einfachste und leichteste Ausweg eröffnete. Die amalgamirte Spitze ist nämlich so gestellt, dass sie ganz nahe über der Fläche des Quecksilbers in o schwebt. Hebt man den freien Theil der Gutta-Percha-Platte pp ein wenig, sodass das Quecksilber und die Spitze sich berühren, so bleibt jenes an dieser haften, auch wenn die Platte wieder gesenkt wird. Das Quecksilber erhält dann eine kegelförmig nach der Spitze emporsteigende Oberfläche, wie sie in Fig. 1 dargestellt ist. Wird aber während der Zuckung des Muskels die Spitze gehoben, so reisst das Quecksilber ab, nimmt seine rundliche Oberfläche wieder ein (Fig. 2), und da beim Zurückfallen die Spitze diese Oberfläche gar nicht wieder berührt, bleibt die Stromleitung zwischen beiden Theilen unterbrochen. Um die Vorrichtung in gutem Stande zu erhalten, ist es nur nöthig, von Zeit zu Zeit mit einem Pinsel zwischen Spitze und Quecksilber hinzufahren und sie dadurch von Staub zu reinigen; sie erfüllt dann ihren Zweck selbst bei Erhebungen der Spitze von $\frac{1}{10}$ mm Höhe.

2. Leitungsapparat des zeitmessenden Stromes.

Da wir in dem Wege dieses Stromes eine Stelle von etwas veränderlichem Widerstande haben, nämlich die, wo die Goldkuppe m das Plättchen n mit veränderlichem Druck, daher auch mit verschiedener Innigkeit berührt: so war es vorthellhaft, den übrigen constanten Widerstand der Leitung zu vergrössern, damit jener veränderliche Theil desselben an Grösse dagegen verschwinde. Das Galvanometer besteht deshalb aus 1400 Windungen übersponnenen Kupferdrahtes von 0,012 p. L. Dicke, welche auf einen Holzrahmen gewickelt sind, der den gewöhnlich bei Multiplicatoren gebräuchlichen ähnlich, nur etwas grösser ist. Parallel den Windungen hängt neben einer der Seitenflächen desselben, 0,03 Meter von ihr entfernt, das 0,09 Meter lange Magnetstäbchen an mehreren 1 Meter langen Coconfäden. Der Magnet trägt ein Spiegelchen und zwei verschiebbare dicke Metallringe, welche dazu dienen seine Schwingungen hinreichend langsam zu machen, um bequem die Ausschläge ablesen zu können. Die Schwingungsdauer ist 24,607 Secunden. Die Messung der Schwingungen geschah nach der von Gauss und Weber eingeführten Methode durch Beobachtung des in dem Spiegel des Magnetes gesehenen Bildes einer horizontalen Scale mittels eines Fernrohrs. Der Mittelpunkt der Scale ist von dem des Magnetes 1500 Scalentheile entfernt, sodass jeder Theilstrich einer Ablenkung desselben um den Winkel von 1 Minute 9 Secunden entspricht. Ich durfte den Magnet den Drahtwindungen so weit nähern, ohne fürchten zu müssen, dass die Ablenkungswinkel aufhörten, den Stromeskräften proportional zu sein, weil in den folgenden Versuchen, während der Dauer des zeitmessenden Stromes, stets der Magnet den Windungen parallel ist, und bei den Intensitätsmessungen des Stromes die Ablenkungen sich nur auf zwei Winkelgrade belaufen.

Als erregende Elemente wandte ich vier Daniell'sche an. Der von ihnen erregte Strom wirkte viel zu kräftig auf den Magnet, als dass die Intensität desselben mittels des Spiegelbildes der Scale hätte gemessen werden können.



Es ist dieser Umstand eine der Schwierigkeiten der Methode. Die Wirkung der dauernden Ablenkung ist immer um so sehr viel grösser als diejenige, welche der Strom während der kurzen Dauer der zu messenden Zeiträume hervorbringt, dass beide nicht ohne Weiteres an demselben Instrumente gemessen werden können und, um schliesslich aus den Ausschlägen des Magnetes die Zeit zu berechnen, muss man das Verhältniss jener beiden Wirkungen kennen. Pouillet hat zur Beseitigung dieser Schwierigkeit ein Verfahren angegeben, welches aber, wie Siemens¹⁾ gezeigt hat, keiner grossen Genauigkeit fähig ist. Ich habe deshalb einen anderen Weg eingeschlagen. Zur Messung der dauernden Ablenkung leitete ich nur einen kleinen, aber genau bestimmbaren Theil des Stromes durch das Galvanometer. Ich entfernte dasselbe zu diesem Zwecke aus der Leitung und fügte dafür zwei Drahtstücke ein, welche zusammen einen ebenso grossen Widerstand darboten; der des kürzeren dieser Stücke war genau $\frac{1}{141.06}$ von dem des Galvanometers. Die Abgleichung der Summe der Widerstände beider Drähte mit dem des letzteren geschah nach der von Wheatstone angegebenen Methode.²⁾

²⁹² Der Strom welcher diese neue Leitung durchfloss, war daher genau so gross wie der, dessen Intensität bestimmt werden soll. Schaltete man dann das Galvanometer als Nebenschliessung des kürzeren erwähnten Drahtstückes ein, so zweigte sich $\frac{1}{141.06}$ des ganzen Stromes durch dasselbe ab, man braucht also nur die unter diesen Verhältnissen beobachtete Ablenkung mit 141,06 zu multipliciren, um die dauernde Ablenkung durch den ungetheilten Strom zu finden.³⁾ Da es sich als vorthellhaft zeigte, nach jedem zeitmessenden Versuche, den getheilten Strom zur Beruhigung

1) Fortschritte der Physik im Jahre 1845, dargestellt von der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin. S. 50.

2) Poggend. Ann. d. Physik. Bd. LXII. S. 535. — Philos. Transactions. 1843. p. 332.

3) Allerdings wird der Strom durch Hinzufügung der Nebenschliessung etwas verstärkt, jedoch in so geringem Maasse, dass dieser Umstand hier ganz vernachlässigt werden konnte. In der That beträgt die desfallsige Correction des Factors 142,06 auch im ungünstigsten Falle, wenn nämlich

des Magneten zu gebrauchen, ordnete ich die Leitungen so an, dass die beiden bezeichneten Verbindungsweisen durch blosses Umlegen eines Gyrotrops sehr schnell miteinander vertauscht werden konnten.

3. Der erregende Strom.

Gereizt habe ich den Muskel oder seinen Nerven theils durch Schliessung eines von vier Daniell'schen Elementen erregten galvanischen Stromes, der durch ihn hingeleitet wurde, theils durch momentane Inductionsströme. Das erstere Verfahren hatte neben anderen kleinen den grösseren Nachtheil, die Reizbarkeit des Muskels durch die längere Dauer der Durchströmung schneller zu erschöpfen, gab übrigens ganz eben solche Resultate wie das letztere. Der angegebene Nachtheil war noch grösser bei den Versuchen, wo der Muskel auf die Beendigung eines ihn durchfliessenden galvanischen Stromes antworten sollte, weil dieser nothwendig schon vom ²⁹³ Beginn des Versuches an, also mindestens während der Zeit einer ganzen Schwingungsdauer des Magneten vor der Zuckung geschlossen sein musste.

Wesentliche Bedingung ist, dass der erregende Vorgang der Zeit nach genau zusammenfalle mit dem Beginn des zeitmessenden Stromes. Im Fall der Muskel auf den Eintritt eines galvanischen Stromes antworten soll, ist diese Bedingung sehr leicht und vollständig auf folgende Weise zu erfüllen. K, Z , und K, Z , (s. d. schematische Zeichnung Fig. 7) sind zwei galvanische Batterien, jede aus 4 Daniell'schen Elementen bestehend; die Zinkenden befinden sich bei Z , und Z , und sind mit dem Quecksilbernäpfchen c in leitender Verbindung. Die Kupferpole sind durch die Leitung K, b, d, a, G, K , verbunden. Bei b ist der Muskel in die Leitung eingeschaltet, a soll die Stelle bezeichnen, wo durch seine Zuckung die Leitung unterbrochen wird, d ist eine amalgamirte Spitze,

der Widerstand der übrigen Leitung gegen den der hier besprochenen Stücke ganz verschwände, nur 0,007, also noch keine Einheit in der letzten Decimalstelle.



G das Galvanometer. Ist die Leitung in dem Zustande, wie sie hier abgebildet ist, so besteht sie aus einem einzigen Kreise, in welchem zwei gleiche Batterien sich entgegenwirken, also kein Strom entsteht. Die etwaigen geringen Unterschiede ihrer elektromotorischen Kräfte verschwinden für die Wahrnehmung fast vollständig wegen der Ladungen, welche sich sehr schnell auf den Häkchen entwickeln, zwischen denen der Muskel befestigt ist, und durch welche zugleich der Strom in ihn eingeleitet wird. Wird aber die Spitze *d* in das Näpfchen *c* getaucht, so haben wir zwei voneinander unabhängige Stromkreise *K, b d c Z*, und *K_n, G a d c Z_n*, welche beide nur mit der Stelle *cd* aneinander hängen. Beide werden genau in demselben Augenblicke geschlossen, nämlich wenn die Spitze *d* zuerst das Quecksilber in *c* berührt. Der Muskel unterbricht darauf die Leitung des zeitmessenden Stromes bei *a*. Wird alsdann *c* von *d* wieder getrennt, so ist kein geschlossener Kreis mehr vorhanden, und alle Ströme hören auf.

²⁹⁴ In allen Versuchsreihen, welche ich später anführen werde, habe ich das zweite Verfahren gebraucht; der Muskel ist durch einen Inductionsstrom gereizt worden, welcher durch die Wirkung zweier nicht mit Eisen gefüllter Drahtspiralen aufeinander erregt wurde. In dem Augenblicke, wo ein die eine derselben durchkreisender galvanischer Strom geschlossen wird, entsteht in der zweiten ein inducirter Strom von sehr kurzer Dauer, welcher in entgegengesetzter Richtung durch die Windungen läuft. In dem Augenblicke dagegen, wo der erstere erregende Strom aufhört, entsteht wieder ein inducirter Strom in der zweiten Spirale, dieses Mal aber dem inducirenden gleich gerichtet. Die elektromagnetische Wirkung der inducirten Ströme, wenn sie einen Magnet ablenken, ist in beiden Fällen gleich; aber der zweite hat eine viel kürzere Dauer und eine ebenso vielmal grössere Intensität als der erste. Da es mir wesentlich auf eine möglichst kurze Dauer ankam, wählte ich zur Reizung der Muskeln den bei der Unterbrechung des primären Stromes inducirten secundären, und brachte kein Eisen in die Spiralen, weil durch dessen Anwesenheit die Wirkung zwar sehr verstärkt, aber auch ver-

zögert wird. Die inducirende Spirale konnte ganz in die inducirte hineingeschoben, oder mehr oder weniger von ihr entfernt werden, wodurch die inducirten Ströme stärker oder schwächer wurden. Um die thierischen Theile möglichst zu schonen, brauchte ich meist sehr schwache Ströme, welche wohl kaum durch ein anderes Galvanoskop sichtbar gemacht werden können, als durch den Froschnerven. Wegen ihrer Schwäche konnten auch nie unipolare Wirkungen eintreten, welche sonst den Gebrauch solcher Ströme für physiologische Zwecke, wenn die Wirkung localisirt werden soll, sehr misslich machen.¹⁾

Dass der Augenblick, wo der inducirende Strom aufhört, und der inducirte den Muskel oder Nerven durchfährt, genau mit demjenigen zusammenfalle, wo der zeitmessende Strom anfängt, habe ich durch den einfachen in Fig. 6 abgebildeten Mechanismus erreicht. *AB* ist ein bei hinreichender Festigkeit möglichst leichtes Brettchen, welches um die stählerne Axe *dd* drehbar ist, dessen Drehung aber durch die beiden Klötze *F* und *G* auf einen ganz kleinen Winkel beschränkt wird. Bei *B* ist darin eine Platinspitze *e* befestigt, welche unten auf das Platinplättchen *f* aufstösst. Durch eine schwache Feder wird das Ende *B* des Brettchens eben nur kräftig genug herabgedrückt, um sicher die metallische Berührung zwischen *e* und *f* herzustellen. Das letztere Plättchen steht mit dem Draht *g* und dem Quecksilbernäpfchen *h* in leitender Verbindung, die Spitze *e* aber mit dem sehr biegsamen Drahte *b, b_n*, der seitlich von dem Hebelchen ebenfalls nach einem Näpfchen hinführt. Am anderen Ende *A* des Brettchens befindet sich ein Platinplättchen, welches mit einem ähnlichen Drahte *a, a_n*, und einem entsprechenden Näpfchen *i* eine leitende Verbindung bildet. Ich werde diesen Apparat im Folgenden mit dem Namen der Wippe bezeichnen. Dazu gehört noch der Schliessungsstab *C*, ein kupferner Stab mit Schraubenklemme zur Einfügung des Drahtes *c, c_n*, und einem vergoldeten und abgerundeten unteren Ende. Letzterer wird in der Hand gehalten; wenn man sein unteres

¹⁾ S. E. du Bois-Reymond, Untersuch. u. s. w. Bd. I. S. 435 ff.



Ende auf das Plättchen bei *A* aufsetzt, wird eine leitende Verbindung hergestellt zwischen dem Drahte *c*, *c*, und dem *a*, *a*,. Geschieht dieses Aufsetzen hinreichend kräftig, so wird gleichzeitig das Brettchen *AB* in Bewegung gesetzt, *A* gesenkt, *B* gehoben, und dadurch die Spitze *e* von der Platte *f* getrennt. Ist also der zeitmessende Strom durch *c*, *c*, *C A* *a*, *a*, *i* geschlossen, und der inducirende durch *h g*, *g*, *f e* *b*, *b*,, so wird letzterer in dem Augenblicke geöffnet, wo ersterer geschlossen wird. Streng genommen wird allerdings zwischen der ersten Berührung von *C* mit *A* und der Trennung der Spitze *e* von *f* eine Zeit verfließen, welche zur Fortpflanzung des Stosses durch die elastische Masse des Holzes nöthig ist. Davon aber, dass diese Zeit zu klein ist, um selbst mit unserem Apparate wahrgenommen werden zu können, kann man sich auf folgende Weise überzeugen. Man stelle eine Leitung her zwischen *b*, und *i*, und setze das Näpfchen *h* und den Draht *c*, *c*, mit den beiden Enden der Leitung des zeitmessenden Stromes in Verbindung. Setzt man jetzt den Schliessungsstab *C* auf das Plättchen *A* so leise auf, dass das Hebelchen nicht bewegt wird, so wird der Strom dauernd geschlossen über *h g*, *g*, *f e b*, *b*, *i a*, *a*, *A C c*, *c*,, und der Magnet wird gewaltsam gegen die Wände seines Kastens geworfen. Setzt man dagegen den Schliessungsstab kräftig auf, dass das Hebelchen gehoben wird, so wird der bei *A* geschlossene Strom auch sogleich wieder zwischen *e* und *f* unterbrochen, dauert also nur so lange, als zur Uebertragung des Stosses nach *B* nöthig ist. Ich habe dabei aber niemals die geringste Wirkung auf den Magnet gesehen. Durch Einfluss von Luftströmungen könnten allenfalls Aenderungen seines Schwingungsbogens von $\frac{1}{2}$ Scalenthail verdeckt werden, was einer Zeitdauer von etwa $\frac{1}{10000}$ Secunde entsprechen würde. Jedenfalls genügt es zu wissen, dass der Fehler, welchen unser Mechanismus einführt, viel kleiner ist als die übrigen nicht zu vermeidenden Störungen der Versuche.

Wir haben bisher den zur Reizung angewendeten Strom einen momentanen genannt; es fragt sich indessen noch, in wie weit wir dazu berechtigt sind. Die Dauer solcher In-

ductionsströme hat sich bisher durch ihre Kleinheit allen Messungen entzogen, und ist deshalb in allen Anwendungen immer als verschwindend klein betrachtet worden. Indessen kommen wir bei mehreren der späteren Versuche der Grenze, bis zu welcher man die Feinheit der Beobachtungen bisher getrieben hat, sehr nahe oder überschreiten sie selbst. Ich musste darum nach Mitteln suchen, wodurch ich mich überzeugen konnte, dass die Dauer der angewendeten Ströme auch gegen so kleine Zeiträume nicht in Betracht kommt, wie die von mir gemessenen sind. Dazu bot mir die eben beschriebene Wippe eine Gelegenheit, nachdem eine kleine Veränderung daran vorgenommen war. Ich befestigte nämlich an der Stelle des Platinplättchens *A* ein amalgamirtes Kupferplättchen, auf welchem eine ganz dünne Lage flüssigen Quecksilbers ausgebreitet war, und ersetzte den Schliessungsstab durch einen ähnlichen mit amalgamirter Spitze. Wenn ich nun mit diesem gegen die amalgamirte Platte stiess, so schloss er die Leitung zwischen *c*, und *i* in dem Momente, wo er zuerst das flüssige Quecksilber berührte. Das Hebelchen bewegte er aber und unterbrach dadurch die Leitung zwischen *h* und *b*, erst dann, wenn er durch die Quecksilberschicht bis zur Kupferplatte vorgedrungen war. Die Zwischenzeit beider Momente wurde nach demselben Verfahren gemessen, durch welches wir uns vorher davon überzeugt haben, dass die Zeit der Fortpflanzung des Stosses in der Wippe eine verschwindend kleine sei. Ihre Grösse ergab sich zu 0,00012 bis 0,00033 Secunden; sie variirt natürlich nach der Geschwindigkeit des Aufsetzens; hier genügt es aber ihren Werth nur ungefähr zu kennen. Lässt man nun im ersten jener Momente den inducirenden Vorgang beginnen, unterbricht im zweiten die Leitung des inducirten Stromes, der bis dahin das Galvanometer durchkreist hatte, so erfährt man aus der Wirkung auf den Magnet, ob in der angegebenen Zeit der ganze oder nur ein Theil des inducirten Stromes hindurch gegangen sei. Um durch Aufsetzen des Schliessungsstabes den inducirenden Strom zu unterbrechen, ordnete ich die Leitungen so an, dass der Stab und die zugehörige Leitung der Wippe eine Nebenschliessung von verhältnissmässig geringem Widerstande



für die inducirende Spirale bildeten. Wurde der Stab aufgesetzt, so ging fast der ganze Strom, der bisher die Spirale durchkreist hatte, von dieser auf die neue Schliessung über. Dadurch wurde in der zweiten Spirale ein Strom inducirt, der dieselbe Richtung und dieselbe Grösse elektromagnetischer Wirkung, aber eine viel grössere Dauer hatte als derjenige, welchen ich bei den physiologischen Versuchen durch blosser Unterbrechung der Leitung der inducirenden Spirale zu erregen pflegte. Die Verschiedenheit der Dauer rührt davon her, dass sich bei Einschaltung einer Nebenleitung auch in der inducirenden Spirale ein inducirter Strom bilden kann, bei unterbrochener Leitung aber nicht. Wie gross dieser Unterschied sei, lässt sich daraus beurtheilen, dass bei den mächtigen Apparaten von Henry¹⁾ die physiologische Wirkung des Oeffnungsschlages ganz aufhörte, wenn der Strom wegen Einschaltung einer guten Nebenschliessung statt durch Unterbrechung der Leitung verschwand. In unseren Versuchen lenkte der inducirte Strom, wenn er ganz durch das Galvanometer ging, den Magnet um 1,4 ab, wurde er aber durch Hebung der Wippe auf die angegebene Weise nach der vorher gemessenen Zwischenzeit unterbrochen, nur um 0,4 bis 0,6. Es ging also in der Zeit von 0,00012 bis 0,00033 Sekunden $\frac{1}{3}$ bis $\frac{2}{5}$ dieses Stromes hindurch. Da nun die Dauer desselben eine vielmal grössere war als die der zur Reizung gebrauchten Ströme, so können wir daraus entnehmen, dass die Dauer der letzteren jedenfalls nur wenige Zehntausendtheile einer Secunde betrug, und insofern wirklich als momentan gegen die bei der Muskelzuckung zu messenden Zeiträume betrachtet werden kann.

Es bleibt uns schliesslich noch übrig, die Methode der Berechnung unserer Versuche anzugeben. Wir müssen dabei bedenken, dass der Magnet niemals dauernd in absolute Ruhe versetzt werden kann, sondern wenn man dies auch für einen

1) S. Poggendorff's Annalen der Physik. Bd. LIV. S. 87. — Phil. Magaz. Ser. III. Vol. XVIII. p. 482. — Ueber das ganze Verhältniss s. E. du Bois-Reymond, Untersuchungen u. s. w. Bd. I. 2. Abschn. Kap. II. § IV.

Augenblick erreichen möchte, dass er doch bald durch Einfluss der Luftströmungen wieder anfangen würde zu schwingen. Wir müssen deshalb zum Zwecke der Berechnung von der Annahme ausgehen, dass der Magnet schon vor der Einwirkung des zeitmessenden Stromes in Schwingungen begriffen sei.

Die Zeitdauer t des zeitmessenden Stromes kann berechnet werden, so oft man kennt 1) die Grösse des Ausschlags oder des halben Schwingungsbogens h , vor der Einwirkung des Stromes, 2) die Grösse desselben h_1 nachher, 3) die Ablenkung α , welche stattfand in dem Augenblicke, wo der zeitmessende Strom geschlossen wurde, 4) die Schwingungsdauer T des Magnetes und 5) die Ablenkung I , welche der zeitmessende Strom hervorbringen würde, wenn er gleichmässig anhielte. Wie die letztere ermittelt wird, ist schon angegeben; h und h_1 können mit äusserster Genauigkeit abgelesen werden, dagegen kann α nicht hinreichend genau bestimmt werden, wenn die Schwingungsbögen und somit auch die Geschwindigkeit des Magnetes gross sind. Die Formel, nach welcher t berechnet werden kann, wenn dasselbe ein so kleiner Theil von T ist, dass t^2 gegen T^2 verschwindet, ist folgende:

$$t = \frac{T}{2\pi I} \left[\sqrt{h_1^2 - \alpha^2} - \sqrt{h^2 - \alpha^2} \right],$$

worin für beide Wurzeln der positive Zahlenwerth derselben zu nehmen ist, wenn der Strom die vorhandene Geschwindigkeit des Magnetes vermehrt, für beide der negative, wenn er sie vermindert, endlich blos für die zweite der negative, wenn er sie umgekehrt hat. Aus dieser Formel ergibt sich gleichzeitig, dass ein Fehler im Werthe von α am wenigsten den Werth von t verändern wird, wenn $\alpha = 0$, weil dann auch $dt/d\alpha = 0$. Wir entnehmen daraus die Regel, den zeitmessenden Strom in dem Augenblick zu schliessen, wo der Magnet den Meridian passirt. Der mögliche Fehler von α wird dabei am kleinsten werden, wenn die Bewegung langsam, also der Werth von h , möglichst klein ist, und wird ausserdem weniger Einfluss haben, wenn die Differenz der Zahlenwerthe der Wurzeln, als wenn ihre Summe zu nehmen ist. Daraus be-



stimmt sich als das vortheilhafteste Verfahren, dass man den Strom dann einwirken lässt, wenn die vorhandene Bewegung des Magneten durch ihn verstärkt wird. Die Formel reducirt sich für diesen Fall auf:

$$t = \frac{T}{2\pi L} (h_n - h_i).$$

Ausser der Correction wegen Reduction der abgelesenen Scalentheile auf die Tangenten des Ablenkungswinkels des Magneten, welche bei grossen Ausschlägen nöthig wird, ist noch eine zweite wegen der allmählichen Abnahme der Schwingungsbögen zu machen. Da dieselbe sehr gering ist, so dürfen wir sie als gleichbleibend bei mehreren aufeinander folgenden Schwingungen ansehen.¹⁾ Um die Art der Berechnung zu erläutern, greife ich ein Beispiel heraus. Vor der Einwirkung des Stromes schwingt der Magnet hin und her zwischen den Zahlen 497,7 und 496,7, der dem Meridian entsprechende Scalpunkt ist also 497,2. In dem Augenblicke, wo dieser Punkt unter dem Faden des Fernrohres wieder vorbeigeht, wird der Strom geschlossen, und bleibt es, bis er vom Muskel wieder unterbrochen wird. Der Magnet ist nun in stärkere Schwingungen versetzt, und es werden nacheinander abgelesen 597,7; 397,3; 596,9. Während eines Hin- und Herganges hat sich also der obere Ausschlag vermindert um 0,8. Während des Hinganges von 597,7 nach 397,3 wird er also um 0,4 abgenommen haben, sodass dem unteren Ausschlag 397,3 der obere 597,3 entspricht. Das Mittel beider giebt uns als Lage des Meridians 497,3, hinreichend übereinstimmend mit dem vorher gefundenen Werthe. Auf dem Wege zwischen der Einwirkung des Stromes bei 497,3 bis zum ersten Ausschlag 597,7, also während einer Viertelschwingung, wird $\frac{1}{4}$ von 0,8 verloren gegangen sein; es entspricht also dem Augenblick der Stromwirkung der obere Ausschlag 597,9 und $h_n - h_i$ wird sein $597,9 - 497,7 = 100,2$. Bezeichnen wir die drei aufeinander folgenden oberen Ausschläge mit a_i , a_n und a_m , so ist also:

$$h_n - h_i = a_n - a_i + \frac{1}{4}(a_n - a_m).$$

¹⁾ Gauss und Weber, Result. aus den Beob. d. magnet. Vereins im Jahre 1837. S. 67.

Ich will zum Schluss der Auseinandersetzung der Methode noch einen Controlversuch beschreiben, den ich anstellte, um die Ausführbarkeit unserer Messungen an einer anderen Kraft zu prüfen, die sehr viel schneller als die Muskelkraft eintritt und verschwindet. Ich substituirte nämlich für den Muskel eine Spiralfeder aus Messingdraht und für das Gewicht einen Magnetstab, dessen unteres Ende in den inneren Hohlraum einer Drahtspirale hineinhieng. Wurde durch diese Spirale ein Strom geleitet, so wurde der Magnet herabgezogen, die Goldkuppe m berührte das Plättchen n und stellte die Leitung des zeitmessenden Stromes her; in dem Augenblicke aber, wo der Strom in der Spirale aufhörte, schwand die elektromagnetische Kraft derselben und der Magnet wurde durch die Spannung der Spiralfeder emporgezogen. Wurde der Strom der Spirale mittels der Wippe genau in demselben Augenblicke unterbrochen, in welchem der zeitmessende geschlossen wurde, so konnte durch den letzteren die Zeit gemessen werden, welche bis zum Abheben der Goldkuppe vom Plättchen verfloss. Diese Zeit muss = 0 sein, wenn das Princip unserer Versuche richtig ist; sie war es in der That, so oft nicht seitliche Pendelschwankungen der aufgehängten Theile stattfanden, selbst nur so kleine, wie sie ein in der Ferne vorüberfahrender Wagen erregt. Fand Letzteres statt, so erfolgten kleine unregelmässige Ausschläge des Magneten, die bis zu 12, auch 20 Scalentheilen stiegen. Abgesehen von diesen Störungen kann also auch eine so geringe Kraft, wie die hier angewendete elektromagnetische, welche gleich der Schwere von 3 bis 5 gr. war, und auf eine Masse von 100 gr. wirkte, die mechanische Wirkung, auf welcher unsere Messung³⁰² beruht, mit einer grösseren Präcision ausführen, als wir durch unseren Apparat ermassen können. Die Kraft der Muskeln ist, wie wir sehen werden, sehr viel grösser, deshalb werden die Messungen auch durch Pendelschwankungen viel weniger beeinträchtigt.



§ 3.

Das Anwachsen der Energie im Muskel bei der einfachen Zuckung.

Ich habe auseinandergesetzt, auf welche Weise es möglich ist die Zeit zu messen, die von dem Augenblicke der Reizung an bis zu dem vergeht, wo die elastische Kraft des Muskels einen bestimmten, durch die aufgelegte Ueberlastung gemessenen Werth erreicht hat. Wir wollen zunächst vergleichende Messungen über die verschiedenen Ueberlastungen anstellen.

Ich setze zu diesem Zwecke die folgenden drei Versuchsreihen I, II und III hierher. Die Schläge sind dabei durch den Muskel selbst geleitet und so stark gemacht worden, dass durch eine Verstärkung derselben ihre Wirkung auf den Muskel nicht mehr gesteigert wurde, dass also die Erregung desselben ihr Maximum erreichte. Die erste Rubrik mit der Bezeichnung No. giebt die Reihenfolge der einzelnen Beobachtungen, die zweite die Ueberlastung in Grammen, die dritte den Unterschied der Ausschläge vor und nach der Zuckung an, an welchem ich schon die beiden nöthigen Correctionen angebracht habe, sodass diese Zahlen der Zeitdauer proportional sind. Die Tabellen sind so geordnet, dass in derselben Horizontalreihe Versuche mit gleichen Ueberlastungen nebeneinander stehen. Die Belastung bestand in allen Fällen nur in den wesentlichen Stücken des Apparates; die Einstellung des Muskels, d. h. diejenige Hebung oder Senkung seines Aufhängungspunktes, bei welcher die Goldkuppe *m* das Goldplättchen *n* nach Entfernung der Ueberlastung gerade berührte, erneute ich so oft, als ich mit der letzteren wechselte.

Reihe I.

Angestellt mit dem Wadenmuskel eines im Frühling frisch gefangenen, sehr kräftigen Frosches. Ablenkung des Magneten durch den getheilten Strom zu Anfang des Ver-

suches 119,42 Scalentheile. Die Inductionsspiralen sind so weit voneinander entfernt, dass die Schliessungsschläge keine Wirkung mehr geben, sondern nur noch die Oeffnungsschläge.

No.	Ueberlastung	Differenz der Ausschläge	No.	Ueberlastung	Differenz der Ausschläge	No.	Ueberlastung	Differenz der Ausschläge
1	0	46,87	17	0	35,25	18	0	38,50
2	40	55,77	16	40	55,74	19	40	61,44
3	80	68,46	15	80	65,92	20	80	81,45
4	120	79,50	14	120	82,85	21	120	96,76
5	160	93,90	13	160	88,85	22	140	119,83
6	200	104,50	12	200	103,03			
7	240	116,60	11	240	120,16			
8	280	140,08	10	280	135,88			
9	300	148,35						

Nach Beendigung dieser Messungen hob der Muskel 160 gr. nicht mehr hoch genug, um die amalgamirte Spitze des stromleitenden Zwischensstückes vom Quecksilber loszureissen; bei kleineren Ueberlastungen trat dagegen eine Erscheinung ein, welche ich häufig kurz vor dem Erlöschen der Reizbarkeit bemerkt habe, und wodurch fernere Beobachtungen unmöglich gemacht wurden. Dies waren lang anhaltende, krampfartige Zusammenziehungen, die jeder elektrischen Reizung oder mechanischen Erschütterung folgten. Die Bedingung ihres Eintrittes kenne ich noch nicht; vielleicht ist es eine Modification der Reizbarkeit durch die hindurchgegangenen Ströme. — Ablenkung des Magneten zum Schluss 119,61.

Reihe II.

Der andere Schenkel desselben Frosches. Ablenkung zu Anfang 119,75. Die gebrauchten Schläge sind stärker, indem die Spiralen ganz ineinander geschoben sind.



No.	Ueber- lastung	Differenz der Ausschläge	No.	Ueber- lastung	Differenz der Ausschläge	No.	Ueber- lastung	Differenz der Ausschläge
1	250	140,80						
2	250	140,00						
3	200	111,62						
4	200	111,37						
5	150	90,30	18	150	132,75			
6	150	93,23	17	150	122,01			
7	100	73,10	16	100	90,86	19	100	99,91
8	100	73,50	15	100	91,58	20	100	108,16
9	50	57,21	14	50	64,93	21	50	72,20
10	50	54,14	13	50	58,76	22	50	70,98
11	0	31,15				23	0	46,81
12	0	32,43				24	0	39,60

Nach Versuch 18 hob der Muskel nicht mehr 200 gr.; es wurden deshalb die Ueberlastungen wieder verringert. Ablenkung zum Schluss: 120,57.

Reihe III.

Muskel eines Frosches, der den Winter über ohne Nahrung aufbewahrt worden war. Ablenkung vor den Versuchen: 119,94.

305

No.	Ueber- lastung	Differenz der Ausschläge	No.	Ueber- lastung	Differenz der Ausschläge
1	80	185,3			
2	80	183,3			
3	60	123,7			
4	60	131,1			
5	40	87,3	14	40	111,9
6	40	87,1	13	40	106,2
7	20	66,6	12	20	72,7
8	20	65,1	11	20	76,0
9	0	38,7	10	0	38,9

Zum Schluss wurden 60 gr. nicht mehr hoch genug gehoben, um den Quecksilberfaden zu zerreißen. Ablenkung: 120,32.

Das allgemeine Resultat dieser Reihen, welches wir auch in allen folgenden Versuchen immer wieder finden werden, ist, dass bei gleicher Belastung und gleichem Ermüdungszustande die Differenzen der Ausschläge des Magneten desto grösser sind, je grösser die Ueberlastung. Diese Differenzen sind aber der Dauer des zeitmessenden Stromes proportional, d. h. derjenigen Zeit, welche zwischen der Reizung des Muskels durch den elektrischen Schlag und dem Augenblicke vergeht, wo er das Gewicht erhebt. Um Letzteres zu bewirken, muss die Energie des Muskels desto höher gestiegen sein, je grösser die Ueberlastung ist. Es ergibt sich also aus diesen Versuchen, dass sich die höheren Grade der Energie später als die niederen entwickeln; sie entsteht nicht plötzlich unmittelbar nach der Reizung, sondern steigt erst allmählig an, ein Resultat übereinstimmend mit dem, was wir schon in den vorläufigen Versuchen nach einer ganz anderen Methode gefunden hatten.

Die Form der Ansteigung der Energie im nicht ermüdeten Muskel ergibt sich am besten aus Reihe I No. 1 bis 18, da hier die Zahlen der später angestellten Beobachtungen 10 bis 18 nur kleine Unterschiede von wechselndem Sinne gegen die von 1 bis 9 zeigen. Ich stelle sie nebst ihren Mittelwerthen und der aus diesen berechneten Zeit in der folgenden Tafel zusammen.

Reihe	Ueber- lastung	Beobachtete Differenz der Ausschläge	Mittel derselben	Zeit in $\frac{1}{100}$ Sekunden	Differenzen der Zeit für 40 gr.
I	0	46,87 35,25 38,50	40,21	0,93	0,36
	40	55,77 55,74	55,76	1,29	0,26
	80	68,46 65,92	67,19	1,55	0,32
	120	79,50 82,85	81,17	1,87	0,24
	160	93,90 88,85	91,37	2,11	0,28
	200	104,50 103,03	103,76	2,39	0,34
	240	116,60 120,16	118,38	2,73	0,45
	280	140,08 135,88	137,98	3,18	0,48
	300	148,35	148,35	3,42	

In der letzten Rubrik sind die Zeiträume berechnet, in welchen die elastische Spannung des Muskels um gleiche



Grössen gewachsen ist. Dieselben sind von 40 bis 200 oder 240 gr. nahehin gleich, am Anfang und Ende aber grösser. Die elastische Kraft des Muskels ist also anfangs mit steigender, dann mit ziemlich gleichförmiger, endlich mit abnehmender Geschwindigkeit bis zu ihrem Maximum gewachsen. Dasselbe Verhältniss stellt sich auch trotz des Einflusses der zunehmenden Erschöpfung in den beiden anderen Versuchsreihen heraus, so lange die Ermüdung nicht zu schnell zunimmt.

Reihe	No.	Ueberlastung	Mittel der Differenz der Ausschläge	Zeit in $\frac{1}{100}$ Sekunden	Differenzen der Zeit
II.	1. 2.	250	140,39	3,22	
	3. 4.	200	111,50	2,56	0,66
	5. 6.	150	91,76	2,10	0,46
	7. 8.	100	73,30	1,68	0,42
	9. 10.	50	55,67	1,28	0,40
	11. 12.	0	31,79	0,73	0,55
	13. 14.	50	61,84	1,42	0,69
	15. 16.	100	91,21	2,09	0,67
	17. 18.	150	127,38	2,92	0,83
	19. 20.	100	104,03	2,39	0,53
	21. 22.	50	71,58	1,64	0,75
	23. 24.	0	43,20	0,99	0,65
III.	1. 2.	80	184,3	4,23	1,31
	3. 4.	60	127,4	2,92	0,92
	5. 6.	40	87,2	2,00	0,49
	7. 8.	20	65,8	1,51	0,62
	9. 10.	0	38,8	0,89	0,81
	11. 12.	20	74,3	1,70	0,80
	13. 14.	40	109,0	2,50	

Nur bei den letzten acht Versuchen der Reihe II bringt die schnell zunehmende Erschöpfung eine entgegengesetzte Vertheilung der Differenzen hervor, wo die grössere in der Mitte steht.

In so weit haben unsere jetzigen Versuche nur die That-sachen bestätigt, welche wir aus den von zuckenden Muskeln gezeichneten Curven abgeleitet hatten. Ausserdem stellt sich aber noch ein neues, sehr bedeutsames Resultat heraus, welches aus den früheren Versuchen nicht entnommen werden konnte.

Aus den Zahlen, die wir gewonnen haben, wenn keine Ueberlastung aufgelegt war, ergibt sich nämlich, dass erst eine Zeit nach der Reizung vergeht, ehe die Energie des Muskels überhaupt zu steigen anfängt. Der zeitmessende Strom wird in diesem Falle unterbrochen, sobald die erste merkliche Spur der Energie eingetreten ist; das geschah in unseren Versuchen erst um fast $\frac{1}{100}$ Secunde später als die Reizung. Dadurch wird eine vollständige Analogie des Verlaufes der Zuckung zwischen den animalischen und organischen Muskeln hergestellt. Nach einer verhältnissmässig schnell vorübergehenden Reizung des Darmes oder anderer Organe mit organischen Muskelfasern treten die ersten Spuren der Contraction erst eine merkliche Zeit nach Beendigung der Reizung ein, sie nimmt langsam zu, und lässt dann ebenso langsam wieder nach.

Die Zeitdauer dieses Vorganges und seiner einzelnen Stadien ist bei verschiedenen mit solchen Fasern versehenen Organen äusserst verschieden, am grössten wohl in den contractilen Fasern der Gefässwandungen. Ganz dasselbe findet, wie wir jetzt erfahren haben, auch bei den animalischen Muskeln statt; es vergeht zuerst nach der Reizung eine Zeit, in der sie kein sichtbares Zeichen ihrer Thätigkeit geben, dann steigert sich ihre Energie allmählig bis zu ihren Maximum, um nachher wieder zu sinken, nur dass diese Zeiträume bei ihnen nach Hunderttheilen einer Secunde zu messen sind, wenn sie bei den organischen nach ganzen Secunden oder nach Minuten gemessen werden.

Wir können uns den Vorgang durch eine Curve graphisch darstellen, deren Abscissen der Zeit, deren Ordinaten dagegen der Spannung des Muskels bei unveränderter Länge proportional sind. Aus unseren Messungen lässt sich allerdings erst der Anfang derselben nicht ganz bis zum Maximum hin construiren, wie es in Fig. 4 nach den Zahlen der Reihe I geschehen ist¹⁾, wir können uns aber wenigstens die Art ihres weiteren Verlaufes aus den zeichnenden Versuchen ergänzen.

1) Die Zahlen an der Abscissenlinie bezeichnen $\frac{1}{100}$ Sekunden, die an den Verticalen die Vermehrung der Spannung in Grammen.



Das Stück *ab* der Curve fällt mit der Abscissenlinie zusammen, sie steigt dann anfangs concav nach oben, später convex bis zu ihrem Gipfel, wird dann zunächst convex bleiben, später concav wieder sinken, und sich endlich asymptotisch der Abscissenlinie anschliessen. Sie muss in der allgemeinen Form viel Aehnlichkeit mit der Curve der Höhen des Gleichgewichtes haben, von welcher wir in Fig. 3 einige Punkte bestimmten, doch können ihre Ordinaten nicht genau denen der letzteren proportional sein. Jene giebt die Spannungen bei gleicher Muskellänge, diese die Verkürzungen der Muskellänge bei gleicher Spannung. Da aber der Elasticitätscoefficient sich durch die Verkürzung und durch die Thätigkeit nach E. d. Weber beträchtlich ändert, sind die Verkürzungen den Kräften nicht proportional. Es werden vielmehr die grösseren Ordinaten in der Curve der Gleichgewichtshöhen verhältnissmässig höher sein als in der der Spannungen, die nach oben gewendeten Concavitäten stärker concav, die Convexitäten schwächer convex. Eine Vergleichung der Curve in Fig. 4 mit dem Anfang der anderen, so weit wir aus Fig. 3 deren Gestalt ungefähr entnehmen können, scheint dem nicht zu widersprechen.

Ich habe den Nachweis, dass die gemachten Messungen nicht mit beträchtlicheren Fehlern behaftet sein können, bis hierher verspart, und will ihn jetzt im Zusammenhange geben. Wir können die möglichen Fehlerquellen in zwei Classen theilen, nämlich erstlich in solche, welche die Messung der Zeit zwischen Reizung und Trennung der Goldkuppe *m* vom Plättchen *n* beeinträchtigen, und zweitens in solche, welche verhindern, dass diese Trennung genau in dem Augenblicke geschehe, 310 wo der Muskel den verlangten Grad der Energie erreicht hat. Zu den ersteren gehören Störungen in der Bewegung des Magneten durch Luftströme, Fehler der Ablesung, Dauer des Inductionstromes, Aenderungen in der elektromotorischen Kraft und dem Widerstande der Daniell'schen Elemente u. s. w. Unter ihnen ist nur eine einzige Fehlerquelle, welche das Resultat um mehr als einen kleinen Bruch eines Scalentheiles verändern kann, das ist die nicht immer ganz vollkommene Schliessung des Stromes an der Unterbrechungsstelle. Es kommen einzelne Versuche vor, bei welchen entweder gar

keine oder eine viel kleinere Wirkung auf den Magnet stattfindet, als in den entsprechenden benachbarten Beobachtungen, weil sich ein oft unsichtbares Stäubchen zwischen Goldkuppe und Goldplatte eingelegt hat. Ein Strich mit einem Pinsel dazwischen hindurch beseitigt die Störung. Sehr viel wichtiger ist diese Fehlerquelle, wenn vermöge der Bedingungen des Versuches der Druck an der Unterbrechungsstelle sehr gering und die Berührung der Kuppe und des Plättchens nicht innig genug ist, um nicht dem Strom einen merklichen Widerstand entgegenzusetzen. Das ist der Fall in den Versuchen, wo keine Ueberlastung aufgelegt ist. Hier kommt es, wie in allen anderen Fällen darauf an, den Muskel so einzustellen, dass sich die Metalltheile an der Unterbrechungsstelle möglichst zart berühren, und durch diese Art der Berührung muss auch der Strom hergestellt werden. Ich habe gefunden, dass der Widerstand der Unterbrechungsstelle verschwindend klein ist gegen den der ganzen Leitung, sobald eine ganz geringe Ueberlastung z. B. 1 gr. aufliegt, und dass demgemäss die Intensität des Stromes nicht verändert wird, mag man viel oder wenig Gewichte noch dazu legen. Dagegen gelang es mir durch möglichst zarte Einstellung bei mangelnder Ueberlastung den Strom etwa um $\frac{1}{100}$ seiner ganzen Grösse zu schwächen, weiter konnte ich die Schwächung nicht treiben, ohne ihn gleichzeitig ganz zu unterbrechen. Indessen ist die Möglichkeit nicht zu leugnen, dass der Widerstand der Unter- 311 brechungsstelle jeden beliebigen Werth erreiche, auch kommen einzelne Zuckungsversuche ohne Ueberlastung vor, bei denen die Ausschläge nur $\frac{1}{3}$ oder $\frac{1}{2}$ so gross sind, als sämtliche andere entsprechende der Reihe, was vielleicht in dem angegebenen Umstande seinen Grund findet, vielleicht auch in einem später zu erwähnenden. Eine ähnliche Schwächung des Stromes muss auch bei aufgelegter Ueberlastung in den letzten Augenblicken eintreten, ehe das Gewicht gehoben wird, weil sich nämlich der Druck an der Unterbrechungsstelle um ebenso viel schwächt, als die Kraft des Muskels steigt, bis er endlich im Augenblicke der Trennung ganz aufhört. Nehmen wir an, der Strom höre von dem Zeitpunkte an, wo der Druck an der Unterbrechungsstelle nur noch 1 gr. beträgt, ganz auf.



Die Spannung des Muskels steigt in der ersten Versuchsreihe in einer 12 Scalentheilen entsprechenden Zeit um 40 gr., um 1 gr. also in der von 0,3 eines solchen Theiles. Um soviel höchstens würde also auch die besprochene Fehlerquelle den Ausschlag bei kräftigen Muskeln verringern können; um mehr, wenn die Energie langsamer ansteigt.

Folgende mechanische Bedingungen müssen erfüllt sein, damit der zeitmessende Strom genau in dem Augenblicke unterbrochen werde, wo die Muskelspannung der Schwere der Belastung und Ueberlastung gleich wird:

1) Genaue Einstellung des Muskels, sodass bei Wegnahme der Ueberlastung die Theile an der Unterbrechungsstelle sich eben nur berühren.

2) Vollständige Unbiegsamkeit und Unausdehnbarkeit der Theile, zwischen welchen der Muskel gespannt ist.

3) Der Zug des Muskels muss in einer Verticallinie geschehen, welche durch sämtliche Schwerpunkte der zu hebenden Stücke hindurchgeht.

4) Die zu hebenden Stücke dürfen zur Zeit der Hebung in keiner anderen Bewegung begriffen sein.

Ich habe mit möglichster Sorgfalt diese Bedingungen zu erfüllen gesucht; da uns indessen für so kleine Fehler der Zeit, wie sie hier in Betracht kommen, die sonst gemachten mechanischen Erfahrungen ganz im Stich lassen, müssen wir die Grenzen ihrer möglichen Grösse genau zu bestimmen suchen.

Die Einstellung des Muskels wäre mit der ausreichesten Genauigkeit bis auf etwa $\frac{2}{100}$ mm. zu vollführen, wenn er nicht die sogenannte elastische Nachwirkung in bedeutendem Grade zeigte. Diese besteht bekanntlich darin, dass der betreffende elastische Körper, wenn er durch angehängte Gewichte gedehnt wird, nicht gleich im Anfang seine volle Ausdehnung erreicht, sondern noch längere Zeit hindurch sich merklich verlängert, umgekehrt, wenn seine Spannung vermindert wird, sich ebenso allmählig verkürzt. Diese elastische Nachwirkung ist in den Muskeln sehr nachhaltig, wie es schon aus den Versuchen von Ed. Weber hervorgeht. Daher geschieht es, dass der Muskel, der durch eine bestimmte Belastung gespannt, und um ein gewisses verlängert worden ist,

entweder, wenn er sich weiter frei verlängern kann, es allmählig immer mehr und mehr thut, oder, wenn er wie in unseren Versuchen es nicht kann, einen Theil seiner Spannung wieder verliert. Er verhält sich daher nach einiger Zeit so, als wäre er mit geringerer Belastung eingestellt worden, oder es ist nach der vor mir angenommenen Ausdrucksweise ein Theil seiner Belastung zur Ueberlastung geworden. Dadurch wird die Unterbrechung des zeitmessenden Stromes verspätet, und zwar um so mehr, je langsamer die Kraft des Muskels steigt. Man schützt sich vor dieser Art der Fehler dadurch, dass man vor dem Beginne der Versuche den Muskel eine Zeit lang durch eine viel grössere Belastung dehnt, als man nachher gebrauchen will. Es ist ausserdem zu beachten, dass zwei Zuckungen nicht zu schnell aufeinander folgen dürfen, weil nach der ersteren derselben die Spannung des Muskels noch eine Zeit lang, mitunter 30 bis 40 Secunden, merklich erhöht bleibt, und deshalb bei der zweiten das Gewicht früher erhoben wird, als es ohne jenen Einfluss geschehen sein würde.

Auch abgesehen von der elastischen Nachwirkung kommen Fehler der Einstellung besonders bei den Versuchen ohne Ueberlastung in Betracht. Will man dem zeitmessenden Strom eine hinreichende Leitung herstellen, so muss man nothwendig den Muskel ein wenig tiefer einstellen, als es zur ersten zarten Berührung an der Unterbrechungsstelle nöthig ist. Seine Spannung wird unter diesen Umständen etwas kleiner sein als die Schwere der Belastung, der Ueberschuss der letzteren würde also wie eine Ueberlastung wirken. Die gebrauchten Wadenmuskeln werden durch 10 gr um $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{2}$ mm gedehnt; die kleinste wahrnehmbare Distanz zwischen Plättchen und Goldkuppe ist $\frac{1}{200}$ mm; nehmen wir an, man habe absichtlich zur Herstellung der Berührung den Muskel um das 5fache dieses kleinsten wahrnehmbaren Fehlers, also um $\frac{1}{40}$ mm zu tief eingestellt, so entspräche dem eine Verminderung der Spannung von $\frac{1}{2}$ bis 1 gr. Der Einfluss dieses Fehlers würde bei Versuchen mit Ueberlastung das Resultat nicht merklich ändern, wie vorher bei den Fehlern aus Schwächung des Stromes gezeigt worden ist; er wird in unserem Falle wegen der langsamen Ansteigung der Spannung ein viel



grösserer sein. Aus diesen Gründen ist es auf dem eingeschlagenen Wege unmöglich mit grösserer Genauigkeit zu erfahren, wann die erste Steigerung der Energie eintritt; zwei nicht zu beseitigende Fehlerquellen, Schwächung des Stromes und Ungenauigkeit der Einstellung streben das Resultat in entgegengesetztem Sinne zu verändern. Es wäre sogar möglich, dass die Energie gleich vom Augenblicke der Reizung an stiege, aber so langsam, dass sie z. B. in der Reihe I während des ersten Zeitraumes von 0,0093 Sekunden sich nur um etwa 1 gr. vermehrt hätte. Jedenfalls würde diese Ansteigung ganz unbedeutend sein im Vergleich zu der von 40 gr. in den folgenden 0,0036 Sekunden.

314 Wir dürfen uns daher über die Unregelmässigkeit der Zahlen bei Versuchen ohne Ueberlastung nicht wundern. Wir fanden folgende in Reihe I: 46,87; 35,25; 38,50; in Reihe II: 31,15; 32,43; 46,81; 39,60; in Reihe III: 38,7; 38,9. Ich will noch zwei Reihen hierhersetzen, in denen nur Versuche ohne Ueberlastung angestellt wurden.

Reihe IV.

Muskel von einem Frosche, der den Winter hindurch aufbewahrt worden war, und den ich vor dem Versuche durch 100 gr. gedehnt hatte. Ablenkung vorher 117,68, nachher 119,24. Die Sternchen zwischen den Zahlen bedeuten erneuerte Einstellung.

A. Keine Belastung ausser den Theilen des Apparates. Differenz der Ausschläge: 50,82. * 45,92. 54,94.

B. Mit 50 gr. auf der Schaafe eingestellt: 66,06. 67,15. * 51,34. 53,62. * 54,06.

Einige Versuche mit 100 gr. Belastung misslingen wegen Schwäche des Muskels.

C. Ohne Gewichte auf der Schaafe: 44,47. 25,17. 45,91. * 39,27. 45,02.

D. Mit 50 gr. Belastung: 53,9. * 51,3. 44,7.

Als Folge der elastischen Nachwirkung ist hier zunächst die Höhe der ersten beiden Ziffern unter B zu bemerken,

indem die Spannung gleich nach der neuen Dehnung des Muskels noch schnell nachlässt, ferner der Umstand, dass anfangs nach jeder neuen Einstellung erst eine kleinere, dann eine grössere Zahl folgt. Nachdem der Muskel eine Zeit lang durch 50, dann durch 100 gr. gedehnt gewesen ist, verschwindet beides unter C und D. Die Zahl 25,17 unter C gehört zu denen, welche vermuthlich durch bedeutende Schwächung des Stromes so klein geworden sind; oder es ist hier zufällig gelungen, einen ungewöhnlich frühen Augenblick des Ansteigens der Kraft zu erhaschen.

Reihe V.

315

Muskel von einem während der Begattungszeit frisch gefangenen Frosche, sehr reizbar, aber verhältnissmässig schnell erschöpft, vor dem Versuche gedehnt durch 100 gr. Ablenkung vorher 118,23, nachher 119,77.

A. Ohne Belastung auf der Schaafe: 34,1. * 39,3. * 48,2. * 41,7.

B. Mit 100 gr. Belastung. Der Muskel ist kurze Zeit durch 200 gr. gedehnt worden. 53,5. * 46,6. * 57,3. * 57,8.

C. Ohne Belastung: 42,5. * 20,9. * 63,4. * 56,5. * 56,0. * 59,1. * 66,1. Der Muskel ist erschöpft.

Der Ausschlag des Magneten wächst in beiden Reihen bei der Erschöpfung des Muskels und bei höherer Belastung; ob dies nur wegen des grösseren Einflusses der Fehler der Einstellung geschieht, oder weil sich die zu messende Zeit wirklich verlängert, ist durch die Versuche nicht entschieden.

Wir fahren in der Erörterung der mechanischen Fehler fort, zunächst derer wegen Nachgiebigkeit der Theile des Apparates. Absolute Festigkeit besitzt kein irdischer Stoff; als feste bezeichnen wir vielmehr Körper von so grosser elastischer Kraft, dass ihre Gestalt nur durch Einwirkung sehr beträchtlicher fremder Kräfte merklich verändert werden kann. Diese Fehlerquelle erfordert deshalb besondere Aufmerksamkeit, weil sie, auch wenn die ganze Energie des Muskels im Augenblicke der Reizung sich entwickelte, bewirken könnte, dass der zeitmessende Strom erst nach einer gewissen



kleinen Zeit unterbrochen würde, und zwar ganz wie in unseren Versuchsreihen um so später, je grösser die Ueberlastung. Indessen lässt sich beweisen, dass wir in unseren Schlüssen hierdurch nicht getäuscht worden sind. Um das zu thun, müssen wir zunächst untersuchen, wie und wie stark die Theile unseres Apparates durch die angehängten Gewichte gedehnt und gebogen werden. Die Kraft, welche vor der Zuckung den Aufhängepunkt des Muskels herabzieht, und die oberen Zwischenstücke bis zur Goldkuppe herab dehnt, ist der ursprünglichen Spannung des Muskels d. h. der Belastung gleich, diejenige aber, welche es während der Zuckung thut, der Summe der Belastung und Ueberlastung. Während der Thätigkeit des Muskels wird also sein oberer Aufhängepunkt sinken, und die oberen Zwischenstücke werden sich verlängern. Der Querbalken *MM* dagegen mit dem Goldplättchen, der vor der Zuckung durch die Schwere der Ueberlastung nach unten gebogen wurde, wird steigen, sobald er dieselbe nicht mehr zu tragen braucht. Die Grösse dieser Verschiebungen habe ich bei verschiedenen Belastungen der Metalltheile zu ermitteln gesucht; durch mikroskopische Beobachtung hätte ich solche von 0,01 mm. noch entdecken müssen, konnte aber bei 250 gr. Belastung keine wahrnehmen. Falls nun die Muskelkraft nicht langsam anstiege, wie wir es aus unseren Versuchen geschlossen haben, sondern sich im Moment der Reizung plötzlich änderte, würde das Gewicht von da an mit zunehmender Geschwindigkeit aufsteigen, die Metalltheile aber würden sich mit zunehmender Geschwindigkeit bis in ihre Gleichgewichtslage begeben, und über diese mit abnehmender hinausschwingen, könnten also, bis sie diese Lage erreicht haben, mit den vom Muskel gehobenen Stücken in Berührung bleiben, von da ab aber nicht mehr. Hierüber würde höchstens so viel Zeit vergehen, als der Muskel braucht, das Gewicht so hoch zu erheben, wie die Metalltheile nachgegeben haben. Wenn nun in der That auch der obere Befestigungspunkt des Muskels und das Goldplättchen auf dem Querbalken *MM* bei der Zuckung mit einer Ueberlastung von 240 gr. sich um 0,01 mm. näherten, so würde der Muskel unserer ersten Reihe, der mehr als 300 gr. heben konnte,

nach der gestellten Annahme 240 gr. mit der Ueberkraft von wenigstens 60 gr., also auf die Höhe von 0,01 mm. in 0,0028 Secunden erhoben haben, wie sich aus den bekannten Gesetzen des Falles berechnen lässt. Höchstens so gross hätte nach der gestellten Annahme die Dauer des zeitmessenden Stromes sein können; sie war aber in der That fast zehnmal grösser, nämlich 0,0273 Secunden. Für kleinere Ueberlastungen werden die Unterschiede noch bedeutender, so sind die beiden entsprechenden Zahlen in demselben Beispiel für 120 gr.: 0,0008 und 0,0187 Secunden. Daraus geht hervor, dass wir in der That berechtigt waren aus unseren Versuchen zu schliessen, die Energie des Muskels entwickle sich erst allmählig; es lässt sich aber auch nachweisen, dass die in unseren Messungen erhaltenen Zahlen durch die Nachgiebigkeit der Metalle nicht wesentlich gefälscht sind. Ich glaube die Annahme machen zu dürfen, dass im allgemeinen die Zeit, während welcher die Muskelkraft ansteigt, für die Metalltheile hinreichend gross sein wird, um allmählig in ihre der Zusammenziehung des Muskels entsprechende neue Gleichgewichtslage überzugehen, da so starke an beiden Enden eingeklemmte Stäbe bei Schallschwingungen, wo sie äusserst hohe Töne geben, in sehr viel kürzerer Zeit aus der Lage der stärksten Abweichung in die des Gleichgewichtes zurückkommen. Der Muskel wird sich dann im Moment des Abhebens ganz so verhalten, als wäre er um ebenso viel zu tief eingestellt, wie die Metalltheile nachgegeben haben. Der hieraus entstehende Fehler würde gegen die übrigen unvermeidlichen Unregelmässigkeiten der Einstellung nicht in Betracht kommen.

Wir haben bis jetzt nur den Einfluss der Nachgiebigkeit der metallischen Theile besprochen, durch die der thierischen könnten ähnliche Fehler entstehen. Die Ausdehnbarkeit der kurzen Sehnenstücke ist zu gering, um in Betracht zu kommen; wenigstens konnte ich bei den angewendeten Belastungen keine Ausdehnung des gespannten Theiles der Achillessehne um 0,01 mm. bemerken. Dagegen treten im Muskel selbst sichtbare Lagenveränderungen seiner Fasern ein, wenn seine Spannung wächst. Ist derselbe mit einer Belastung aufgehängt, so



können nicht sämtliche Fasern parallel und vertical verlaufen. Sie entspringen bekanntlich divergirend von der oberen in der Axe des Muskels verlaufenden Sehne, und steigen mehr oder weniger gekrümmt und mit den unteren Enden nach aussen gewendet zu der Achillessehne herab, von deren Ausbreitung das Muskelfleisch mantelartig umfasst wird.¹⁾ Die Form des Muskels wird sowohl durch die Spannung der Fasern ihrer Länge nach, als durch den Widerstand, den sie der Quere nach darbieten, bestimmt. Im natürlichen Zustande ist diejenige Seite desselben, welche dem fast geraden Unterschenkelknochen anliegt, ebenfalls fast gerade, die äussere Seite dagegen stark gekrümmt. Je grössere Gewichte man anhängt, und je mehr man dadurch die Längsspannung der Fasern vermehrt, desto mehr streben sich die gekrümmteren der äusseren Seite zu strecken, und drängen die Substanz des Muskels nach der inneren Seite hinüber. Dasselbe geschieht, wenn seine Spannung durch Reizung vermehrt wird unter Umständen, wo er seine Länge nicht verändern kann; die Zuckung giebt sich dann dadurch zu erkennen, dass sich sein Mittelstück ein wenig nach der inneren Seite hin verschiebt. Da diese Bewegung durch die vermehrte Längsspannung der Fasern verursacht wird, muss ihr Erfolg sein, dass sie die Summe sämtlicher Faserlängen, also auch die sämtlicher Spannungen verringert. Dadurch wird die Abhebung des Gewichtes ganz in derselben Weise verzögert, als wäre der Muskel um ein entsprechendes zu tief eingestellt worden. Um wieviel dieser Fehler die von uns gewonnenen Zahlen verändert hat, lässt sich schwer beurtheilen, bedeutend kann es deshalb nicht sein, weil die Verschiebungen des Muskels nach der Seite nur 310 wenige Zehntheile eines Millimeters betragen, und die dadurch bedingten Längenveränderungen der fast vertical verlaufenden Fasern nothwendig sehr viele Male kleiner sein müssen; daneben wird immer ein Theil der Fasern verlängert, wenn sich der andere verkürzt. Ausserdem fragt es sich noch, ob bis zu dem Moment, wo das Gewicht abgehoben wird, die vor-

1) Vergl. bei E. du Bois-Reymond die Abbildung des Längsschnittes eines Gastrocnemius des Frosches a. a. O. Bd. I. Taf. IV. Fig. 33.

handenen Kräfte die Zeit gehabt haben werden, den Muskel in die neue Gleichgewichtslage überzuführen. Der Sinn, in welchem unsere Zahlen abgeändert worden sein können, ist offenbar der, dass die längeren Zeiträume im Verhältniss zu den kürzeren etwas zu lang gefunden sind.

Ich will in Bezug auf den besprochenen Umstand nur noch bemerken, dass wir auch durch ihn keineswegs in die Irre geführt worden sind, als wir behaupteten, die Energie des Muskels steige allmählig an, wie es vielleicht scheinen könnte, wenn man bei der gebogenen Muskelfaser an einen schlaffen Faden denkt, der erst gestreckt werden muss, ehe er ein Gewicht in die Höhe ziehen kann. Die Fasern sind von Anfang an gespannt; ihre Spannung vergrössert sich nicht durch eine äussere Ursache wie die des Fadens, dem keine grössere Spannung mitgetheilt werden kann, ehe er nicht gestreckt ist, sondern durch innere Molecularwirkungen, und ist während der Beugung nothwendig grösser als während der Streckung, wenn die Endpunkte unverändert bleiben. Es muss also auch der ganze Muskel, wie ich schon vorher auseinandergesetzt habe, vor der Aenderung seiner Gestalt eine grössere Zugkraft ausüben als nachher, und deshalb Gewichte, die er nachher noch heben kann, vorher um so viel eher heben. Gesetzten Falles also die Energie des Muskels entwickle sich plötzlich, so würde durch die besprochene Verschiebung der Fasern die Erhebung des Gewichtes keinen Augenblick verzögert werden.

Wir kommen zu denjenigen Fehlern, welche dadurch entstanden sein könnten, dass die Aufhängungs- und Schwerpunkte der metallischen Zwischenstücke nicht ganz strenge in einer Verticallinie liegen. Wenn der Schwerpunkt eines dieser Stücke nicht in der Verbindungslinie seiner beiden Aufhängungspunkte liegt, so wird sich im allgemeinen weder diese Verbindungslinie noch die des oberen Aufhängungspunktes mit dem Schwerpunkte vertical richten, sondern die Verticale wird zwischen beide fallen, sich aber der ersteren desto mehr nähern, je mehr Gewichte am unteren Aufhängungspunkte hängen. Es würde also eines der oberen Zwischenstücke, welches einen solchen Fehler darböte, während es vom Muskel vertical nach oben gezogen wird, und die Summe der Belastung



und Ueberlastung zu tragen hat, eine andere Neigung gegen den Horizont annehmen müssen, als es vorher hatte, wo es nur durch eine der Belastung gleiche Kraft gespannt wurde. Neben der verticalen würden also seitliche Bewegungen eintreten, durch welche die Unterbrechung des zeitmessenden Stromes verzögert werden müsste. Namentlich ist in dieser Beziehung das stromführende Zwischenstück zu beachten, weil dasselbe zwei verschiedene obere Aufhängungspunkte hat, nämlich die Goldkuppe *m* und die obere Stahlspitze *g*, und weil es wegen seiner beträchtlicheren Masse auch die grösseren Fehler hervorbringen würde. Während demnach alle aufgehängten Zwischenstücke möglichst genau symmetrisch gearbeitet werden mussten, habe ich diesem Stücke noch ausserdem die beiden auf feststehenden Schrauben beweglichen Muttern *xx* gegeben, wodurch die kleinsten merklichen Abweichungen des Schwerpunktes von der Verbindungslinie der Aufhängungspunkte ausgeglichen werden konnten. Die Prüfung geschah auf folgende Weise: Ich liess zunächst das Stück auf seiner oberen Stahlspitze *g* ohne Belastung der unteren hängen; dabei stellt sich die Verbindungslinie der Spitze *g* mit dem Schwerpunkte vertical. Dann wurde ein Mikroskop mit Fadenkreuz auf die Spitze *i* eingestellt. Wenn ich dagegen an der unteren Stahlspitze *l* eine beträchtliche Belastung aufhing, musste sich die Verbindungslinie der beiden Stahlspitzen ³²¹nahehin vertical stellen. Lag der Schwerpunkt nicht auch in dieser Linie, so musste sich dabei die Spitze *i* verschieben. Es war keine solche Verschiebung sichtbar. Ebenso fand ich, dass der Schwerpunkt in der Verbindungslinie des Mittelpunktes der Goldkuppe *m* mit der unteren Stahlspitze lag. Eine Verschiebung des Stückes um 3 Winkelminuten hätte bemerkt werden müssen. Nehmen wir auch an, es fände wirklich bei den Zeitmessungen eine Verstellung von dieser Grösse statt, so können dadurch die Resultate derselben nicht merklich verändert sein. Um wie in den früheren Fällen diesen Einfluss auf einen entsprechenden Fehler der Gewichte zurückzuführen, habe ich nach den bekannten Regeln der Statik fester Körper den Druck berechnet, welcher bei der angenommenen Grösse der Asymmetrie in dem Augenblicke an der Unterbrechungs-

stelle stattfinden würde, wo die Spannung des Muskels der Summe der Belastung und Ueberlastung gleich geworden ist. Dieser Druck würde in dem bezeichneten Augenblicke natürlich Null sein müssen, wenn keine Asymmetrie stattfände. Da die Rechnung weitläufig ist und keine principiellen Schwierigkeiten darbietet, genüge es, hier ihr Resultat anzugeben. Es ergibt sich, dass der höchste Werth jenes Druckes einem sehr kleinen Bruchtheile eines Grammes gleich ist; der Einfluss der besprochenen Fehlerquelle verschwindet also gegen die unvermeidlichen Unregelmässigkeiten der Einstellung des Muskels.

Was schliesslich die Pendelschwankungen der aufgehängten Theile betrifft, welche uns bei dem am Ende von § 2 beschriebenen Controllversuche schwer zu beseitigende Störungen verursachten, so können sie die Erhebung des Gewichtes ebenso gut beschleunigen als verzögern, also die Beobachtungen unregelmässig machen, aber ihre Mittelwerthe nicht verändern. Dass ihr Einfluss bei der Muskelzuckung ein viel geringerer ist als in den genannten Controllversuchen, hauptsächlich wohl wegen der im Verhältniss zu den Massen grösseren Kräfte, ³²²ergibt sich aus der viel grösseren Regelmässigkeit der gefundenen Zahlen.

Stellen wir die besprochenen Fehlerquellen noch einmal nach der Art ihres Einflusses zusammen. Wir haben:

1) Fehler, welche die Resultate unregelmässig machen, ohne die Mittelwerthe derselben zu verändern. Dazu gehören in den mit Ueberlastung angestellten Versuchen die Unregelmässigkeiten der Einstellung und die Pendelschwankungen der aufgehängten Theile.

2) Fehler, welche die Resultate unregelmässig machen und dabei die Mittelwerthe entweder nur vergrössern, oder nur verkleinern. Zu ersteren gehören die der elastischen Nachwirkung, zu letzteren die der Stromleitung in der Unterbrechungsstelle. Beide afficiren sehr beträchtlich die Versuche ohne Ueberlastung, solche mit Ueberlastung wenig, und zwar alle um fast gleiche Grössen, nur die mit den grössten und mit den kleinsten Ueberlastungen etwas mehr. Wie man sich gegen den Einfluss der elastischen Nachwirkung schützen könne, ist angegeben worden; dass er bei gehöriger Sorgfalt unmerklich werde,



ergiebt sich aus der Vergleichung von je zwei untereinander stehenden mit ungeänderter Einstellung und Ueberlastung ausgeführten Versuchen der Reihe II No. 1 bis 12, wo er bewirken würde, dass die zweite Zahl jedesmal grösser sein müsste, als die erste. Das ist aber nicht der Fall.

3) Fehler, welche die bei höheren Ueberlastungen gewonnenen Zahlen mehr vergrössern als die bei niedrigeren, und sich nicht in Unregelmässigkeiten der Einzelresultate zu erkennen geben. Das sind die wegen mangelnder Festigkeit der metallischen Theile und die wegen der Formveränderung des Muskels. Dass ihr Einfluss von unbeträchtlicher Grösse sei, habe ich zu zeigen versucht.

Die Unregelmässigkeit von Beobachtungen pflegt man durch den wahrscheinlichen Fehler derselben zu messen, d. h. durch diejenige Grösse, welche die Abweichungen der einzelnen Beobachtungen vom Mittel bei einer hinreichend grossen Zahl derselben ebenso oft übertreffen, als nicht erreichen. Die bisher gegebenen Versuchsreihen sind dazu nicht ausgedehnt genug; weiter unten finden sich aber solche wie z. B. Reihe IX, X, XI, in denen auch der wahrscheinliche Fehler jeder einzelnen Beobachtung nach den Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung ermittelt und angegeben ist. Wir finden dort in Reihe X und XI A, wo nach je zwei Beobachtungen die Einstellung erneuert wurde, folgende Werthe dieser Grösse: 2,42, 1,61, 3,26, 3,10, 3,96, 1,84; Mittel: 2,70 in Scalentheilen; in Reihe XI B und IX, wo die Einstellung unverändert blieb, die durch sie bewirkten Unregelmässigkeiten also wegfielen: 2,23, 2,61, 1,31, 1,93; Mittel: 1,88. In der am besten gelungenen Reihe IX beträgt dieser Fehler in Secunden ausgedrückt 0,00030 und 0,00033, während die ganzen gemessenen Zeiträume eben daselbst 0,04394 und 0,04219 Secunden sind; eine Regelmässigkeit, wie sie nur irgend bei organischen Vorgängen zu erwarten ist.

§ 4.

Umstände, durch welche die Ansteigung der Energie verändert wird.

Wir haben bisher nur die Verhältnisse bei unveränderter ursprünglicher Belastung, bei möglichst unveränderter Reizbarkeit des Präparates und bei Anwendung kräftiger Reizmittel untersucht. Wenn der Muskel vor der Zuckung durch eine grössere Belastung gespannt und mit derselben im Apparate eingestellt ist, so hebt er nicht mehr ganz so grosse Ueberlastungen von der Unterlage ab; seine Spannung wird also nach der Reizung weniger vermehrt, als bei geringerer Belastung. Wird die Vermehrung der Spannung, wie wir es mit unseren bisherigen Versuchen gethan haben, durch eine Curve ausgedrückt, so liegt der Gipfel derselben demgemäss niedriger. Gleichzeitig ist die Höhe aller anderen Ordinaten entsprechend vermindert; es dauert daher länger, ehe die gleiche Ueberlastung gehoben wird, weil dazu ein späteres Stadium der gesteigerten Energie nöthig ist. Ich führe dies als Resultate meiner Untersuchung an, ohne ausführlicher darauf einzugehen, weil für das Folgende nichts Weiteres darüber nöthig ist.

Ganz ähnlich wird die Curve durch die Erschöpfung der Reizbarkeit verändert; es sinken alle Ordinaten derselben, und zwar so weit es sich aus den Versuchen beurtheilen lässt, ungefähr proportional ihrer Grösse. In den Versuchen äussert sich das Sinken der Reizbarkeit dadurch, dass nicht mehr ganz so grosse Ueberlastungen gehoben werden, und dass es mit denen, welche noch gehoben werden, später geschieht, und zwar um ein desto Bedeutenderes später, je grösser sie sind. In den obigen Versuchsreihen sind diese Verhältnisse aus den späteren Versuchen einer jeden Reihe zu ersehen. Um Zeitwerthe zu erhalten, welche verschiedenen Ueberlastungen und einem gleichen Grade der Ermüdung entsprechen, kann man dasselbe Verfahren gebrauchen, wie Ed. Weber es für die Erhebungshöhen verschiedener Be-



lastungen ausgeführt hat, nämlich das Mittel nehmen aus je zwei solchen Beobachtungen, welche gleichweit vor und hinter einem und demselben Zeitpunkte angestellt sind. So habe ich hier eine Tafel zusammengestellt aus den Beobachtungen der Versuchsreihe II; die obere Horizontalreihe enthält die Zeiträume für den unermüdeten Muskel aus No. 5 bis 12; die zweite die Mittelwerthe der Versuche 5 bis 18 dem Ermüdungsgrade von No. 11 und 12 entsprechend; die dritte dieselben von 11 bis 24, entsprechend der Ermüdung von 17 und 18. Leider lassen sich bei unseren jetzigen Versuchen ³²³ nicht so ausgedehnte Zahlenreihen für verschiedene Ermüdungsgrade herstellen, wie es Ed. Weber für die Erhebungshöhen konnte, weil jede einzelne Beobachtung eine längere Zeit wegnimmt.

No. der Versuche	Zeitdauer in $\frac{1}{100}$ Sekunden für die Ueberlastung			
	0 gr.	50 gr.	100 gr.	150 gr.
5—12	0,73	1,28	1,68	2,10
5—18	0,73	1,35	1,88	2,51
17—24	0,86	1,53	2,24	2,92

Die diesen drei Ermüdungsstufen entsprechenden Ansteigungscurven sind in Fig. 5 construiert; der Anblick derselben scheint zu lehren, was schon oben erwähnt ist, dass die Ordinaten der ganzen Curve sich ungefähr im Verhältnisse ihrer Grösse verringern.

Ganz ähnlich ist der Erfolg, wenn man die Intensität des erregenden Stromes so weit schwächt, dass die Energie des Muskels merklich vermindert wird. Beginnt man mit sehr schwachen Strömen zu reizen, und nimmt dann immer stärkere und stärkere, so überzeugt man sich, dass mit der Verstärkung der Schläge anfangs auch das Gewicht, welches der Muskel von der Unterlage abheben kann, und die Höhen, bis zu welchen er gleiche Gewichte erhebt, sich vergrössern, dass aber bald ein Maximum in beiden Beziehungen eintritt, über welches hinaus die Wirkung auch durch die heftigsten momentanen Schläge nicht mehr gesteigert werden kann. Wir haben bisher immer mit Schlägen gearbeitet, welche

hinreichend gross waren das Maximum der Reizung hervorzubringen. So lange sie diese Bedingung erfüllen, kann man ihre Intensität beliebig ändern, ohne dass dadurch die Ergebnisse der Zeitmessungen verändert würden. Wenn wir aber Schläge anwenden, welche das Maximum der Wirkung nicht erreichen lassen, so sinken die Ordinaten unserer Kräftecurve ganz in derselben Weise, als wenn sie durch grössere Belastung oder durch Ermüdung des Muskels vermindert worden wären. Es sind demgemäss die Ausschläge des Magneten ³²⁶ für gleiche Ueberlastungen desto grösser, je geringer die Intensität dieser Schläge ist.

Ich will statt der vielen einzelnen hierher gehörigen Erfahrungen, welche sich im Laufe meiner Messungen eingestellt haben, hier nur eine Reihe derselben anführen, die ich absichtlich zur Erörterung dieses Verhältnisses angestellt habe.

Reihe VII.

Angestellt mit einem Muskel, der schon zu anderen Versuchen gedient hatte. Ueberlastung 100 gr.; Reizung vom Nerven aus. In der zweiten Rubrik der folgenden Tafel ist die Entfernung der einander zugewendeten Flächen der inducirenden Spiralen in Centimetern angegeben. Je grösser diese Entfernung, desto schwächer sind die Ströme, und zwar nehmen diese in einem viel stärkeren Verhältnisse ab, als jene wächst. In der dritten Rubrik sind die Höhen angegeben, bis zu welchen der Muskel das Gewicht gehoben hat, um zu zeigen, wie diese Höhen abzunehmen anfangen, sobald die Zeitdauer oder die ihr proportionale Differenz der Ausschläge zunimmt. Wie die Höhen gemessen sind, wird im nächsten Paragraphen beschrieben werden. — Ablenkung durch den getheilten Strom: 115,7.



No.	Entfernung der Spiralen	Erhebungs- höhe	Differenz der Ausschläge
1	4	2,1	66,17
2	4	2,1	64,07
3	5	2,1	61,10
4	5	2,1	65,27
5	6	2,1	61,25
6	7	1,5	67,72
7	7	1,6	83,42
8	7	0,6	80,00
9	6,5	2,2	60,30
10	6,5	2,2	58,75
11	2	2,2	59,05
12	2	2,2	67,67

Bei Fortsetzung des Versuches nahmen die Ausschläge wegen eintretender Ermüdung schnell zu. Während die Spiralen von 6,5 Centimeter Entfernung auf 2 genähert wurden, veränderten sich, wie man sieht, weder die Erhebungshöhen noch die Differenzen der Ausschläge merklich; dagegen sinken die ersteren und steigen die letzteren bei 7 Centimeter Entfernung. Die Wirkung der schwachen Schläge ist bald grösser, bald kleiner, weil die von der Schnelligkeit der Unterbrechung des primären Stromes abhängigen elektrischen Processe sehr unregelmässig verlaufen. Diese Schnelligkeit variiert nämlich, weil sie theils von der Stärke, mit der der Schliessungsstab auf die Wippe aufgesetzt wird, theils von der Form der Metalle an der Unterbrechungsstelle der Wippe abhängt, und letztere sich bei jeder einzelnen Unterbrechung dadurch ändert, dass metallische Theilchen durch den Funken fortgeführt werden. Uebrigens sind die Ströme, welche das Maximum hervorzurufen genügen, so schwach, dass sie schwerlich durch ein anderes physikalisches Hilfsmittel, als eben durch ihre Wirkung auf den Nerven, zu entdecken sein würden.

Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Nervenreizung.

Wir haben bis jetzt die Muskeln durch elektrische Strömungen zur Zusammenziehung gebracht, welche durch ihre eigene Substanz hindurchgingen. Wir werden nun den Muskel vom Nerven aus erregen. Die Art, auf welche ich den erregenden Strom zum Nerven hingeleitet habe, ist oben beschrieben und in Fig. 2 dargestellt worden. Wenn man Messungen über die Zeit anstellt, welche zwischen der Reizung des Nerven und der Erhebung der Ueberlastung durch den Muskel vergeht, stellt sich heraus, dass sie von der Stelle des Nerven abhängig ist, auf welche man den elektrischen Schlag einwirken lässt, und zwar desto grösser, ein je grösseres Stück des Nerven sich zwischen der gereizten Stelle und dem Muskel befindet. Der Versuch kann, ohne die Glocke abzuheben, beliebig oft hintereinander angestellt werden, wenn man von den vier Leitungsdrähten zwei etwa 2 bis 3 Linien voneinander entfernt an den Nerven dicht bei seinem Eintritt in den Muskel anlegt, die zwei anderen dagegen ebenso weit voneinander entfernt an den Beckentheile des Nerven. Ich habe es vorthellhaft gefunden, diese zweite Stelle nicht ganz bis an das abgeschnittene Ende des Hüftgeflechtes hin zu verlegen, sondern nur ungefähr bis zu dem Orte, wo sich die Fäden dieses Geflechtes zum Stamme des Hüftnerven vereinigen, weil die äussersten abgeschnittenen Enden verhältnissmässig schnell leistungsunfähig werden. Je nachdem man nun das erste oder zweite Paar der Leitungsdrähte mit der inducirten Spirale in Verbindung setzt, wird die dem Muskel nähere oder entferntere Nervenstelle vom Strome getroffen. Vergleichende Messungen, welche übrigens wie die bisher besprochenen ausgeführt werden, ergeben, dass die Ausschläge des Magnetens durch den zeitmessenden Strom im Durchschnitt 5 bis 7 Scalentheile grösser sind, wenn man die entferntere Stelle des Nerven reizt, als wenn es mit der dem Muskel näheren geschieht.

Offenbar kann dieser Unterschied nicht bedingt sein durch irgend eine der früher besprochenen Fehlerquellen, welche in den mechanischen und elektrischen Vorgängen unserer Messungsmethode ihren Grund haben, weil alle diese die Versuche



mit Reizung der entfernteren und der näheren Nervenstelle ganz gleichmässig afficiren. Den Grund müssen vielmehr die Vorgänge innerhalb des Nerven selbst abgeben. So weit die bisherigen physiologischen Erfahrungen reichen, sind die Wirkungen auf den Muskel ganz die gleichen, welche Stelle des Nerven man auch reizen möge, höchstens findet man unter gewissen Bedingungen, dass Reizung der entfernteren Stelle schwächer wirkt als die der näheren, indem das Absterben der Muskelnerven nach der schon von Valli und Ritter ausgesprochenen Erfahrung vom centralen Ende anfängt und gegen den Muskel hin fortschreitet.¹⁾ Nach den Zeitmessungen, welche wir an ermüdeten Muskeln angestellt und in dem vorigen Abschnitt dargelegt haben, würde in der That die schwächere Reizung von der entfernteren Stelle des Nerven her den gleichen Grad der Energie des Muskels später zur Entwicklung bringen, als die stärkere von der näheren aus. Wir werden daher auf diesen Umstand besondere Aufmerksamkeit verwenden und uns versichern müssen, dass der Grad der Reizung von beiden Stellen her der gleiche sei. Wenn dies der Fall ist, werden die Versuche ergeben, dass, welche Stelle des Nerven man auch reizen möge, sich die entsprechenden Stadien der Energie einander in genau den gleichen Zeiträumen folgen, dass aber³³⁰ die Zwischenzeit zwischen einem jeden dieser Stadien und der Reizung um ein bestimmtes grösser ist, wenn die gereizte Stelle weiter vom Muskel entfernt ist. Wenn wir also das Steigen und Sinken der Energie für zwei verschiedene Nervenstellen durch eine Curve ausdrücken, so ist diejenige, welche der Reizung der entfernteren Stelle entspricht, der anderen congruent, aber zwischen ihrem Anfang und dem dem Moment der Reizung entsprechenden Punkte liegt ein grösseres Stück der Abscissenlinie. Aus der Art des zeitlichen Verlaufes, den uns die Wirkungen der Reizung im Muskel darbieten, können wir aber einen Rückschluss auf den Verlauf der entsprechenden meist noch unbekannten Vorgänge im Nerven machen. Es ist klar, dass die Wirkungen der Reizung in den Verzweigungen des Nerven innerhalb des Muskels ebenfalls nach Reizung der ent-

1) E. du Bois-Reymond, Unters. u. s. w. Bd. I. S. 321 ff.

ferteren Stelle zwar später eintreten, aber ganz ebenso verlaufen müssen, wie nach der näheren. Da nun Dauer und Stärke der erregenden elektrischen Strömung in beiden gereizten Stellen ganz die nämlichen sind, so kann die Verzögerung der Wirkung nur darauf beruhen, dass eine Zeit vergeht, ehe sich dieselbe von der entfernteren Stelle bis zum Muskel hin fortpflanzt. Wir sind also durch diese Versuche in den Stand gesetzt, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Reizung in den motorischen Nerven des Frosches zu ermitteln, wenn man dabei unter Reizung diejenigen Vorgänge im Nerven versteht, die sich in Folge einer erregenden äusseren Einwirkung in ihm entwickeln.

So lange die Physiologen die Nervenwirkungen auf die Verbreitung eines imponderablen oder psychischen Principes zurückführen zu müssen meinten, mochte es unglaublich erscheinen, dass die Geschwindigkeit dieses Stromes innerhalb der kurzen Entfernungen des thierischen Körpers messbar sein sollte. Gegenwärtig wissen wir aus den Untersuchungen über die elektromotorischen Eigenschaften der Nerven von du Bois-Reymond, dass diejenige Thätigkeit derselben, durch welche die Fortleitung einer Reizung vermittelt wird, mit einer veränderten Anordnung ihrer materiellen Molecüle mindestens eng verbunden, vielleicht sogar wesentlich durch sie bedingt ist.³³¹ Danach würde die Leitung im Nerven in die Reihe sich fortplanzender Molecularwirkungen der ponderablen Körper gehören, zu denen z. B. die Schalleitung in der Luft und in elastischen Stoffen oder das Abbrennen einer mit explodirender Mischung gefüllten Röhre zu rechnen ist. Bei dieser Sachlage kann es nicht mehr so überraschend sein, dass die Geschwindigkeit der Leitung nicht nur messbar, sondern wie sich ergeben wird, sogar sehr mässig ist. Uebrigens darf die Unmöglichkeit, bei den täglichen Sinneswahrnehmungen unseres eigenen Körpers oder bei physiologischen Versuchen über Muskelzuckungen einen hierher gehörigen Zeitunterschied wahrzunehmen, uns nicht befremden, da die Unterschiede, welche wir zwischen Empfindungen verschiedener Nervenfasern unserer Sinnesorgane mit Sicherheit beobachten können, nicht viel kleiner sind als eine Secunde. Ich erinnere nur daran, dass die geübtesten Astronomen in



der vergleichenden Beobachtung von Gesichts- und Gehörwahrnehmungen um eine ganze Secunde differiren.

Nach diesen Bemerkungen gehen wir zur thatsächlichen Beweisführung über. Zunächst stösst uns die schon berührte Schwierigkeit auf zu controlliren, dass die mechanische Wirkung der Reizung von der entfernteren Stelle des Nerven her mit der von der näheren gleich gross sei. Die Grösse der Spannung, welche sich nach der Reizung im Muskel entwickelt, würde unserem bisherigen Verfahren gemäss durch die höchste Ueberlastung zu messen sein, welche der Muskel von der Unterlage abheben kann. Indessen würden zu diesem Zwecke viele besondere Zuckungsversuche zwischen die zeitmessenden eingeschaltet werden müssen, wobei Kraft des Muskels und Zeit unnötig verloren ginge. Ein anderes Mittel bietet sich dar, welches bei jeder einzelnen Zuckung neben der Zeitmessung ³³² ausgeführt werden kann, nämlich die Messung der Höhe, bis zu welcher das angehängte Gewicht erhoben wird. Bei verminderter Reizbarkeit oder nach einer schwächeren Reizung, hebt nämlich, wie wir schon früher erwähnt haben, der Muskel im allgemeinen dasselbe Gewicht zu einer geringeren Höhe. Diese Art, die gleichbleibende Stärke der Reizung zu controlliren, hat sich als ausreichend erwiesen. Wenn wir in einer der folgenden Versuchsreihen solche Beobachtungen nacheinander durchsehen, bei denen dieselbe Nervenstelle gereizt wurde, so finden wir namentlich bei höheren Ueberlastungen sogar merkliches Abnehmen der Erhebungshöhen wegen allmählicher Ermüdung des Präparates, ohne dass sich die Resultate der Zeitmessungen merklich verändern. Nur bei krampfhaften andauernden Zusammenziehungen, wie sie in Reihe I beschrieben sind, lässt sich der Grad der Reizung nicht durch die Erhebungshöhen controlliren, dabei kann man aber überhaupt keine guten Versuche anstellen. Die Messung der Höhe wurde in folgender Weise ausgeführt. An der unteren Seite des Querbalkens *MM*, welcher das Goldplättchen trägt, wurde ein sehr leichtes zweiarmliges 72 mm langes Hebelchen von Holz mittels einer Nähnadel als Axe befestigt. Das eine Ende des Hebelchens lag auf der Spitze *i* des stromführenden Zwischenstückes auf, das andere trug eine feine Drahtspitze, deren verticale Erhebung durch ein kleines

Mikroskop bis auf $\frac{1}{20}$ mm gemessen werden konnte. Die Axe des Hebelchens lag mit leichter Reibung zwischen zwei Brettchen in entsprechenden Rinnen derselben. Der Grad der Reibung konnte durch das Anziehen oder Nachlassen von vulkanisirten Kautschukstreifen, welche die Brettchen aneinander hielten, verändert werden. Er musste gerade gross genug sein, um zu verhindern, dass das Hebelchen, wenn es angestossen wurde, vermöge seines Beharrungsvermögens sich weiter bewegte, als es unmittelbar durch die berührende Spitze verschoben war. Bei der grossen Leichtigkeit desselben konnte übrigens die Reibung so gering sein, dass sie der Kraft des Muskels keinen ³³³ merklichen Widerstand entgegensetzte. Wird das stromführende Zwischenstück mit den Gewichten durch den Muskel gehoben, so steigt gleichzeitig das die Spitze *i* berührende Ende des Hebelchens und bleibt in der Stellung stehen, in welche es durch die höchste Erhebung der Spitze *i* versetzt worden ist. Die Grösse der Verschiebung wird am anderen Ende beobachtet und gemessen. Letzteres geschah bei den nun folgenden Zuckungsversuchen durch einen Gehülfen, während ich selbst die Bewegung des Magneten behufs der Zeitmessung mit dem Fernrohr beobachtete.

Allerdings würde das angegebene Verfahren mancherlei Einwürfe erleiden können, wenn es sich darum handelte die absoluten Werthe der Erhebungshöhen zu erfahren; für unseren Zweck stören seine Mängel nicht, da sie jedenfalls die Versuche für beide Nervenstellen gleich beeinträchtigen.

Theils aus denjenigen Versuchsreihen, welche zum Zwecke der Zeitmessung angestellt wurden, theils aus anderen, in denen ich nur die Reizungsverhältnisse der beiden Nervenstellen untersuchte, ergab sich Folgendes. Im Anfang sind letztere beide gleich empfindlich, d. h. gleiche elektrische Strömungen bedingen von beiden aus gleich kräftige mechanische Wirkungen; es sind sowohl die Erhebungshöhen gleicher Gewichte, als die höchste zu hebende Ueberlastung gleich. Namentlich ist also auch diejenige Stromstärke für beide gleich, welche genügt, um das Maximum der Erregung hervorzubringen. Sobald eine grössere Anzahl von Reizversuchen angestellt worden ist, pflegt die dem centralen Ende des Nerven zunächst liegende Stelle unempfind-



licher zu werden, d. h. es werden kräftigere Ströme nötig, um das Maximum der Erregung herbeizuführen, aber die mechanischen Wirkungen der Reizung, sowohl die Erhebungshöhen beliebiger gleicher Gewichte, als auch die höchste zu hebende Ueberlastung sind für dieses Maximum der Erregung beider Stellen vollkommen gleich. Es ist also die mechanische Wirkung für gleiche erregende Ströme unter diesen Umständen gleich, wenn sie stark genug sind, das Maximum der Erregung auch in der entfernteren Nervenstelle zu bedingen, ungleich, wenn dies nicht der Fall ist. Je mehr die Reizbarkeit sinkt, desto grösser pflegt der Unterschied zwischen den Strömen zu werden, welche genügen, in der näheren das Maximum hervorzurufen, und denen, welche es in der ferneren thun. Nur bei den Präparaten sehr entkräfteter Thiere oder in den letzten Stadien der Erschöpfung der Nerven kommt es dahin, dass das Maximum der Erregung von der ferneren Stelle aus kleiner wird als das von der näheren, sodass man, um gleiche mechanische Wirkungen hervorzubringen, die letztere mit Strömen behandeln muss, welche das Maximum nicht erreichen lassen. Als ich im Winter meinen vorläufigen Bericht an die Akademien abschickte, hatte ich mit Thieren experimentirt, die durch viermonatliche Gefangenschaft und Hunger entkräftet waren, und damals war mir der zuletzt bezeichnete Fall häufiger vorgekommen, sodass ich die Vorschrift gab erforderlichenfalls auf beide Stellen ungleiche Ströme einwirken zu lassen. Ich habe mich seitdem an frisch gefangenen Fröschen überzeugt, dass man in der Regel nicht genöthigt ist, sich auf diese Weise zu behelfen, und dass man wohl thut, überhaupt nur mit solchen Präparaten zu experimentiren, bei denen die Maxima der Erregung von beiden Stellen her gleich sind, weil die Versuche mit Strömen, welche nicht das Maximum erreichen lassen, aus den schon früher angeführten Gründen viel unregelmässiger ausfallen, als diejenigen, in denen es eintritt. Wohl aber ist es zur Erhaltung der Reizbarkeit von Vortheil, auf jede der beiden Stellen keinen stärkeren Strom einwirken zu lassen, als für das Maximum der Reizung gerade nötig ist, welche Ströme nach dem oben Gesagten oft verschieden sind. Das ist in einigen der folgenden Versuchsreihen geschehen.

Dass die Nerven gegen gleiche, aber entgegengesetzt gerichtete Ströme ungleich empfindlich sind, ist bekannt. Auch dieser Unterschied beschränkt sich darauf, dass zur Erreichung des Maximums der Reizung verschieden starke Ströme nötig sind, übrigens sind die mechanischen Wirkungen vollkommen gleich, sobald nur die Maxima erreicht werden. Ich habe zweimal bei Präparaten, welche schon eine Zeitlang gearbeitet hatten, den Fall beobachtet, dass für die eine Stromesrichtung die entferntere Stelle des Nerven zur Erreichung des Maximums der Reizung einen schwächeren Strom erforderte, als die nähere, für die andere einen stärkeren, was vielleicht durch die vorausgegangenen Reizungen der näheren Stelle bedingt war. Den einen dieser Fälle habe ich zu einigen Zeitmessungen benutzt, welche unten angeführt werden sollen. Wir entnehmen daraus den augenscheinlichsten Beweis, dass die Verzögerung der mechanischen Wirkung von der entfernteren Stelle aus nicht durch die geringere Empfindlichkeit derselben bedingt ist; die letztere war ja hier für die angewendete Stromesrichtung im Gegentheil grösser. Den anderen Fall benutzte ich zu weiteren Versuchen über die Reizungsverhältnisse, und will ihn hier anführen.

Versuchsreihe VIII.

Der Wadenmuskel eines frisch gefangenen Frosches hatte im Anfang bei absteigender Stromesrichtung und 5,5 Centimeter Entfernung zwischen den inducirenden Spiralen das Maximum erreicht und als höchstes Gewicht 490 gr. gehoben, war dann zu einigen Zeitmessungsversuchen gebraucht worden, welche wegen schnell abnehmender Reizbarkeit kein genaues Resultat gaben.

Bei 300 gr. Belastung und Reizung durch absteigende Ströme trat das Maximum von der entfernteren Stelle aus bei einer Entfernung von 5 Ctm. ein, die Erhebungshöhe war 0,3 mm.; bei 6 Ctm. Entfernung hob der Muskel noch, aber so wenig, dass die Erhebung nicht mehr gemessen werden konnte. Darauf von der näheren Nervenstelle aus gereizt, erlangte der Muskel erst bei einer Annäherung der Spiralen auf 4 Ctm. das Maximum, bei 5 Ctm. hob er jetzt gar nicht mehr. Die Erhebungshöhe war gesunken auf 0,2 mm. Schliesslich ergab sich, dass von der entfernteren Stelle aus



auch jetzt noch bei 5 Ctm. Entfernung das Maximum eintrat, die Erhebungshöhe aber auf 0,15 mm. gesunken war. Darauf wurde untersucht, ob bei einer viel geringeren Belastung von 20 gr. die Verhältnisse ebenso seien. Das Maximum wurde erreicht bei Reizung von der entfernteren Stelle zwischen 5 und 6 Ctm. bei etwa 5,5 Entfernung, bei Reizung der näheren erst zwischen 4 und 5 Ctm. Jede Wirkung verschwand im ersten Falle bei 6,5, im zweiten bei 6 Ctm. Zwischen der letzteren Entfernung und derjenigen, wo das Maximum der Reizung erreicht wurde, nahm die Erhebungshöhe, die 2,25 bis 2,50 mm. betrug, allmählig zu.

Hierauf wurde untersucht, ob sich während dieser Versuche mit 20 gr. Belastung die Verhältnisse für hohe Belastungen nicht geändert hätten. Es wurden 200 gr. aufgelegt.

1) Bei absteigendem Strom Reizung von der entfernteren Nervenstelle.

Maximum der Wirkung bei 5,5.

Verswinden derselben bei 6,5.

2) Bei Reizung von der näheren Stelle.

Maximum der Wirkung bei 4,5.

Verswinden derselben bei 6,0.

3) Bei aufsteigendem Strom von der entfernteren Stelle wie vorher.

Maximum der Wirkung bei 5,5.

Verswinden derselben bei 6,5.

4) Dagegen von der näheren Stelle.

Maximum zwischen 5,5 und 6,0.

Verswinden bei 10,2.

Nach Beendigung dieser Versuche war das höchste zu hebende Gewicht für alle Combinationen 292 gr.

³³⁷ In diesem Falle war also die entferntere Nervenstelle gegen beide Stromesrichtungen gleich empfindlich, die nähere gegen den aufsteigenden Strom empfindlicher als jene, gegen den absteigenden unempfindlicher. Sonderbarerweise war in dem anderen, später noch anzuführenden Falle die nähere Nervenstelle gegen beide Richtungen gleich empfindlich, die entferntere für den absteigenden empfindlicher als jene, für den aufsteigenden unempfindlicher. Worauf dieser Unterschied beruhe, weiss ich nicht.

Ich lasse nun hier aus der grösseren Zahl meiner Versuchsreihen, welche alle dasselbe Resultat mit grösserer oder geringerer Genauigkeit gegeben haben, diejenigen folgen, welche wegen ihrer Ausdehnung oder wegen der Uebereinstimmung der einzelnen Beobachtungen am zuverlässigsten zu sein scheinen. Zur Reizung sind stets Ströme gebraucht worden, welche das Maximum der Erregung herbeiführten. Dass dies der Fall war, wird durch die gleichzeitig beobachteten Erhebungshöhen, welche in Millimetern angegeben sind, controllirt.

Die Reihen sind nach verschiedenem Plane angelegt. In einigen sind sämtliche Beobachtungen mit derselben oder nur zwei verschiedenen Ueberlastungen angestellt, um möglichst ausgedehnte Zahlenreihen zur Berechnung des Werthes desjenigen Zeitunterschiedes zu erhalten, auf welchen es hier ankommt. Für diese habe ich die Mittelwerthe der Zeitdauer zwischen Reizung und Wirkung des Muskels für beide Nervenstellen, deren Unterschied, welcher der Zeit der Fortpflanzung durch den Nerven entspricht, und ausserdem zur Beurtheilung der Genauigkeit die wahrscheinlichen Fehler aller dieser Grössen nach den Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung berechnet.¹⁾

Bei anderen Versuchsreihen sind die Ueberlastungen möglichst oft gewechselt, um nachzuweisen, dass die verschiedenen Stadien der Energie des Muskels gleichmässig verzögert ein-

¹⁾ Für diejenigen meiner Leser, welchen die Begriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung nicht geläufig sind, bemerke ich hier, dass z. B. die Angabe in der neunten Versuchsreihe, der Werth des Zeitunterschiedes wegen der Fortpflanzung sei 0,00175 Secunden mit dem wahrscheinlichen Fehler $\pm 0,00014$, nach einem populären Ausdrucke bezeichne, es sei 1 gegen 1 zu wetten, dass der wahre Werth dieser Differenz zwischen 0,00189 und 0,00161 Secunden liege. Es ist ferner 10 gegen 1 zu wetten, dass die Abweichung höchstens 2,5 mal, 100 gegen 1, dass sie höchstens 3,8 mal, 1000 gegen 1, dass sie 4,8 mal so gross sei als der wahrscheinliche Fehler. Der Werth liegt also mit der Wahrscheinlichkeit

1	gegen 1	zwischen 0,00189 und 0,00161
10	" 1	" 0,00210 " 0,00140
100	" 1	" 0,00228 " 0,00122
1000	" 1	" 0,00242 " 0,00108



treten, wenn man von der entfernteren Nervenstelle aus den Reiz wirken lässt, die Form der Ansteigung der Energie aber nicht geändert wird. Die wenigen Versuche, welche bei jeder Ueberlastung angestellt worden sind, können natürlich nicht so genaue Werthe der von der Nervenleitung herrührenden Unterschiede geben, als längere Reihen; deshalb sind die einzelnen Mittel der Differenz oft ziemlich abweichend voneinander. Doch sind ihre grösseren und kleineren Werthe ganz unregelmässig vertheilt, und die für verschiedene Ueberlastungen weichen nicht mehr voneinander ab, als die bei derselben Ueberlastung in wiederholter Beobachtung gefundenen. Daraus geht hervor, dass die Grösse der Differenz nicht merklich von der Grösse der Ueberlastung abhängt, wie dies so entschieden der Fall ist, wenn die Ausschläge des Magneten durch Abnahme der Reizung grösser werden.

Endlich ist noch nach jeder Versuchsreihe die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Reizung in den Nerven berechnet. Dazu muss man die Länge der durchlaufenen Nervenstrecke kennen, d. h. die Entfernung der dem Muskel zugewendeten Endpunkte der beiden gereizten Nervenstellen voneinander. Diese Länge ist leider wegen der grossen Dehnbarkeit des Nerven eine sehr unsichere. Ist der Nerv gar nicht gedehnt, so sind seine Fasern wellenförmig gebogen; um die Länge zu messen, habe ich ihn stets so weit gespannt, bis die queren atlasartigen Streifen seiner Oberfläche verschwanden, in der Voraussetzung, dass die Fasern dann ungefähr gerade verlaufen würden. Es bleiben dabei aber immer einige Millimeter dem Gutdünken überlassen. Uebrigens würde es auch noch nicht lohnen eine bessere Messungsmethode auszumitteln, da die Unsicherheiten der Zeitmessung verhältnissmässig viel grösser sind als die der Längenmessung. Es darf deshalb nicht befremden, wenn die gefundenen Werthe der Fortpflanzungsgeschwindigkeit noch ziemlich beträchtlich voneinander abweichen.

Reihe IX.

Am 6. Januar mit dem Muskel eines vier Monate aufbewahrten Frosches angestellt. Durch beide Stellen des Nerven wird der gleiche Strom geleitet, die Entfernung derselben ist 43 mm. Einstellung des Muskels ungeändert; Ablenkung vorher 121,24, nachher 118,61, im Mittel 119,97.

No.	Ueberlastung	Erhebungshöhe	Differenz der Ausschläge bei Reizung der	
			entfernteren	näheren
			Nervenstelle	
1	180	0,88	186,83	
2	—	0,87	189,71	
3	—	0,83		180,66
4	—	0,82		181,83
5	—	0,80	190,79	
6	—	0,80	189,99	
7	—	0,80		186,62
8	—	0,80		182,09
9	—	0,78	193,06	
10	—	0,78	193,94	
11	—	0,77	191,85	
12	—	0,72		186,38
13	—	0,70		182,43
14	—	0,70		184,20
15	—	0,68	192,80	
16	—	0,65	190,64	
17	—	0,65		186,27
18	—	0,65		181,87
19	—	0,65	190,89	
20	—	0,65	191,14	
21	—	0,65		181,58
22	—	0,65		183,96

340

Mittel	191,13	183,44
Wahrscheinlicher Fehler des Mittels	± 0,39	± 0,42
Derselbe der einzelnen Beobachtung	± 1,31	± 1,39
Zeitdauer zwischen Reizung und Erhebung des Gewichtes	0,04394	0,04219
Wahrscheinlicher Fehler derselben	± 0,00009	± 0,00010
Daraus bestimmt sich endlich		
der Zeitunterschied wegen der Fortpflanzung: 0,00175 ± 0,00014		
die Fortpflanzungsgeschwindigkeit: 24,6 ± 2,0 Meter in der Secunde.		



Am 29. December mit den Muskeln eines seit vier Monaten aufbewahrten Frosches angestellt. Durch die entferntere Nervenstelle wird ein stärkerer Strom geleitet, der durch die sich berührenden Spiralen erzeugt wird, durch die nähere ein schwächerer bei $2\frac{1}{2}$ Ctm. Abstand der Spiralen. Nach je zwei Beobachtungen wird der Muskel neu eingestellt.

A. Rechter Muskel. Nervenstrecke 40 mm. Ablenkung vorher 116,09, nachher 112,45, im Mittel 114,27.

No.	Ueber- lastung	Erhebungs- höhe	Differenz der Ausschläge bei Reizung der	
			entfernten	näheren
			Nervenstelle	
1	20 gr.	1,19	100,69	
2	—	1,22	96,15	
3	—	1,22		93,92
4	—	1,15		97,19
5	—	1,10	97,70	
6	—	1,10	104,33	
7	—	1,17		93,87
8	—	1,12		92,27
9	—	1,15	106,43	
10	—	1,15	101,74	
11	—	1,12		98,00
12	—	1,17		98,60
13	—	1,12	96,81	
14	—	1,10	103,99	
Mittel			100,98	95,64
Wahrscheinlicher Fehler des Mittels			$\pm 0,86$	$\pm 0,66$
Derselbe der einzelnen Beobachtung			$\pm 2,42$	$\pm 1,61$
Zeitdauer in Sekunden von der Reizung bis zur Erhebung			0,02437	0,02307
Wahrscheinlicher Fehler derselben			$\pm 0,00020$	$\pm 0,00016$
Zeitunterschied wegen der Fortpflanzung: 0,00130			$\pm 0,00027$	
Fortpflanzungsgeschwindigkeit: 30,8 $\pm$ 6,4 Meter.				

B. Linker Muskel. Nervenstrecke 40 mm. Ablenkung vorher 113,05, nachher 112,20, im Mittel 112,62.

No.	Ueber- lastung	Erhebungs- höhe	Differenz der Ausschläge bei Reizung der	
			entfernteren	näheren
			Nervenstelle	
15	100	0,65	128,14	
16	—	0,70	133,40	
17	—	0,72		132,06
18	—	0,70		118,19
19	—	0,68	125,75	
20	—	0,68	119,80	
21	—	0,70		119,84
22	—	0,68		120,71
23	—	0,68	127,77	
24	—	0,68	133,53	
25	—	0,68		130,35
26	—	0,70		123,21
27	—	0,70	136,89	
28	—	0,75	129,28	
29	—	0,72		123,58
30	—	0,77		125,29
Mittel			129,25	124,15
Wahrscheinlicher Fehler des Mittels			$\pm 1,15$	$\pm 1,09$
Derselbe der einzelnen Beobachtung			$\pm 3,258$	$\pm 3,007$
Zeitdauer zwischen Reizung und Erhebung des Gewichtes			0,03164	0,03039
Wahrscheinlicher Fehler derselben			$\pm 0,00027$	$\pm 0,00026$
Zeitunterschied wegen der Fortpflanzung: 0,00125			$\pm 0,00125$	$\pm 0,00038$
Fortpflanzungsgeschwindigkeit: 32,0			$\pm 9,7$ Meter.	

Reihe XI.

Am 4. Januar mit einem Muskel eines vier Monate aufbewahrten Frosches angestellt. Durch die entferntere Nervenstelle ein stärkerer Strom. Länge der Nervenstrecke: 33 43 mm.

A. Bei jedem Wechsel der Nervenstelle wird neu eingestellt. Ablenkung vorher 121,04, nachher 119,13, im Mittel 120,08.



No.	Ueber- lastung	Erhebungs- höhe	Differenz der Ausschläge bei Reizung der	
			entfernteren	näheren
			Nervenstelle	
1	100	1,83	116,89	
2	—	1,83	118,97	
3	—	1,88		105,82
4	—	1,81		108,63
5	—	1,78	109,37	
6	—	1,73	108,87	
7	—	1,80		103,34
8	—	1,77		102,45
9	—	1,80	107,02	
10	—	1,73	107,58	
11	—	1,70		109,17
12	—	1,68		106,24
13	—	1,68		106,79
14	—	1,66	114,98	
15	—	1,66	115,05	
16	—	1,66		110,26
17	—	1,66		109,02
18	—	1,62	101,44	
19	—	1,55	117,49	
20	—	1,62	121,07	
21	—	1,55		102,39
22	—	1,55		108,68
Mittel			112,61	106,62
Wahrscheinlicher Fehler des Mittels			± 1,19	± 0,55
Derselbe der einzelnen Beobachtung			± 3,96	± 1,84
Zeitdauer zwischen Reizung und Er- hebung des Gewichtes			0,02585	0,02448
Wahrscheinlicher Fehler derselben			± 0,00028	± 0,00013
Zeitunterschied wegen der Fortpflanzung: 0,00137			± 0,00031	
Fortpflanzungsgeschwindigkeit: 3,14 ± 7,1 Meter.				

³⁴⁴ B. Sogleich fortgefahren mit demselben Muskel, dessen Einstellung jetzt ungeändert blieb. Ablenkung vorher 119,13, nachher 119,92, im Mittel 119,52.

No.	Ueber- lastung	Erhebungs- höhe	Differenz der Ausschläge bei Reizung der	
			entfernteren	näheren
Nervenstelle				
23	20 gr.	2,53	70,77	
24	—	2,50	72,27	
25	—	2,52		70,27
26	—	2,50		69,47
27	—	2,43	75,11	
28	—	2,42	77,65	
29	—	2,38		62,68
30	—	2,37		74,71
31	—	2,33	74,01	
32	—	2,32	74,21	
33	—	2,20		71,91
34	—	2,17		75,30
35	—	2,22		70,57
36	—	2,17	79,59	
37	—	2,10	81,01	
Mittel			75,58	70,70
Wahrscheinlicher Fehler des Mittels			± 0,79	± 0,99
Derselbe der einzelnen Beobachtung			± 2,23	± 2,61
Zeitdauer zwischen Reizung und Er- hebung des Gewichtes			0,01743	0,01631
Wahrscheinlicher Fehler derselben			± 0,00019	± 0,00023
Zeitunterschied wegen der Fortpflanzung: 0,00112			± 0,00031	
Fortpflanzungsgeschwindigkeit: 38,4 ± 10,6 Mt.				

Für die Reihen IX bis XI habe ich es versäumt, die Temperatur des Zimmers zu bestimmen, weil ich erst später auf deren Einfluss aufmerksam wurde. Dieselbe hatte zu jener ³⁴⁴ Zeit zwischen 11 und 15° C. betragen, und war in den Tagen, wo IX ausgeführt wurde, niedriger gewesen als bei den beiden anderen; daher rührt möglicherweise der niedrigere Werth der Fortpflanzungsgeschwindigkeit in IX.

Reihe XII.

Angestellt am 20. Mai mit wechselnden Gewichten und gleichbleibender Intensität der Schläge. Temperatur des Zimmers 20° C. Länge der Nervenstrecke 38 mm. Ablenkung vorher 118,64, nachher 116,72, im Mittel 117,68.



No.	Erhebungs- höhe	Ueber- lastung	Differenz der Ausschläge bei Reizung der		Unterschied wegen der Fortpflanzung
			entfernteren	näheren Nervenstelle	
1	1,65	50	65,12		
2	1,70	—		59,77	65,38 — 61,12
3	1,75	—		62,47	= 4,26
4	1,70	—	65,65		
5	?	100		73,70	
6	1,45	—		75,10	
7	1,45	—	80,42		83,0 — 76,2
8	1,45	—	85,27		= 6,80
9	1,45	—		79,45	
10	1,50	—		76,57	
11	1,45	—	83,30		
12	1,75	70	77,10		
13	1,70	—		73,20	77,10 — 71,67
14	1,70	—		70,15	= 5,43
15	1,65	—	78,97		
16	1,65	—	75,22		
17	1,80	20	56,82		
18	1,85	—		51,75	56,81 — 50,60
19	?	—		49,45	= 6,21
20	2,05	—	56,81		
21	1,80	50		62,67	
22	1,80	—		64,95	
23	1,80	—	65,57		
24	1,80	—	82,02		
25	1,75	—	62,50		
26	1,75	—		64,41	68,93 — 63,73
27	1,75	—		62,10	= 5,20
28	1,75	—	69,27		
29	1,75	—	65,90		
30	1,75	—	70,57		
31	1,75	—	66,72		
32	1,70	—		64,52	

Mittel: 5,58.

Werth desselben in Sekunden: 0,00131

Fortpflanzungsgeschwindigkeit: 29,1 Meter.

Reihe XIII.

Angestellt mit dem Muskel eines frisch gefangenen Frosches den 24. Mai. Temperatur 20°. Nervenstrecke 43 mm, Intensität der Schläge ungeändert. Ablenkung vorher 113,28, nachher 113,34, im Mittel 113,31.

Die Versuche wurden mit 250 gr. Ueberlastung begonnen, indessen sank die Reizbarkeit des Muskels anfangs so schnell, dass er bald auch 150 gr. nicht mehr regelmässig genug hob; diese ersten Versuche sind nicht hergesetzt, weil die einzelnen Zahlen sich zu schnell veränderten, um ein Resultat zu geben. Von da an blieb der Zustand des Muskels gleichmässiger.

No.	Erhebungs- höhe	Ueber- lastung	Differenz der Ausschläge bei Reizung der		Unterschied wegen der Fortpflanzung
			entfernteren	näheren Nervenstelle	
1	1,35	50	69,75		
2	1,30	—		62,80	71,07 — 61,55
3	1,30	—		60,30	= 9,52
4	1,30	—	72,40		
5	1,70	20	60,75		
6	1,55	—	61,07		
7	1,65	—		51,10	58,60 — 51,87
8	1,65	—		52,65	= 6,73
9	1,65	—	55,67		
10	1,60	—	56,90		
11	0,80	100		89,45	
12	0,80	—		92,95	
13	0,80	—	95,25		96,12 — 90,14
14	0,80	—	97,00		= 5,98
15	0,80	—		89,65	
16	0,90	—		88,52	
17	1,35	50	72,75		
18	1,35	—		68,22	74,13 — 69,11
19	1,35	—		70,00	= 5,02
20	1,35	—	75,52		



No.	Erhebungs- höhe	Ueber- lastung	Differenz der Ausschläge bei Reizung der		Unterschied wegen der Fortpflanzung
			entfernteren	näheren Nervenstelle	
21	1,15	70	84,85		
22	1,15	—		82,12	
23	1,15	—		71,05	
24	1,15	—		71,15	84,25 — 74,94
25	1,15	—	82,60		= 9,31
26	1,10	—	85,30		
27	1,10	—		74,20	
28	1,10	—		76,20	
348 29	1,60	20	61,57		
30	1,65	—		51,65	
31	1,65	—		50,40	
32	1,65	—		53,12	57,58 — 51,88
33	1,65	—	53,25		= 5,70
34	1,62	—	58,87		
35	1,55	—	56,65		
36	1,60	—		52,37	

Mittel: 7,04

Werth desselben in Secunden: 0,00171

Fortpflanzungsgeschwindigkeit: 25,1 Meter.

Reihe XIV.

Angestellt am 25. Mai mit dem Muskel eines frisch gefangenen Frosches, mit gleichbleibenden elektrischen Schlägen. Temperatur 21° C. Nervenstrecke 38 mm. Ablenkung vorher 116,52, nachher 115,81, im Mittel 116,16. Die einzelnen Zahlen sind in dieser Reihe weniger regelmässig als in den beiden vorhergehenden; ich habe sie aber hergesetzt, weil sie von allen ähnlichen die grösste Ausdehnung hat.

No.	Erhebungs- höhe	Ueber- lastung	Differenz der Ausschläge bei Reizung der		Unterschied wegen der Fortpflanzung
			entfernteren	näheren Nervenstelle	
1	2,55	200	65,10		
2	2,50	—		62,27	67,23 — 61,84
3	2,55	—		61,42	= 5,39
4	2,40	—	70,77		
5	2,35	—	65,82		
6	2,40	150	64,52		
7	2,40	—		61,20	
8	2,25	—		59,60	
9	2,05	—	59,77		
10	2,00	—	78,17		69,74 — 62,02
11	1,95	—	62,65		= 7,72
12	1,85	—		61,67	
13	1,80	—		65,60	
14	1,80	—	83,57		
15	2,00	100	61,62		
16	2,05	—		57,50	62,26 — 56,56
17	2,05	—		55,62	= 5,70
18	2,05	—	62,90		
19	2,20	75	51,45		
20	2,30	—		48,70	52,05 — 48,60
21	2,30	—		48,50	= 3,45
22	2,30	—	52,65		
23	2,35	50	50,97		
24	2,35	—		49,60	
25	2,35	—		39,72	52,34 — 43,27
26	2,35	—		40,50	= 9,07
27	2,35	—	50,47		
28	2,35	—	55,57		
29	2,55	25	43,80		
30	2,55	—		42,47	44,31 — 39,58
31	2,60	—		37,45	= 4,73
32	2,55	—		38,82	
33	2,55	—	44,82		
34	2,30	50		50,12	
35	2,30	—	51,15		
36	2,30	—	50,92		51,04 — 47,46
37	2,30	—		44,20	= 3,58
38	2,30	—		45,52	
39	2,30	—		50,00	



No.	Erhebungshöhe	Ueberlastung	Differenz der Ausschläge bei Reizung der		Unterschied wegen der Fortpflanzung
			entfernteren	näheren	
			Nervenstelle		
40	2,00	75		52,47	
41	1,95	—	57,30		
42	1,95	—	64,42		
43	?	—	52,25		65,94 — 57,97
44	1,90	—		57,57	= 7,97
45	1,80	—		61,42	
46	1,75	—	89,32		
47	1,75	—	66,40		
48	1,75	—		60,40	

Mittel: 5,95

Werth desselben in Secunden: 0,00141

Fortpflanzungsgeschwindigkeit: 26,9 Meter.

Reihe XV.

Angestellt mit dem Muskel, welcher vorher zur Versuchsreihe VII gedient hatte. An demselben zeigte sich die entferntere Nervenstelle nachher empfindlicher gegen den absteigenden Strom als die nähere. Es trat nämlich das Maximum der Reizung bei der genannten Stromesrichtung für die erstere bei 7 Ctm. Entfernung der Spiralen, für die letztere bei 6 Ctm. ein. Bei der entgegengesetzten Stromesrichtung dagegen für die erstere bei 5 Ctm., während es für die letztere unverändert blieb. Es wurden die folgenden vier Versuche angestellt mit absteigenden Strömen.

No.	Erhebungshöhe	Ueberlastung	Differenz der Ausschläge bei Reizung der	
			entfernteren	näheren
Nervenstelle				
1	1,03	100		66,72
2	1,05	—	70,70	
3	1,00	—		67,40
4	0,95	—	70,62	
Mittel			70,66	67,06
Differenz			3,6	

Nach Vollendung dieser vier Versuche war die Empfindlichkeit beider Stellen für absteigende Ströme gleich geworden. Die Versuche sind hier angeführt, um zu zeigen, dass auch bei grösserer Empfindlichkeit der entfernteren Nervenstelle die Reizung derselben später die Muskelwirkung herbeiführe als die der näheren.

Die für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit zwischen 11 und 21° C. gefundenen Werthe sind demnach

a) aus Reihe IX, X und XI:

24,6 ± 2,0

30,8 ± 6,4

32,0 ± 9,7

31,4 ± 7,1

38,4 ± 10,6

Aus diesen findet sich nach der Methode der kleinsten Quadrate als wahrscheinlichster Mittelwerth: 26,4.

b) aus Reihe XII, XIII und XIV:

29,1

25,1

26,9

Mittel: 27,0.

Um den Beweis noch zu vervollständigen, dass der zeitliche Verlauf der Zuckung bei Reizung beider Nervenstellen ganz derselbe sei, müssten die Messungen auch auf den absteigenden Theil der Curve der Energie ausgedehnt werden. Das lässt sich mittels des bis jetzt gebrauchten Apparates direct nicht ausführen, wohl aber indirect. Wir können nämlich bei einer leichten Abänderung der Stromleitungen diejenige Zeitdauer messen, während welcher das Gewicht vom zuckenden Muskel erhoben, somit die Goldkuppe *m* von dem Plättchen *n* getrennt ist. Der Augenblick, in welchem sich die letzteren Theile wieder berühren, wird im allgemeinen nicht genau derselbe sein, in welchem die elastische Spannung des Muskels wieder gleich der Summe der Belastung und Ueberlastung geworden ist, weil nach dem früher Gesagten die Erhebungshöhen nicht nothwendig den Höhen des Gleichgewichtes entsprechen; es wird also auch die Zeitdauer, welche wir messen können, nämlich die, während welcher die Metalltheile der Unterbrechungsstelle getrennt sind, nicht diejenige



sein, um welche es sich eigentlich in unserer Beweisführung handelt, nämlich die Zwischenzeit derjenigen beiden Zeitpunkte, in welchem einmal die steigende, dann die sinkende Muskelspannung den durch die Gewichte gemessenen Werth hat. Es ist indessen klar: wenn die Werthe der letzteren für beide Nervenstellen bei allen Graden der Muskelspannung gleich, also die beiden Spannungscurven sowohl in ihrem aufsteigenden wie absteigenden Theile congruent sind, müssen auch die Unterbrechungszeiten des Stromes für alle Ueberlastungen und alle Ermüdungsgrade gleich sein; wenn jenes aber nicht der Fall ist, kann auch das Letztere im allgemeinen nicht der Fall sein. Wir sind deshalb berechtigt bei unseren Versuchen rückwärts zu schliessen: wenn wir die Unterbrechungszeiten des Stromes bei verschiedenen Ueberlastungen und Ermüdungszuständen gleich finden, so müssen auch die beiden Spannungscurven vollständig congruent, und die einzelnen Punkte in dem absteigenden Theile der Curve der entfernteren Nervenstelle um ebenso viel verzögert sein, als die ihres aufsteigenden Theiles. So kann also unser Beweis für die gleichmässige Verzögerung sämtlicher Stadien der Energie bei Reizung von der fernerer Nervenstelle vervollständigt werden.

Die Messungen sind folgendermaassen ausgeführt worden. Es werden die Enden der Leitung des Multiplicators und ebenso die Pole der Batterie mit dem Goldplättchen *n* und dem Quecksilbernäpfchen *o* in leitende Verbindung gesetzt. So lange das stromführende Zwischenstück beide verbindet, geht der ganze Strom durch dasselbe hin, und nur ein kaum merklicher Theil desselben durchkreist das Galvanometer, weil dieses einen ungeheuer grossen Leitungswiderstand im Vergleich zu jenem Stücke hat. Während aber die Goldkuppe *m* von *n* getrennt ist, muss der ganze Strom durch das Galvanometer gehen, und wirkt gerade so lange auf den Magnet, als die Trennung dauert. Die Ausschläge des Magneten messen also die Dauer der Trennung. Die Reizung der beiden Nervenstellen geschah ganz auf dieselbe Weise und mit denselben Vorsichtsmaassregeln wie sonst.

Versuchsreihe XVI.

Muskel eines vier Wochen gefangenen Frosches, gleiche Stromstärke in beiden Nervenstellen. Einstellung nicht geändert.

A. Ueberlastung 200 gr. Ablenkung vorher 114,11, nachher 112,82.

No.	Ueberlastung	Erhebungshöhe	Differenz der Ausschläge bei Reizung der	
			entfernten	näheren
Nervenstelle				
1	200	1,05	369,39	
2	—	1,02	354,46	
3	—	1,00		345,94
4	—	1,00		344,35
5	—	1,00	344,40	
6	—	1,00	329,24	
7	—	0,95		340,21
8	—	0,95		328,09
9	—	0,95	324,72	
10	—	0,90	317,33	
11	—	0,85		313,44
12	—	0,80		308,00
13	—	0,75	299,04	
14	—	0,70	295,17	
15	—	0,65		290,41
16	—	0,65		284,52
17	—	0,60	281,17	
18	—	0,55	278,91	
Mittel:			319,38	319,37

354

B. Ueberlastung 100. Ablenkung vorher 112,82, nachher 112,99.

No.	Ueberlastung	Erhebungshöhe	Differenz der Ausschläge bei Reizung der	
			entfernteren	näheren
			Nervenstelle	
19	100	1,30		464,59
20	—	1,35		452,62



No.	Ueber- lastung	Erhebungs- höhe	Differenz der Ausschläge bei Reizung der	
			entfernteren	näheren
			Nervenstelle	
21	100	?	438,37	
22	—	1,35	431,00	
23	—	1,35		419,97
24	—	1,35		417,50
25	—	1,35	406,27	
26	—	1,30	415,63	
27	—	1,25		399,44
28	—	1,20		385,97
29	—	1,10	375,55	
30	—	1,05	373,04	
31	—	1,00		366,07
32	—	0,90		358,43
Mittel:			406,64	408,07

Versuchsreihe XVII.

Muskel eines 4 Wochen aufbewahrten Frosches. Gleiche Stromstärke in beiden Nervenstellen. Einstellung während des Versuches nicht geändert; Ablenkung vorher 114,87, nachher unverändert 114,87.

No.	Ueber- lastung	Erhebungs- höhe	Differenz der Ausschläge bei Reizung der	
			entfernteren	näheren
			Nervenstelle	
1	100	0,50	371,44	
2	—	0,55		375,13
3	—	0,55	370,98	
4	—	0,50		366,53
5	—	0,45	362,24	
6	—	0,45		356,15
7	—	0,45	353,26	
8	—	0,45		348,04
9	—	0,50	348,94	
10	—	0,47		340,33

No.	Ueber- lastung	Erhebungs- höhe	Differenz der Ausschläge bei Reizung der	
			entfernteren	näheren
Nervenstelle				
11	100	0,45	335,92	
12	—	0,45		336,04
13	—	0,45	326,13	
Mittel:			352,70	353,70

In allen diesen Reihen nehmen die Ausschläge mit der zunehmenden Ermüdung des Präparates sehr merklich ab. Die arithmetischen Mittel der gefundenen Zahlen dürfen wir nur dann als die demselben mittleren Ermüdungszustande des Muskels zukommenden Werthe der zu messenden Grösse betrachten, wenn sich die Ausschläge während der Dauer der Beobachtungen in gleichen Zeitabschnitten nahehin um gleiche Differenzen vermindert haben. Dass dies der Fall sei, werden wir daraus erkennen, dass die Mittel aus allen beliebigen Combinationen gleich weit von den mittelsten in der Reihenfolge abstehender Zahlen gleich sind, oder wenigstens regellose Unterschiede zeigen; ist es nicht der Fall, so werden die der weiter abstehenden Zahlen regelmässig entweder alle grösser oder alle kleiner sein müssen als die der weniger abstehenden. Die obige Forderung trifft bei den angeführten Versuchsreihen zu; bei einer anderen nicht mit abgedruckten traf sie nicht zu; dieselbe war deshalb für unseren Zweck nicht zu gebrauchen. Um die Erfüllung der bezeichneten Bedingung nachzuweisen und zugleich zu zeigen, dass die Unterschiede, welche zwischen den Mittelwerthen für Reizung verschiedener Nervenstellen vorkommen, kleiner sind als diejenigen für Reizung derselben Stelle, habe ich folgende Zusammenstellung berechnet.



Mittelwerthe der Differenzen der Ausschläge.

1) für die Reihe XVI A.

No. der Versuche	Von der entfernteren Nervenstelle	No. der Versuche	Von der näheren Nervenstelle
1 bis 18	319,38	3 bis 16	319,37
2 — 17	315,69	4 — 15	320,75
5 — 14	318,31	7 — 12	322,43
6 — 13	317,58	8 — 11	320,76
9 und 10	321,01		
Mittel:	318,39		320,76

2) für die Reihe XVI B.

21 bis 30	406,64	19 bis 32	408,07
22 — 29	407,11	20 — 31	406,92
25 und 26	410,95	23 — 28	405,71
		24 — 27	408,45
Mittel:	407,29		406,17

3) für die Reihe XVII.

1 bis 13	352,70	2 bis 12	353,70
3 — 11	354,27	4 — 10	352,76
5 — 9	354,61	6 und 8	352,09
7	353,26		
Mittel:	353,71		352,65

Da uns die hier gebildeten Versuchscombinationen schliesslich Mittel mit gerade entgegengesetzt liegenden Differenzen geben als die aus der einfachen Addition aller Beobachtungen vorher gefundenen, dürfen wir wohl schliessen, dass die kleinen Differenzen der letzteren, deren höchste in XVI B nur 1,43 Scalentheile, also etwa $\frac{1}{300}$ der gemessenen Grösse beträgt, zufällige seien. Es sind also die gemessenen Zeiträume für beide Nervenstellen innerhalb der Grenzen der zu erreichenden Genauigkeit gleich, daraus folgt nach dem oben Gesagten, dass die einzelnen Stadien der sinkenden Energie durch die Fortpflanzung im Nerven um ebenso viel verspätet werden, wie wir es für die der steigenden Energie nachgewiesen haben.

Ich bemerke schliesslich noch, dass die zu unseren vorläufigen Versuchen gebrauchte Methode, die zeitlichen Vorgänge aufzuzeichnen, welche für die Untersuchung der Muskelzuckung nicht brauchbar war, wahrscheinlich zu einer bequemen und schnelleren Darlegung unserer Resultate über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in den Nerven wird dienen können als die bisher befolgte. Man braucht den Mechanismus nur so anzuordnen, dass sich zwei der Reizung verschiedener Nervenstellen entsprechende Erhebungscurven vollständig decken müssten, wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit eine unendlich grosse wäre. Da das Letztere nicht der Fall ist, werden sie in der That auseinanderfallen, und der Unterschied der Abscissen von je zwei entsprechenden Punkten derselben wird der Fortpflanzungszeit entsprechen. Wenn es meine Mittel erlauben, behalte ich mir vor den Versuch in dieser Weise auszuführen.

§ 3.

Veränderung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit in den Nerven durch die Temperatur.

Ich habe in meiner vorläufigen Mittheilung angegeben, dass ich für den Zeitunterschied, der der Nervenleitung entspricht, an kälteren Tagen grössere Zahlenwerthe erhalten habe, und schloss daraus, dass wahrscheinlich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit mit der Temperatur abnehme. Das hat sich in sehr auffälliger Weise bestätigt bei einigen Versuchen, wobei ich die Nerven auf Eis legte. Das Resultat derselben wird aber durch eine andere höchst auffallende Erscheinung complicirt, für welche ich noch keine Erklärung zu geben weiss. Wird nämlich ein Theil des Nerven auf Eis gelegt, so wird die Zeitdauer zwischen der Reizung und der mechanischen Wirkung des Muskels sehr beträchtlich erhöht, zuweilen auf das zehnfache und zwar sonderbarerweise nicht bloss dann, wenn die Reizung sich durch die erkältete Stelle des Nerven hindurch fortpflanzen muss, sondern auch, wenn der Nerv zwischen dem Eis und dem Muskel oder der Muskel



selbst von dem elektrischen Strom getroffen wird. Dabei ist an eine unmittelbare Einwirkung der Kälte auf den Muskel nicht zu denken, weil die Wirkung aufhört, wenn man das Eis an seinem Platze lässt, den Nerven aber vom Muskel trennt.

Ich führe zunächst als Beleg hier eine Versuchsreihe an, bei welcher die elektrischen Schläge durch den Muskel selbst gingen.

Reihe XVIII.

A. Ablenkung vorher 113,67. Der Nerv liegt noch nicht auf dem Eise.

No.	Ueberlastung	Differenz der Ausschläge
1	50	99,52
2	—	100,50
3	20	68,20
4	—	68,95
5	50	99,85
6	—	98,85

B. Der Nerv wird auf Eis gelegt. Das Eis ist in einem kleinen Glühtiegelchen von Porzellan enthalten, welches mit Wasser gefüllt im Freien gestanden hatte, bis das Wasser gefroren war. Zwischen Nerv und Eis legte ich ein Streifen Froschhaut, um die Reizbarkeit des Nerven nicht durch das sich bildende Wasser zu beeinträchtigen.

No.	Ueberlastung	Differenz der Ausschläge
7	50	143,37
8	—	155,55
9	20	96,85
10	—	98,95
11	50	155,17
12	—	156,35

Nun wurde der Nerv durchschnitten, während das Tiegelchen mit Eis stehen blieb.

No.	Ueberlastung	Differenz der Ausschläge
13	50	110,77
14	—	111,65
15	20	67,17
16	—	67,70
17	50	100,20
18	—	94,10

Ich lasse hier die Versuchsreihen folgen, welche ich über die Fortpflanzung der Reizung in erkalteten Nerven angestellt habe.

Reihe XIX.

Der Nerv lag von Anfang an auf Eis, von diesem durch ein mit Kautschuk gefirnissstes Stanniolblättchen getrennt, und wurde deshalb stärker erkältet als in der vorhergehenden Reihe; das Eis war zu Ende des Versuches noch nicht ganz geschmolzen. Ablenkung 123,13. Ueberlastung 50 gr. Da die Ausschläge fortdauernd steigen, sind die der Fortpflanzungszeit entsprechenden Unterschiede aus dem Mittelwerthe von denjenigen Ziffern berechnet worden, welche hintereinander bei Reizung der einen Nervenstelle gefunden wurden, und aus dem Mittel von 2 nächst vorhergehenden und 2 nächstfolgenden, auf die andere Stelle bezüglichen.

No.	Erhebungs- höhe	Ueberlastung	Differenz der Ausschläge bei Reizung der		Mittel für Reizung der		Differenz wegen der Leitung
			entfernteren	näheren Nervenstelle	entfernteren	näheren Nervenstelle	
1	1,25	50	235,63				
2	1,35	—	238,15				
3	1,30	—		238,97	255,84	248,40	7,44
4	1,20	—		257,84			



No.	Er- hebungs- höhe	Ueber- lastung	Differenz der Ausschläge bei Reizung der		Mittel für Reizung der		Differenz wegen der Leitung
			entfernteren	näheren	entfernteren	näheren	
5	1,15	50	262,50				
6	1,05	—	287,08		279,93	268,27	11,66
7	1,15	—	290,21				
8	1,10	—		290,23			
9	1,05	—		286,05	303,15	288,14	15,01
10	1,00	—	314,95		317,66	300,81	16,85
11	0,90	—	320,38				
12	0,90	—		309,31	339,52	313,47	26,05
13	0,85	—		317,64			
14	0,85	—	354,67		361,37	332,20	29,17
15	0,85	—	368,08				
16	0,80	—		350,05	406,36	350,93	55,43
17	0,80	—		351,81			
18	0,70	—	412,72		451,34	375,24	76,10
19	0,70	—	489,97				
20	0,70	—		391,26			
21	0,65	—		397,84			

Es steigt also die Zeit, welche für die Leitung des Reizes im Nerven nöthig ist, in diesem Beispiel auf das Zehnfache, die Versuchsreihe musste abgebrochen werden, weil die Ausschläge zu gross wurden, um noch auf der Scala beobachtet zu werden. Zugleich ergibt sich, dass die Intensität der Reizung nicht verringert wird, wenn dieselbe sich ³⁶² durch die erkaltete Stelle fortpflanzt, denn die Erhebungshöhen bleiben unverändert, welche Stelle des Nerven auch erregt werden mag.

Ich konnte keine so ausgedehnte Versuchsreihe in diesem Winter mehr gewinnen, weil die Temperatur der Luft höher wurde, und die kleinen Eismassen, welche ich wegen der Dimensionen meines Apparates allein anwenden konnte, schnell hinwegschmolzen. Ich will aus einer der anderen Reihen nur noch die folgenden Versuche anführen, aus welchen hervorzugehen scheint, dass die Verzögerung wegen der Nervenleitung bei hohen und niedrigen Ueberlastungen gleich ist.

Reihe XX.

Der Nerv lag auf Eis, von ihm getrennt durch Froschhaut. Ablenkung 123,2.

No.	Erhebungshöhe	Ueberlastung	Differenz der Ausschläge bei Reizung der	
			entfernteren	näheren
			Nervenstelle	
1	1,40	20	115,47	116,57
2	1,35	—		
3	1,35	—	124,89	
4	0,40	100	217,89	210,06
5	0,45	—		
6	0,40	—	225,40	
7	1,30	20	116,19	101,97
8	1,25	—		
9	1,25	—	124,89	
10	0,25	100	228,96	202,55
11	0,30	—		
12	0,25	—	221,70	

Aus den Versuchen 4 bis 6 findet sich für 100 gr ³⁶³ Ueberlastung die Differenz wegen der Fortleitung = 11,58 als Mittel, aus den Versuchen 1, 2, 3, 7, 8, 9 dieselbe für 20 gr Ueberlastung = 11,09. Auf dieselbe Weise findet sich aus 7, 8, 9 für 20 gr dieser Werth = 18,57 und derselbe aus 4, 5, 6, 10, 11, 12 für 100 gr = 17,18. Diese Werthe entsprechen sich hinreichend gut.

Ich stelle schliesslich die Resultate der vorliegenden Untersuchungen noch einmal zusammen:

1) Wenn ein animalischer Muskel oder sein Nerv durch einen momentanen elektrischen Schlag gereizt wird, vergeht erst eine kurze Zeit, während welcher die elastische Span-



nung desselben sich nicht merklich ändert, dann steigt sie allmählig zu einem Maximum, um ebenso allmählig wieder zu sinken. Die Zusammenziehung des animalischen Muskels unterscheidet sich also von der, welche in organischen, nicht rhythmisch wirkenden Muskeln nach verhältnissmässig kurzer Reizung eintritt, nur dadurch, dass ihre einzelnen Stadien viel schneller vorübergehen.

2) Wenn zwei verschiedene Stellen eines motorischen Nerven von einem momentanen Reiz getroffen werden, und die Grösse der Reizung für beide gleich ist, so ist es auch der zeitliche Verlauf der darauf erfolgenden Muskelzuckung, nur treten sämtliche Stadien derselben um ein Gleiches später ein, wenn der Reiz die entferntere Stelle des Nerven getroffen hat. Wir schliessen daraus, dass die Fortpflanzung der Reizung durch den Nerven bis zum Muskel hin, einer messbaren Zeit bedürfe.

3) Wenn eine Stelle des Nerven stark abgekühlt wird, ist die Dauer sämtlicher Stadien der Muskelzuckung eine viel grössere, selbst dann, wenn die Reizung gar nicht durch die erkältete Stelle hindurch zu dringen braucht. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Reizung in der erkalteten Stelle ist beträchtlich vermindert.

Die Art der Fortpflanzung der Reizung ist noch folgendermaassen näher zu bestimmen. Wir wissen nicht, ob die Veränderungen im Zustande des motorischen Nerven, welche sich durch Einwirkung eines Reizes einstellen es augenblicklich thun, und auch ebenso schnell wieder verschwinden wie der erregende Vorgang, oder ob sie sich, wie wir es von denen des Muskels wissen, erst allmählig einstellen, und später als der Reiz verschwinden. Das Letztere dürfte vielleicht wahrscheinlicher sein, nach Analogie des Verweilens der Eindrücke in den Sinnesnerven. Wenn dies der Fall ist, so folgt aus unserem Nachweis über den bis auf die Verzögerung wegen der Fortpflanzung unveränderten Verlauf der Muskelzuckung bei Reizung der entfernteren Nervenstelle, dass auch der zeitliche Verlauf der Reizungserscheinungen in jeder einzelnen Nervenstelle, gleichviel ob nah oder fern von der gereizten Stelle, derselbe sein muss, dass also die Er-

regung der primär erregten Stelle wie eine Welle von unveränderter Form durch den Nerven hin bis zum Muskel abläuft. Ist die Dauer der Vorgänge in jeder einzelnen Nervenstelle aber verschwindend klein gegen die im Muskel, so dürfen wir einen solchen Schluss nicht machen; es könnte sich dann bei der Fortleitung die relative Dauer der einzelnen Stadien der Welle verändern, wenn nur die des ganzen Vorganges gegen die Dauer der Muskelzuckung verschwindend klein bleibt.



LXXXVI.

Messungen über Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Reizung in den Nerven. Zweite Reihe.

Aus Joh. Müller's Archiv für Anatomie und Physiologie. Jahrg. 1852.
Seite 199—216. (Hierzu Taf.)

¹⁹⁹ Ich habe in der ersten Reihe¹⁾ meiner Untersuchungen über die Zeitverhältnisse der Muskel- und Nerventhätigkeit durch die elektromagnetische Zeitmessungsmethode nachgewiesen, dass die mechanischen Wirkungen der Muskeln in Folge einer Nervenreizung später eintreten, wenn die Reizung ein längeres Stück des Nerven zu durchlaufen hat, ehe sie zum Muskel gelangt. Die genannte Methode bietet allerdings die besten Garantien dar, wo es sich um sichere Ausführung genauer Messungen handelt, hat aber den grossen Nachtheil, das angeführte Resultat nur durch ausgedehnte und mühsame Reihen von Versuchen heraustreten zu lassen, welche wegen ihrer langen Dauer auch eine besonders günstige Beschaffenheit des Froschpräparates verlangen. Die andere graphische Zeitmessungsmethode, deren Anwendung in jener Abhandlung ebenfalls schon erwähnt ist, und deren Wesen darin besteht, dass der Muskel während der Zuckung die Grössen seiner Verkürzung auf einer bewegten Fläche aufzeichnet, liess dagegen eine viel einfachere und leichter auszuführende Nachweisung der Fortpflanzungszeit in den Nerven hoffen, und da mir dies wichtig genug erschien, unternahm ich es die Sache

1) S. den vorausgehenden Aufsatz.

in dieser Weise durchzuführen, und hatte einen vollkommen ²⁰⁰ günstigen Erfolg.

Die Art, wie die Versuche anzustellen sind, habe ich schon in der vorausgehenden Abhandlung, S. 837, kurz angedeutet. Ein Stift, der durch den zuckenden Muskel gehoben wird, zeichnet auf einer mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegten Fläche eine Curve, deren verticale Coordinaten den Verkürzungen des Muskels, deren horizontale der Zeit proportional sind. Als Anfangspunkt dieser Curve wollen wir denjenigen ihrer Punkte festsetzen, welcher dem Augenblicke der Reizung des Muskels oder seines Nerven entspricht. Lassen wir nun zwei Curven nacheinander zeichnen, und sorgen wir dafür, dass zur Zeit der Reizung der Zeichenstift immer genau dieselbe Stelle auf der Fläche einnimmt, so werden beide Curven denselben Anfangspunkt haben, und es wird sich aus der Congruenz oder Nichtcongruenz ihrer einzelnen Theile beobachten lassen, ob die verschiedenen Stadien der mechanischen Wirkung des Muskels in beiden Fällen gleich oder ungleich spät nach der Reizung eingetreten sind.

Den Apparat, welchen ich zu diesen Versuchen gebraucht habe, theile ich für die Beschreibung in drei Theile, deren jeder ziemlich unabhängig vom anderen ist. Diese sind:

1. Die Verbindungsstücke des zeichnenden Stiftes mit dem Muskel.
2. Das Uhrwerk, welches den Zeichencylinder in gleichmässige Umdrehung versetzt.
3. Die Vorrichtung zur rechtzeitigen Auslösung des elektrischen Schlages, welcher den Nerven durchfährt.

Ein Durchschnitt des Apparates ist in Fig. 1 dargestellt, die Figuren 2 und 3 stellen einzelne Theile desselben dar.

Ich habe zu diesen Versuchen wiederum den Wadenmuskel des Frosches mit dem dazu gehörigen Hüftnerve gebraucht. Der Muskel wurde in demselben von Glaswänden eingeschlossen und mit Feuchtigkeit gesättigtem Raume aufgehängt, wie bei den früheren Versuchen.¹⁾ Sein Nerv wurde ebenfalls

1) S. oben S. 773 und Abbildung Taf. V Fig. 1 und 2.



201 wieder über die vier dort befindlichen Drähte gelegt, durch welche es möglich war, bald der einen, bald der anderen Nervenstelle von aussen her einen elektrischen Schlag zuzusenden. In unserer Taf. VI Fig. 1 sind von den Theilen des früheren Apparates abgebildet: das Brett *BB*, die Säule *CD*, welche mit einer anderen ihr gleichen Glasglocke trägt, in welcher der Muskel aufgehängt ist, der Haken *e* und der viereckige Rahmen *f*, Alles entsprechend den gleichnamigen Theilen der Taf. V Fig. 1.

Der Zweck des Apparates fordert, dass die zeichnende Spitze nur verticale Bewegungen machen könne, in horizontaler Richtung aber unverrückbar sei. Das hätte ich dadurch erreichen können, dass ich sie an einem Schlitten befestigte. Wenn ein solcher aber sicher gehen soll, bietet er stets eine ziemlich beträchtliche Reibung dar, und es schien mir rathsam diese so viel wie möglich zu beseitigen, weil ihre Grösse zu veränderlich ist und störende Unregelmässigkeiten in der Bewegung der Spitze hätte hervorbringen können. Ich habe deshalb vorgezogen, die letztere an einem zusammengesetzten Hebel zu befestigen. Zwei Säulen *EF*, von denen nur eine in der Zeichnung sichtbar ist, tragen den bei *F* um eine horizontale Axe beweglichen Hebel *FG*. Bei *G* ist an diesem, wiederum um eine horizontale Axe drehbar, der Hebel *GH* befestigt, welcher mittels der Klemmschraube *d* die zeichnende Spitze trägt. Da beide Hebel um horizontale Axen drehbar sind, können sich ihre Theile und so auch die zeichnende Spitze *h* nur in Verticalebenen auf und nieder bewegen. Um alle seitliche Schwankungen der Drehungsaxen möglichst zu verhindern, geschieht die Drehung in Spitzen, und diesen ist eine ziemlich grosse Entfernung voneinander gegeben. Der grössere Hebel *FG* ist in Fig. 2 von oben gesehen dargestellt. *FF* sind die Köpfe der ihn tragenden Säulen; sie sind von Stahlschrauben, welche in Spitzen auslaufen und durch Gegenmutter festgestellt werden können, durchbohrt. Die Spitzen greifen in kegelförmige Vertiefungen des Hebels ein. Auf dieselbe Weise ist bei *GG* die Axe des kleineren Hebels in dem grösseren befestigt. Durch die Mitte des Hebels *GF* bei *a* geht eine Stahlschraube, deren

untere Spitze in einer kegelförmigen Vertiefung des Rahmens *f* 202 ruht. Letzterer wird durch zwei ineinander greifende Haken, deren oberstes in die Achillessehne eingehakt ist, vom Muskel getragen. Wenn sich dieser zusammenzieht, hebt er also den Hebel *GF*, und mit ihm die zeichnende Spitze. Der Druck, mit dem sich diese gegen den kreisenden Cylinder legt, kann durch das Gewichtchen *c* regulirt werden, welches an dem horizontalen Querarme *bb* verschiebbar ist. Je näher es dem Hebel *GH* steht, desto weniger, je weiter, desto stärker drückt es die Spitze an.

Diese Befestigungsweise der zeichnenden Spitze entspricht sehr vollständig den Erfordernissen des Versuches. Da die Berührungsfläche der reibenden Theile sehr klein ist, und sie sich nur wenig gegeneinander verschieben, so ist die Reibung an den Befestigungsstellen sehr gering, und kann selbst kleiner als die der zeichnenden Spitze werden. Allerdings ist bei dieser Befestigungsweise die verticale Erhebung des Zeichenstiftes nicht ganz genau proportional den Verkürzungen des Muskels, aber das kommt bei unseren jetzigen Versuchen nicht in Betracht. Dagegen haben wir den Vortheil, dass in der Zeichnung die verticalen Höhen auf das Doppelte vergrössert erscheinen.

Den zweiten Theil des Apparates bildet das Uhrwerk, welches den Zeichencylinder in eine Umdrehung mit gleichförmiger Geschwindigkeit versetzen soll. Diese Aufgabe streng zu lösen, ist der praktischen Mechanik bisher noch nicht gelungen. So vollkommen man die Uhrwerke mit springendem Gange herzustellen weiss, so wenig ist das bei denen der Fall, welche sich ununterbrochen gleichförmig drehen sollen. Das Kegelpendel, welches man gewöhnlich als Regulator des Ganges gebraucht, lässt sich allerdings so herstellen, dass die Dauer seiner ganzen Umlaufzeit mit der grössten Regelmässigkeit ihren constanten Werth behält. Man braucht es nur so schwer zu machen, dass es bei der Drehung durch das Uhrwerk nur sehr kleine Kreise um die Verticallinie beschreibt. Aber leider lässt sich die Gleichförmigkeit der Bewegung innerhalb eines jeden einzelnen Umlaufes durch kein Mittel gewährleisten. Das Pendel kann nämlich je nach der Grösse und Richtung des ersten Anstosses bald Kreise, bald Ellipsen um die Verticale 203



beschreiben, und wenn dies letztere der Fall ist, so dreht es sich, und mit ihm das ganze Uhrwerk, schneller in den Punkten der Bahn, wo es der Verticale näher, als in denen, wo es ihr ferner ist. Da sich die Drehungsgeschwindigkeiten an verschiedenen Punkten der Bahn umgekehrt verhalten wie die Quadrate der Abstände von der Verticale, so können jene schon bei geringen Graden der Ellipticität sehr verschieden sein. Verhalten sich z. B. die Axen der Ellipse zu einander wie 7 zu 5, so wird die Drehungsgeschwindigkeit an den Endpunkten der kleinen Axe fast doppelt so gross sein als an denen der grossen. Wo nun, wie im Kymographion, ein Umgang des Zeichencylinders vielen Umgängen des Pendels entspricht, wird eine kleine periodische Ab- und Zunahme der Drehungsgeschwindigkeit des Cylinders nicht sehr stören. Bei unseren Versuchen treten aber strengere Anforderungen ein. Der Cylinder in dem zu beschreibenden Apparate macht sechs Umdrehungen in der Secunde. Bei einem elliptisch schwingenden Kegelpendel von einer Secunde Umlauf würden also die ganzen Umlaufzeiten des Cylinders abwechselnd grösser und kleiner werden. Unsere Versuche bedingen aber, dass die Drehungsgeschwindigkeit des Cylinders nicht um $\frac{1}{100}$ ihres ganzen Werthes variire. Ein solcher Fehler würde bei einer elliptischen Bahn des Pendels entstehen, wo die grosse zur kleinen Axe sich wie 201 zu 200 verhält. So kleine Abweichungen von der Kreisform können wir beim Kegelpendel weder erkennen noch verhindern. Allerdings muss der vereinigte Einfluss der Reibung und des Gewichtes ein elliptisch schwingendes Pendel allmählig in eine Kreisbahn überführen, falls das Räderwerk und die Befestigungsweise des Pendels nicht an einer Stelle seiner Bahn regelmässig wiederkehrende Ungleichmässigkeiten darbietet. Das Letztere scheint aber kaum zu vermeiden, besonders bei der gewöhnlichen Aufhängung des Pendels auf zwei senkrecht gegen einander gestellten Schneiden. Hier müssten namentlich die Drehungsmomente und die Reibung für die Drehung des Pendels um beide Schneiden gleich sein. Das Erstere würde sich wohl durch besondere Hilfsmittel erreichen lassen, das Letztere kaum.

Bei dieser Lage der Sachen möchte es misslich mit unserem Versuche ausgesehen haben, wenn nicht glücklicherweise die Zeitdauer, während welcher wir die Umdrehungsgeschwindigkeit von genau bestimmter Grösse brauchen, sehr klein wäre, $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{3}$ Secunde. Wenn also auch die Drehungsgeschwindigkeit des Uhrwerkes langsame Schwankungen ihrer Grösse zeigt, so brauchen wir das nicht zu fürchten, falls wir nur die Zeitpunkte erkennen können, wo sie genau den geforderten Werth hat. Ich habe deshalb das Kegelpendel als Regulator des Uhrwerkes aufgegeben, es aber in abgeänderter Form beibehalten, als Mittel, die Grösse der Umdrehungsgeschwindigkeit zu erkennen. Ausserdem habe ich das Uhrwerk so eingerichtet, dass die Schwankungen seines Ganges nur sehr langsam vor sich gehen können. Um den letzteren Zweck zu erreichen, ist an der Axe *ik* Fig. 1, welche den Zeichencylinder *J* trägt, eine schwere, mit Blei ausgegossene Schwungscheibe befestigt, von einem Pfunde Gewicht. Bei dem grossen Beharrungsvermögen dieser Scheibe ändert sich die Geschwindigkeit ihrer Drehung nur sehr langsam, wenn die treibenden Kräfte des Uhrwerkes etwas grösser oder kleiner werden. Von den Pfannenlagern der Axe *ik* befindet sich das obere zwischen Zeichencylinder und Schwungscheibe in einem starken Messingbalken, von dem in der Zeichnung Fig. 1 nur der Querschnitt *uu* erscheint. Unten endet die Axe in der Spitze *k*, welche in einer kegelförmigen Vertiefung des oberen Endes der Schraube *v* ruht. An der unteren Seite der Schwungscheibe *K* sind zwei Flügel *mm* angebracht, welche in einer kreisförmigen zum Theil mit Oel gefüllten Rinne *LMML* laufen. Die Flügel können um eine senkrechte Axe gedreht werden, welche durch die Schwungscheibe hindurchgeht und oberhalb bei *n* mittels eines besonderen Schlüssels gestellt werden kann. Die Rinne *LMML* kann höher und niedriger gestellt werden; im Mittelpunkte der Scheibe nämlich, welche ihren Boden bildet, ist die Schraubemutter *oo* angebracht, welche auf den äusserlich der Röhre *NV* eingeschnittenen Schraubengängen läuft. Durch die verschiedene Stellung der Flügel *m* und der Rinne kann der Widerstand, welchen das Oel der Bewegung der Flügel entgegensetzt, und



dadurch auch die Geschwindigkeit des Uhrwerkes innerhalb ziemlich weiter Grenzen beliebig geändert und regulirt werden. Ich habe die in Oel laufenden Flügel den sonst als Hemmung gebräuchlichen Windflügeln vorgezogen, weil sie bei viel kleineren Dimensionen dasselbe leisten.

Die Axe *ih* trägt an ihrem unteren Ende das Getriebe *l* von 12 Zähnen, in welche das Rad *O* von 48 Zähnen eingreift. In der nach unten verlängerten Axe dieses Rades ist eine horizontale Queraxe *r* angebracht, an welcher die Schwungkugeln *AA* hängen. Letztere bilden das Kegelpendel, welches zur Messung der Geschwindigkeit dienen soll. Sie hängen, während der Apparat ruht, nebeneinander herab; wird er aber in Bewegung gesetzt und erreicht eine gewisse Geschwindigkeit, so entfernen sie sich von einander, und zwar desto mehr, je schneller er sich dreht. Wir können annähernd voraussetzen, dass die ganze Masse der Kugeln in ihrem Schwerpunkte concentrirt sei, dass also eine jede in ihrer Bewegung einem einfachen Pendel entspreche, dessen Länge *l* gleich der Entfernung ihres Schwerpunktes vom Aufhängungspunkte wäre. Nennen wir ferner die Schwerkraft *g*, die Umdrehungszeit *t*, und α den Winkel, welchen die Verbindungslinien der Kugelcentra und ihres Aufhängungspunktes mit der Verticale machen, so ist:

$$l^2 = \frac{4\pi^2 l \cos \alpha}{g}.$$

Bei ruhigem Herabhängen der Kugeln ist der Winkel α gleich $4^\circ 50'$. Aus der Formel ergibt sich, dass, wenn sich die Kugeln bei $1\frac{1}{2}$ maliger Umdrehung in der Secunde voneinander lösen sollen, die Länge des einfachen Pendels *l* gleich 111 mm. sein muss. Die entsprechende Entfernung der Kugelmittelpunkte vom Aufhängungspunkte wurde dem ungefähr gleich gemacht und dann mittels der Schraubenmutter *ss* so lange abgeändert, bis das Uhrwerk, wenn es bei sehr geringer Entfernung der Kugeln voneinander ging, die verlangte Anzahl von Rotationen machte. Dazu mussten die Kugeln um einige Millimeter gesenkt werden.

Es ergibt sich ferner aus obiger Formel, dass, wenn die Drehungsgeschwindigkeit nur um $\frac{1}{400}$ ihres Werthes diejenige

übertrifft, bei welcher sich die Kugeln voneinander lösen, der Winkel α auf $7^\circ 26'$ wachsen muss, sodass schon dann die Kugeln mehr Distanz zwischen sich lassen, als die Länge ihres Halbmessers beträgt. Wählt man nun zur Anstellung der Versuche solche Zeiträume, wo die Kugeln weniger als ihren Halbmesser Distanz zwischen sich lassen, so ist man sicher, dass die Drehungsgeschwindigkeit bei den verschiedenen Versuchen nicht um $\frac{1}{400}$ ihres Werthes variirt hat.

Der übrige Theil des Uhrwerkes, welcher nicht mitgezeichnet ist, enthält nur noch ein Räderwerk zur Vervielfachung der Bewegung und das treibende Gewicht. Obgleich das Räderwerk sehr gut und genau gearbeitet ist, und alle Umstände, welche einen gleichförmigen Gang sichern können, berücksichtigt wurden, schwankt die Geschwindigkeit des Ganges fortwährend langsam auf und nieder, und zwar um etwa $\frac{1}{60}$ des ganzen Werthes, wie man aus den Bewegungen der Kugeln schliessen kann.

Der Zeichencylinder befindet sich auf dem oberen Theile der Axe *ih*. Er ist von dem hiesigen Mechanikus Hrn. Re-koss, der auch die übrigen Theile des Apparates gebaut hat, äusserst genau cylindrisch aus Glas geschliffen worden. Ein passend abgeschnittenes Stück aus einem dicken, nahe cylindrischen Champagnerglase wurde in die Metallfassung eingesetzt, welche später den Cylinder halten sollte, mittels dieser auf der Axe *ih* befestigt, so auf die Drehbank gesetzt, geschliffen und polirt. Dadurch wurde eine Cylinderfläche erhalten, welche ohne das geringste Schwanken sich auf ihrer Axe dreht.

Die Fassung besteht aus zwei Messingscheiben *xx* und *yy*, welche die Grundflächen des Cylinders bilden und in der Mitte durch ein röhrenförmiges Stück vereinigt sind. In die Röhre passt die Axe *ih* genau hinein. Ein Vorsprung in ihrem Inneren entspricht dem Ausschnitt der letzteren, den man am oberen Ende sieht, und verhindert die Drehung um die Axe. Mittels der Schraubenmutter *i*, deren unteres scheibenförmiges Ende zwischen die beiden Platten *xx* und *tt* eingeschlossen ist, kann der Cylinder fest gegen die Axe angezogen werden. Um ihn mit Russ anlaufen zu lassen, löst



man die Schraube i , nimmt ihn ab und befestigt ihn auf einer ähnlich geformten Axe, welche sich zwischen den Armen einer Gabel dreht. Indem man ihn dort mit der Hand in Rotation versetzt, hält man ihn über eine Lichtflamme und lässt ihn ganz dünn mit Russ anlaufen. Wenn die Russschicht zu dick ist, werden die Striche in ihr zu breit. Nachher überträgt man ihn wieder auf die Axe ik , indem man ihn nur bei dem Knopfe i anfasst, um den Russüberzug nicht zu verwischen.

Der Theil des Apparates, welcher dazu dient die elektrischen Schläge rechtzeitig auszulösen, ist theilweise in Fig. 1 sichtbar, und ausserdem von oben gesehen mit dem anstossenden Theile des Randes der Schwungscheibe K in Fig. 3 dargestellt worden. Er ruht auf einem Messingkreuz, dessen längeres Stück (RR Fig. 3) an den Enden mit Ringen und Klemmschrauben versehen, von den Säulen CD getragen und an diesen auf- und abgeschoben werden kann. Das kürzere Kreuzstück QQ Fig. 1 dient nur dazu, die Schrauben α_1 und α_2 aufzunehmen. Auf den längeren Schenkeln des Kreuzes sind vertical hervortretende Stücke $\rho\rho$ befestigt; diese sind in ihrem oberen Theile von Schrauben $\gamma\gamma$ durchbohrt, zwischen deren Spitzen sich das Brettchen PP dreht. In Fig. 1 ist mit γ der Punkt der Durchschnittsfläche bezeichnet, welcher der Drehungsaxe angehört. Durch die Schrauben α_1 und α_2 wird der Spielraum der Drehung soweit, als zulässig ist, beschränkt. Auf der oberen Seite des Brettchens PP nehmen zwei senkrechte Metallplatten die in Spitzen drehbare Axe $\theta_1\theta_2$ zwischen sich. Am Ende θ_1 derselben, welches der Schwungscheibe K zugewendet ist, befindet sich ein senkrecht stehender Hebelarm, dessen oberes Ende μ sich zu dem oberen Rande der Scheibe K hinüberbiegt und von einem Vorsprunge z dieses Randes getroffen werden kann, wenn das entsprechende Ende des Brettchens P sich bis zur Kuppe der Schraube α_1 gesenkt hat. Wird dagegen das hintere Ende des Brettchens bis zur Berührung der Schraube α_2 herabgedrückt, so geht der Daumen z an dem Hebel μ vorbei, ohne ihn zu berühren. Eine Feder $\beta\beta$ zwischen dem Querstück des Kreuzes QQ und dem Brettchen P strebt die erste jener Stellungen herbeizuführen.

In der Axe $\theta_1\theta_2$ befinden sich zwei Drahtklemmen x und z . Die letztere enthält einen Kupferdraht, dessen amalgamirtes Ende in das Quecksilbernäpfchen η eingetaucht, die andere x dagegen enthält eben solchen Draht, dessen Spitze aus Platina besteht und auf dem Platinaplättchen ζ ruht. Letzteres steht unterhalb des Brettchens mit der Drahtklemme ϵ , und durch den darin befestigten Draht mit dem Quecksilbernäpfchen δ in leitender Verbindung. Die Axe $\theta_1\theta_2$ hat in der hier gezeichneten Stellung ein geringes Uebergewicht nach der Seite der Drähte $x\zeta$ und $z\eta$, und deshalb stützt sich die Platina Spitze des ersteren mit gelindem Drucke auf das Plättchen ζ . So lange dies geschieht, sind demnach die Näpfe δ und η leitend verbunden, sowie aber der Daumen z gegen den Hebel μ stösst, wird die Leitung bei ζ unterbrochen. Durch die Näpfe δ und η hindurch wird der Strom eines Daniell'schen Elementes geleitet, in dessen Kreis gleichzeitig eine Drahtspirale No. 1 eingeschaltet ist. Diese liegt in einer zweiten solchen Spirale No. 2, deren Enden mit dem Nerven in Verbindung gesetzt sind. In dem Moment also, wo der Daumen z gegen den Hebel μ stösst, wird der Strom in No. 1 unterbrochen, und dadurch in No. 2 ein inducirter Strom erregt, welcher den Nerven durchfährt. Dass zwischen dem Moment der Unterbrechung des inducirenden und der Entwicklung des inducirten Stromes keine messbare Zeit vergeht, habe ich nachgewiesen in einer Abhandlung: „Ueber die Dauer und den Verlauf der durch Stromesschwankungen inducirten elektrischen Ströme (Bd. I. S. 429 dieser Sammlung). Der Moment des Stosses fällt also mit dem Moment der Nervenreizung zusammen. Es ist ferner klar, dass bei unveränderter Stellung des Zeichenstiftes dieser bei Ausführung einer zweiten Zeichnung im Augenblicke des Stosses, also auch der Reizung, genau dieselbe Stelle des Cylinders berühren wird wie das erste Mal, dass also auf dem Cylinder der Anfangspunkt der zweiten Zeichnung genau mit dem Anfangspunkte der ersten zusammenfallen wird.

Der Faden, welcher von d über den cylindrischen Querbalken g nach π hingespant ist, dient dazu, den Zeichenstift so lange von dem Cylinder entfernt zu halten, bis die Zeichnung



ausgeführt werden soll. Sein unteres Ende ist um den runden Stahlstab $\nu\xi$ herumgelegt, sodass es sich bei Drehungen des letzteren entweder auf- oder abwickelt. Zwei Klemmschrauben ν und π halten den Stab in seiner Lage. Man wickelt den Faden gerade so weit auf, dass sich die Zeichenspitze vom Cylinder entfernt, wenn sich das Ende P_2 des Brettchens senkt, sich dagegen anlegt, wenn sich P_1 senkt.

Die Axe $\vartheta_1\vartheta_2$ muss so viel Reibung haben, dass bei den Bewegungen des Brettchens P_1P_2 kein Klirren zwischen den Platinatheilen der Unterbrechungsstelle eintreten kann; denn die kleinste und kürzeste Lösung ihrer Berührung würde sogleich eine Zuckung zur Folge haben. Die Reibung kann durch Anziehen der Schraube bei ϑ_2 regulirt werden, auf deren Spitze die Axe hier sich dreht. Um das Brettchen möglichst sanft fallen zu lassen, sind die oberen Enden der Schrauben α_1 und α_2 mit Leder überzogen. Da der Daumen z den Hebel μ wohl mitunter noch, während das Brettchen fällt, ergreifen könnte, muss gesorgt werden, dass dies nur bei derselben Stellung der Scheibe K geschieht, bei der es nach vollendetem Falle geschehen würde. Zu dem Ende muss die Stossfläche des Hebels bei μ eine auf der Axe $\gamma\gamma$ senkrechte Ebene bilden, und die des Daumens muss solche Gestalt haben, dass sich entweder diese ganze Fläche auf einmal anlegt, oder doch keiner ihrer Theile eher als die Spitze. Sind diese Bedingungen erfüllt, so kommt es nicht darauf an, welche Lage das Brettchen zur Zeit des Stosses hat.

Die Versuche werden in folgender Weise ausgeführt. Zunächst bezeichnet man den Punkt des Cylinders, welcher dem Augenblicke der Reizung entspricht. Zu dem Ende lässt man den Zeichenstift sich an den Cylinder anlegen und dreht die Schwungscheibe ganz langsam, bis ihr Daumen den Hebel μ berührt. So lange hat der Stift eine horizontale Linie gezeichnet; in dem Augenblicke der Berührung aber löst sich der inducirte Strom aus, der Muskel zuckt, und dieser Zuckung entspricht auf dem Cylinder eine einfache Verticallinie, vorausgesetzt, dass man den Cylinder langsam genug verschiebt, um seine Stellung während der Dauer der Zuckung nicht merklich zu verändern. Es ist klar, dass diese Verticallinie

an der Stelle gezeichnet wird, wo der Stift in dem Augenblicke des Zusammenstosses von Hebel und Daumen, d. h. im Augenblicke der Reizung steht.

Der Hebel μ , welcher durch das Anstossen des Daumens aus seiner verticalen Stellung etwas entfernt worden ist, wird in diese zurückgeführt, sodass sich der inducirende Strom wiederum schliesst. Die Enden der inducirten Spirale No. 2 verbindet man mit dem Ende des Nerven, von welchem zunächst die Reizung ausgehen soll. Den Knopf ξ drückt man herunter, um den Zeichenstift vom Cylinder zu entfernen und den Hebel μ vor der Berührung des Daumens zu schützen, und lässt dann das Uhrwerk sich in Bewegung setzen. Sobald man bemerkt, dass die Schwungskugeln sich zu trennen anfangen, kann die Zeichnung ausgeführt werden. Zu dem Ende lässt man das Brettchen P_1P_2 sich senken, wobei sich auch der Zeichenstift anlegt. Nun geht der Daumen nicht mehr an dem Hebel vorüber, sondern trifft ihn, wirft ihn um und bewirkt dadurch die Zuckung, deren Verlauf auf dem Cylinder sich aufzeichnet. Gleich nachher entfernt man den Zeichenstift vom Cylinder, indem man den Knopf ξ wieder herabdrückt, und hält das Uhrwerk an, natürlich nicht plötzlich, weil sonst die heftig bewegte Schwungscheibe die Axen zerbrechen würde, sondern langsam, z. B. durch Andrücken des Fingers gegen den cylindrischen Umfang der Scheibe. Man findet nun auf dem Cylinder die erste Curve gezeichnet. Ich pflegte mit einer Staarnadel zwei gekrümmte, sie berührende Häkchen in die Russschicht einzuzichnen, um sie später sicher von der zweiten, noch erst auszuführenden Curve unterscheiden zu können. Und zwar setzte ich diese Häkchen so an den auf- und absteigenden Theil der ersten Curve, dass sie von der zweiten abgewendet standen. Hatte ich also zuerst das dem Muskel entferntere Nervenstück gereizt, so setzte ich die Häkchen an die Rückseite, wie in Fig. 7, hatte ich das nähere gereizt, an die Vorderseite der gezogenen Linie, wie in Fig. 6.

Um die zweite Curve zu zeichnen, bringt man das andere Nervenstück in die Leitung des inducirten Stromes, stellt den Hebel μ wieder vertical und verfährt ganz wie vorher.



Je schneller man die betreffenden Handgriffe ausführen lernt, desto sicherer ist man das zweite Mal die Reizbarkeit des Muskels nicht merklich verändert zu finden, was für das Gelingen des Versuches eine wesentliche Bedingung ist.

Die so angefertigten Zeichnungen kann man aufbewahren. Zu dem Ende befestigt man den Cylinder wieder in der Gabel, auf der man ihn angerusst hat, und rollt ihn auf einer angehauchten Fischleimplatte ab von der Art, wie sie die Kupferstecher zum Copiren der Zeichnungen gebrauchen. Durch das Anhauchen wird die Leimplatte etwas klebrig und hält den Fuss des Cylinders fest, sodass sich die Zeichnung von der cylindrischen auf die ebene Fläche abwickelt. Das Leimblatt kann man mit der berussten Seite gegen ein nasses weisses Papier legen, wo es anklebt. Die Curven erscheinen dann weiss auf schwarzem Grunde und sind sehr deutlich sichtbar.

Die Curven haben im allgemeinen die Gestalt, welche ich schon in der zur ersten Abhandlung gehörigen Tafel V Fig. 3 dargestellt habe. Wenn ich die Hebel, welche den Zeichensstift tragen, durch möglichst zarte Einstellung der Spitzen, um welche sie sich drehen, sehr leicht beweglich machte, erschien auch derselbe häufige Wechsel convexer und concaver Stellen wie an jener abgebildeten Curve, bedingt, wie man sich entsinnen wird, durch die senkrechten Schwankungen, welche die angehängten Metallmassen unter dem Einflusse der Elasticität des Muskels vollführen. Bei den Versuchen, wo die Curven zur Darstellung der Fortpflanzungszeit im Nerven gebraucht werden sollten, zog ich es aber vor, die Schrauben, um welche die Hebel sich drehen, etwas fester zu ziehen, um mich gegen kleine seitliche Schwankungen der Zeichenspitze möglichst sicher zu stellen. Dadurch wurde die Reibung an den Axen grösser und die Wechsel von Convexitäten und Concavitäten demgemäss seltener, weil die Schwankungen des Gewichtes durch die stärkere Reibung schneller vernichtet wurden.

Ehe wir die Curven gebrauchen, um daraus Schlüsse auf die Fortpflanzungszeit in den Nerven zu machen, ist es nöthig die Veränderungen zu kennen, welche durch die allmähliche Abnahme der Reizbarkeit des Präparates an ihnen hervor-

gebracht werden. Vergleicht man Curven, welche derselbe Muskel bei Reizung derselben Nervenstelle hintereinander gezeichnet hat, so findet man anfangs nur eine geringe Abnahme der Höhe der Zuckung, es werden sämmtliche verticale Ordinaten proportional verringert, während Länge und Gestalt der Curve unverändert bleiben. Erst in den späteren Stadien der abnehmenden Reizbarkeit wird auch die Dauer der Zusammenziehung geändert, und zwar, was man vielleicht nicht vermuthet haben möchte, sie wird nicht kürzer, sondern länger. In Fig. 4 sind zwei solche Curven copirt und passend aufeinander gelegt. Die horizontale Abscissenaxe ab entspricht in dieser und den folgenden Figuren der Linie, welche der Muskel ohne Zuckung gezeichnet haben würde; die senkrechte ac bezeichnet den Zeitpunkt der Nervenreizung. Die verticalen Höhen der Originalzeichnung sind der Deutlichkeit wegen verdoppelt worden, betragen also das Vierfache der wirklichen Zusammenziehung des Muskels. Auf der Abscissenaxe bezeichnet ah die Länge des Cylinderumfanges, und entspricht einem Zeitwerthe von $\frac{1}{6}$ Secunde. Die Theile zwischen h und b fallen deshalb in den Originalen wieder mit dem Anfang der Zeichnung zusammen. Die ausgezogene Curve der Figur 4 war die erste einer längeren Reihe, welche einer der angewandten Muskeln gezeichnet hatte, die punktirt dagegen die letzte. Wir bemerken zunächst, dass die höchste Erhebung der ersten Curve bei k_1 grösser ist als die der zweiten bei k_2 ; ferner, dass das Maximum k_2 später nach der Reizung eingetreten ist als k_1 . Noch auffallender wird der Unterschied beider Curven beim Sinken; die zweite nähert sich der Abscissenaxe viel langsamer als die erste. Während die Einbiegung der ersten bei m_1 sich fast an die Abscissenaxe anschliesst, in anderen Fällen sogar unter sie hinabsinkt, bleibt die entsprechende der zweiten bei m_2 ziemlich hoch darüber. Ebenso liegt auch das ganze hintere Ende der ersten Curve unter der zweiten, bis sich endlich beide bei fortgesetzter Zeichnung asymptotisch der Abscissenaxe anschliessen würden. Je weiter die Reizbarkeit sinkt, desto mehr verschwindet die Einbiegung bei m_2 , desto langsamer und gleichmässiger sinkt die Curve von ihrem Gipfelpunkte ab. Schliesslich bemerke



ich noch, dass diese Veränderungen in allen Fällen, wo ich eine grössere Reihe von Versuchen mit demselben Muskel ausführte, in ganz ähnlicher Weise eingetreten sind wie in dem abgebildeten Beispiele.

Wir entnehmen aus dem eben Gesagten eine Vorsichtsmaassregel. Gesetzt, wir hätten zuerst die Eintrittsstelle des Nerven gereizt, und es wäre die ausgezogene erste Curve der Fig. 4 gezeichnet worden, dann hätten wir eine weiter vom Muskel entfernte Nervenstelle gereizt, und es wäre eine Linie ähnlich der punktirten Curve entstanden, so würden wir nicht wissen, ob die Verspätung der zweiten Curve gegen die erste von der längeren Fortpflanzungszeit im Nerven oder von der verminderten Reizbarkeit herrührt. Wir müssen also bei unseren Versuchen entweder stets die entferntere Stelle des Nerven zuerst reizen, sodass die Fortpflanzungsdifferenz in den Nerven und die Aenderung der Reizbarkeit in entgegengesetztem Sinne einwirken, oder besser nacheinander mehrere Curvenpaare zeichnen lassen, bei denen abwechselnd die Reizung der näheren und der ferneren Nervenstelle vorangeht.

Sind die thierischen Theile recht kräftig und frisch, so ist die Gestalt der Doppelcurven ganz gleich, bei welcher Nervenstelle man auch mit der Reizung beginnen mag. Jede Zeichnung besteht dann aus zwei Curven von congruenter Gestalt, die in horizontaler Richtung um ein gewisses Stück gegeneinander verschoben sind, wie in Fig. 5, und zwar so, dass diejenige Curve, welche bei Reizung der näheren Nervenstelle gezeichnet worden ist, auch dem Zeitpunkte der Reizung näher liegt als die andere. In Fig. 5 entspricht die Curve *adefg* der Reizung der näheren, *adefg* der ferneren Nervenstelle. Die Bedeutung der übrigen Buchstaben und die Grössenverhältnisse sind in dieser und den folgenden Figuren ganz wie in Fig. 4. Beide Curven haben genau gleiche Höhen, Längen, kurz genau congruente Gestalt, und unterscheiden sich nur dadurch, dass alle Theile der einen um ein gleiches Zeittheilchen später ausgeführt worden sind als die entsprechenden Theile der anderen.

Hat man es mit thierischen Präparaten zu thun, deren Reizbarkeit von einer Zuckung zur folgenden sich merklich

verringert, so werden die beiden Curven nicht mehr ganz genau congruent. Im Anfang besteht diese Aenderung, wie ich angeführt habe, nur darin, dass die senkrechten Ordinaten kleiner werden, ohne dass sich die horizontalen verlängern. Wird nun zuerst die nähere Nervenstelle gereizt, also die Curve *adefg* Fig. 5 zuerst gezeichnet, dann die zweite *adefg*, und sind deren sämtliche Ordinaten etwas kleiner geworden, so entfernt sich dadurch das Stück δ von *d* und *q* von *f*, während sich *e* dem *e* nähert. Es bekommt dann die Doppelcurve das Ansehen von Fig. 6, worin die Häkchen bei *d*, *e* und *f* die zuerst gezeichnete Curve bezeichnen. Fängt man dagegen mit der Reizung der entfernteren Stelle an, so senkt sich *d* zu δ und *f* zu *q*, während sich *e* von *e* entfernt, wie in Fig. 7. Die Häkchen bei δ , *e* und *q* bezeichnen hier durch ihre Stellung die Curve der entfernteren Nervenstelle als die erstgezeichnete. Lässt man also eine Reihe von Doppelcurven zeichnen, während man die Reihenfolge der beiden Nervenstellen in Bezug auf die Reizung stets wechselt, so bekommt man Zeichnungen, welche abwechselnd der Fig. 6 und 7 ähnlich sehen. Sinkt die Reizbarkeit noch weiter, sodass sich die Curven auch immer mehr zu verlängern anfangen, so werden die Abweichungen ihrer Gestalt meist zu bedeutend, als dass es noch lohnte Doppelcurven zeichnen zu lassen.

Wenn wir die Doppelcurve Fig. 5 betrachten, so geht aus ihr hervor, dass die beiden in ihr verzeichneten Muskelzuckungen in Bezug auf Stärke, Dauer und Verlauf der einzelnen Stadien der Zusammenziehung ganz gleich gewesen sind. Nur ist die eine später nach der Reizung eingetreten als die andere. Da nun in beiden Fällen die Einrichtung des Apparates und die mechanischen Kräfte des Muskels ganz dieselben gewesen sind, so kann die Verspätung der Wirkung in dem einen Falle nur von der längeren Fortpflanzung im Nerven hergerührt haben. Ganz dasselbe sehen wir in den Curven Fig. 6 und 7. Obgleich hier die Abnahme der Reizbarkeit merklich wird, ist deren Einfluss doch noch nicht im Stande, den Zeitunterschied, welcher von der Fortpflanzung im Nerven herrührt, zu verdecken, es sind auch hier noch alle Stadien der Zuckung bei Reizung der entfernteren Stelle später ein-



getreten als bei der der näheren. Ein besonderes Interesse bieten namentlich die der Fig. 7 ähnlichen Curven, weil sie nachweisen, dass auch in solchen Fällen die Zuckung von der entfernteren Stelle aus später eintritt als die von der näheren, wo sie bei einem höheren Grade von Reizbarkeit ausgeführt ist als die letztere. Es wird dadurch der Einwand widerlegt, dass die Abweichung der Curven in Fig. 5 auch nur wie die in Fig. 4 von einer Verschiedenheit der Reizbarkeit herrühren möchte, indem vielleicht die entferntere Nervenstelle stets weniger reizbar sei als die nähere. In Fig. 7 hat gerade die Zuckung, welche von der entfernteren Stelle aus erregt ist, eine grössere Höhe (s. den Gipfel bei *k*), entspricht also einem höheren Grade der Reizbarkeit, und doch behält der Unterschied in der Lage beider Curven denselben Sinn.

Der grosse Vortheil der beschriebenen Methode besteht darin, dass man in jeder einzelnen Zeichnung zweier zusammengehörigen Curven unmittelbar aus ihrer Gestalt erkennen kann, ob der Muskel in beiden Fällen gleichmässig gearbeitet habe, während wir dasselbe bei der elektromagnetischen Zeitmessungsmethode nur aus einer langen Reihe von Einzelversuchen entnehmen konnten. Was den absoluten Werth der Fortpflanzungsgeschwindigkeit betrifft, so lassen sich die horizontalen Abstände der beiden Curven nicht mit sehr grosser Genauigkeit messen; doch finden sich die Werthe jener Geschwindigkeit ungefähr ebenso gross wie nach der früheren Methode. In Fig. 5 z. B. ist der horizontale Abstand ungefähr 1 mm, die Länge des Cylinderumfanges, entsprechend $\frac{1}{6}$ Secunde, ist 85,7 mm, also die Abscissenlänge für 1 Secunde 514,2 mm. Die Länge von 1 mm entspricht also $\frac{1}{514,2}$ Secunde. Die Länge der Nervenleitung war 53 mm; daraus folgt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von 27,25 Metern in der Secunde. Der wahrscheinlichste Werth aus den früheren Versuchen war 26,4 Meter.

Am Schlusse meiner früheren Abhandlung habe ich durch die elektromagnetische Messungsmethode die Veränderungen der Zuckungsdauer und der Fortpflanzungszeit der Reizung untersucht, welche eintreten, wenn man den Nerven auf Eis legt, und habe gefunden, dass beide Zeitgrössen dabei beträcht-

lich zunehmen. Dasselbe lässt sich leicht durch die zeichnende Methode nachweisen. Die Zuckungscurven behalten dieselbe verticale Höhe, welche sie hatten, ehe der Nerv auf Eis lag, bekommen aber eine viel grössere horizontale Ausdehnung. Ohne besondere neue Einrichtungen des Apparates kann man allerdings die Temperaturunterschiede nicht so constant machen, dass Doppelcurven von übereinstimmender Gestalt erhalten werden könnten. Der Zeitunterschied für die Fortleitung im Nerven wird aber gleichzeitig so vergrössert, dass die beiden Curven trotz ihres Mangels an Congruenz doch immer im richtigen Sinne voneinander abweichen.



LXXXVII.

Ueber die Methoden, kleinste Zeittheile zu messen,
und ihre Anwendung für physiologische Zwecke.

Gelesen in der physikalisch-ökonomischen Gesellschaft zu Königsberg
am 13. December 1850. — Abgedruckt in den Königsberger natur-
wissensch. Unterhaltungen. Bd. II. Heft 2. S. 1—24.

- ¹ Ich beabsichtige heute die Aufmerksamkeit der geehrten Versammlung für eine Reihe von Versuchen in Anspruch zu nehmen, mit denen ich mich in letzter Zeit beschäftigt habe, Versuchen, deren Zweck es ist, die Dauer verschiedener schnell vorübergehender Vorgänge des lebenden Körpers mittels der verfeinerten Zeitmessungsmethoden der neueren Physik kennen zu lernen. Zuvörderst sei es mir erlaubt, soweit es das Verständniss des Folgenden erfordert, und soweit es ohne Demonstration an den Apparaten selbst geschehen kann, das Wesen der Methoden auseinander zu setzen, durch welche es möglich geworden ist, ebenso kleine Theile einer Zeitsecunde nicht bloss bemerkbar zu machen, sondern sogar zu messen, als die sind, in welche wir nur durch die mächtigsten Mikroskope unser kleinstes Längenmaass, die Linie, zerlegen können.
- ² Die Wahrnehmung von Zeitunterschieden mittels unserer Sinne ohne Anwendung künstlicher Hilfsmittel ist keine sehr feine, namentlich dann nicht, wenn die beiden Vorgänge, deren Zeitunterschied bestimmt werden soll, von verschiedenen Sinnesorganen, also z. B. der eine vom Auge, der andere vom Ohr, oder selbst nur von verschiedenen Partien desselben Organes, z. B. im Auge an verschiedenen Stellen des Gesichtsfeldes, auf-

gefasst werden. Bekannt ist in dieser Hinsicht die von Bessel entdeckte merkwürdige Differenz verschiedener Individuen in Bezug auf die astronomische Zeitbestimmung der Sterndurchgänge. Der beobachtende Astronom vernimmt mit dem Ohre den Pendelschlag der Uhr, gleichzeitig sieht er den zu beobachtenden Stern durch das Gesichtsfeld des Fernrohres gegen den Faden rücken; er sucht sich zu merken, welche Stelle der Stern beim letzten Pendelschlage vor seinem Durchgange hinter dem Faden hatte, welche beim ersten nachher, um danach zu bestimmen, in welchem Zehnthel der durch die beiden Schallempfindungen begrenzten Zeitsecunde der Stern am Faden vorübergegangen sei. Jeder Beobachter, welcher sich auf diese Art zu messen einübt, liefert Reihen von Messungen, die unter sich sehr wohl übereinstimmen, aber um einen mehr oder weniger grossen constanten Unterschied von denen jedes anderen Beobachters abweichen, und die Erfahrung lehrt, dass eine Abweichung von mehr als einer ganzen Secunde zwischen verschiedenen Individuen möglich ist. Nehmen wir an, diese beiden wichen um gleich viel in entgegengesetztem Sinne von der Wahrheit ab, so folgt daraus, dass auch bei der sorgfältigsten Einübung und der grössten Aufmerksamkeit, der Mensch sich in der Bestimmung der Gleichzeitigkeit einer Gesicht- und einer Gehörwahrnehmung mindestens um eine halbe Secunde irren kann. Genauer unterrichten uns unsere Sinne, wenn wir Wahrnehmungen derselben Nervenfasern zu vergleichen haben. Sehen wir an einer und derselben Stelle des Gesichtsfeldes zweimal hintereinander dieselbe Lichterscheinung aufblitzen, so erkennen wir sie noch als doppelt, wenn die Zeit der Unterbrechung $\frac{1}{10}$ Secunde beträgt; ist diese aber kleiner, so verschmelzen beide Erscheinungen in eine, das beweisen uns, um an ein vulgäres Experiment zu erinnern, der continuirliche Feuerkreis, den eine glühende Kohle rasch im Kreise geführt hervorbringt, die Erscheinungen der schnell rotirenden Farbenkreisel und andere. Das Ohr vernimmt aufeinander folgende Stösse entweder als getrennte Geräusche oder, wenn die Zeitunterschiede kleiner werden als ein Schwirren, endlich wenn mehr als 32 auf die Secunde kommen, als einen gleichmässig anhaltenden Ton, diesen desto höher, je schneller die Stösse



sich folgen. Allerdings können wir aus der Höhe eines solchen Tones mit grösster Genauigkeit die Zahl der Stösse in der Secunde, also auch die Zwischenzeit von je zweien derselben berechnen; indessen dürfen wir diese Art der Wahrnehmung von Zeitunterschieden in der Qualität einer bestimmten Tonempfindung nicht mit hierherziehen, da die Grösse der Zeitunterschiede dabei nicht unmittelbar wahrgenommen, sondern erst durch das wissenschaftliche Verständniss des Vorganges erschlossen wird. Wir können dem Ohre nur soweit das Vermögen, Zeitunterschiede als solche wahrzunehmen, zuerkennen, als es fähig ist, die Zahl von etwa 3, 4, 5 oder 6 schnell hintereinander folgenden Stössen aufzufassen; das ist aber nur möglich, wenn die Zwischenzeiten nicht unter $\frac{1}{10}$ Secunde betragen. Wir finden hier also ungefähr dieselbe Grenze wieder wie beim Auge.

Die Unvollkommenheit in der zeitlichen Vergleichung von Wahrnehmungen verschiedener empfindender Fasern scheint darauf zu beruhen, dass zwischen ihnen der Gedanke zum Bewusstsein kommen muss: „Jetzt habe ich das erste empfunden, aber noch nicht das zweite. — Jetzt auch das zweite.“ Die Schnelligkeit des Besinnens ist aber keineswegs eine so grosse, wie es das Sprichwort: „Schnell wie der Gedanke“ voraussetzen scheint. Der grosse Unterschied in dem oben angeführten Beispiele betreffs der astronomischen Beobachtungen möchte sich dann darauf zurückführen, dass der eine Beobachter zunächst auf die Schallempfindung reflectirt, und nachdem er sich diese zum Bewusstsein gebracht hat, seine Aufmerksamkeit auf das Gesichtsbild wendet, der andere aber erst sieht und dann hört, d. h. diejenige Gesichterscheingung als die zusammentreffende nimmt, welche er sich zum Bewusstsein gebracht hatte, als er durch den Schall gestört wurde. Fallen dagegen beide Wahrnehmungen auf dieselben empfindenden Nervenfasern, so verschmelzen sie zu einem Gesamtbilde einer sinnlichen Wahrnehmung, welches wir im Gedächtniss behalten und durch nachträgliches Besinnen in seine einzelnen Momente zerlegen. So machen wir es, wenn wir drei- oder viermaliges Aufblitzen eines Lichtes an ein und demselben Orte, oder ebensoviel Schallstösse vernehmen, die $\frac{1}{10}$ bis $\frac{1}{2}$ Secunde von-

einander entfernt sind. Wir können sie nicht, während wir sie wahrnehmen, zählen, aber wohl in ihrem ruhenden Gedächtnissbilde.

Dadurch möchten die Grenzen bezeichnet sein, bis wie weit die Unterscheidung von Zeittheilen ohne künstliche Hilfsmittel gehen kann. Sobald $\frac{1}{10}$ Secunde oder noch kleinere Theile mit Sicherheit beobachtet oder gar gemessen werden sollen, müssen wir künstliche Hilfsmittel anwenden. Den hierhergehörigen Methoden liegen zwei wesentlich voneinander verschiedene Principien zu Grunde; bei den einen verwandelt man die Zeitunterschiede in Raumunterschiede, bei den anderen misst man die mechanische Wirkung, welche während der zu messenden Zeit eine Kraft von bestimmter Intensität hervorgerufen hat, und berechnet aus dieser die Zeit. Die Erfindung oder wenigstens die fehlerfreie Ausführung dieser Methoden fällt fast ganz in die letzten 12 Jahre. Hauptsächlich war es das Bedürfniss der Artillerie, welches dergleichen zu suchen trieb. Um den Lauf der Geschützkugeln berechnen zu können, ist es wesentlich ihre Geschwindigkeit und die Zeit, welche die Pulvermasse zur Entzündung braucht, zu kennen. Die unvollkommenen Apparate, mit denen man früher diesen Zweck zu erreichen suchte, sind neuerdings bis zu einem solchen Grade von Genauigkeit gebracht worden, wie dieselbe nur irgend bei dieser Art von Versuchen erfordert wird. Es liegt ihnen meistens das erste der vorher bezeichneten Principien zu Grunde, sie machen die Zeitunterschiede dadurch messbar, dass sie dieselben in Raumunterschiede verwandeln. Werner Siemens, damals Lieutenant der preussischen Artillerie, derselbe, welcher die gegenwärtig auf den elektrischen Telegraphenlinien des preussischen Staates und neuerlich auch von England für die ostindischen Linien angenommenen Constructionen ersonnen hat, ist auch der Erfinder eines zeitmessenden Instrumentes für artilleristische Zwecke, welches ich als geeignetstes Beispiel zur Erläuterung des Principis derartiger Instrumente hier seinen wesentlichen Theilen nach beschreiben will.

Denken wir uns einen sehr genau gearbeiteten stählernen Cylinder, der um seine Axe rotire (es braucht auch nur ein einzelner ringförmiger Streifen eines solchen Cylinders zu sein).



Die Oberfläche desselben sei in irgend eine Zahl gleicher Theile, etwa in Winkelgrade, also in 360 getheilt. Eine feine feststehende Spitze werde ihr genähert. Wenn der Cylinder in einer Secunde sich einmal umdreht, so gehen während dieser Zeit die 360 Theile in gleichmässiger Geschwindigkeit bei der Spitze vorüber, also jeder einzelne im 360sten Theile einer Secunde. Siemens hat seinem Cylinder durch ein Uhrwerk mit Kegelpendel eine Geschwindigkeit von 60 Umdrehungen in der Secunde gegeben, etwas, was durch ein sorgfältig gearbeitetes Triebwerk nicht allzuschwer zu erreichen ist, da übrigens der cylindrische Streifen so leicht als möglich gearbeitet werden kann. Es gehen also dann 60 mal 360 d. h. 21600 Gradtheile in der Secunde an der Spitze vorüber, oder doppelt so viele, in runder Zahl 40000 halbe Gradtheile, wie er sie auf den Cylinder hat abtheilen lassen, also jeder einzelne in dem vierzigtausendsten Theile einer Secunde. Sie sehen nun ein, wenn die Spitze zweimal hintereinander eine Marke auf dem Cylinder macht, so wird sich der Cylinder in der Zeit zwischen beiden Markierungen um so viel Theilstriche fortbewegt haben, als Vierzigtausendtheile einer Secunde inzwischen verflossen sind; die zweite Marke wird also eine andere Stelle des Cylinders treffen, und der Abstand der beiden Marken, längs der Cylinderfläche nach Theilstrichen gezählt, wird unmittelbar die Zahl dieser Zeittheilchen angeben. Bis so weit hatte man das Princip dieser Messungen schon früher auszuführen verstanden, die Hauptschwierigkeit aber, welche man lange vergebens zu lösen versucht hatte, war, zu bewirken, dass die Augenblicke der Markierungen auch genau mit Anfang und Ende desjenigen Vorganges zusammenfielen, dessen Zeitdauer gemessen werden sollte, also etwa mit denjenigen Augenblicken, wo die Kugel zwei in ihrer Bahn aufgestellte Körper trifft. Man liess die Spitze sich an den Cylinder anlegen, ihn ritzen; das geschah zuerst durch einen Beobachter, der einen Hebel bewegte, sobald er das Treffen der Kugel vernommen hatte. Wie unvollkommen dieses Mittel war, ergibt sich aus dem, was ich vorher über die Ungenauigkeit unserer Sinne gesagt habe. Mechanische Uebertragung des Stosses der Kugel gegen den getroffenen Körper ohne Vermittelung eines Beobachters, erfordert auf

weitere Entfernungen hin ebenfalls Zeit, da der Stoss durch einen festen Körper sich nur mit messbarer Geschwindigkeit fortpflanzt. Breguet und Wheatstone kamen sehr viel weiter, indem sie zur Uebertragung der Wirkung den galvanischen Strom anwendeten, der sich mit einer unmessbar grossen Geschwindigkeit durch die hier in Betracht kommenden Strecken fortpflanzt. Der Stift, welcher auf dem Cylinder die Marken macht, ist an einem Hebelchen befestigt, welches von einem Elektromagneten so lange gehalten wird, als dieser durch den ihn umkreisenden Strom magnetisirt wird. Sowie die Leitung des Stromes an irgend einer Stelle unterbrochen wird, fällt die markirende Spitze auf die Cylinderoberfläche und zeichnet eine Linie. Die Unterbrechung des magnetisirenden Stromes geschieht dadurch, dass die Kugel ein Netz von dünnen Drähten zerreisst, welches in ihrer Bahn aufgestellt ist und mit zur Leitung gehört. Die Einrichtungen waren meist so getroffen, dass gleich nach der Unterbrechung des Stromes derselbe wieder geschlossen, die Spitze vom Cylinder wieder abgehoben wurde. Bei der Zerreißung eines zweiten Drahtnetzes wurde eine zweite Marke gezeichnet. So sinnreich diese Instrumente construirt waren, erlaubten sie keine Messungen genauer als $\frac{1}{100}$ Secunde, weil die zeichnende Spitze, nachdem sie vom Elektromagneten gelassen wurde, eine Zeit braucht, um bis auf den Cylinder zu fallen, und ihre Fallgeschwindigkeit bei ungleicher Stärke des Magnetismus nicht, wie die Erfinder dieser Apparate vorausgesetzt hatten, constant, sondern veränderlich ist. Dadurch wurde die Genauigkeit, welche sonst das Princip des rotirenden Cylinders zugelassen haben würde, durchaus vereitelt.

Siemens hatte die glückliche Idee, sämmtliche mechanische Vermittlungsstücke ganz zu beseitigen und die Elektrizität selbst zeichnen zu lassen. Wenn ein elektrischer Funke, selbst ein ganz schwacher, aus einer Spitze auf eine fein polirte Stahlplatte überschlägt, lässt er auf derselben einen feinen dunklen Fleck zurück, der erst durch erneutes Poliren weggeschafft werden kann. Der elektrische Funke dauert aber nur einen unmessbaren Augenblick, die Verbreitung der Elektrizität durch einen Draht von der Länge, welche zur Ausmessung des Laufes einer Kugel in Betracht kommt, ebenfalls einen verschwindend kleinen



Zeittheil. Ist also in der Bahn der Kugel ein Drahtgitter mit isolirten Drähten aufgestellt, die abwechselnd mit der äusseren und inneren Belegung einer Leidener Flasche in Verbindung stehen, und ist der rotirende Cylinder mit der zugehörigen Spitze in den Entladungskreis mit eingefügt, so wird die Entladung in dem Augenblicke erfolgen, wo die Kugel durch das Drahtgitter hindurchschlagend die metallische Leitung zwischen den verschiedenen Drähten desselben herstellt. In demselben Augenblicke entsteht auch die Marke auf der betreffenden Stelle der Cylinderoberfläche. Für ein und dieselbe Kugel können beliebig viele Drahtgitter aufgestellt und Marken gemacht werden. Diese Methode erlaubt es, die ganze Genauigkeit, welche der rotirende Cylinder zulässt, nutzbar zu machen, also die Zeit bis auf Vierzigtausendtheile einer Secunde zu bestimmen. Dürfte man von der Verschiebung der Gitter durch die der Kugel vorausseilende comprimirt Luft absehen, so würde die Zeit zu messen sein, während welcher die Kugel um eine halbe Linie im Raume vorrückt.

Uebrigens sind durch die gemachten Angaben über die Drehungsgeschwindigkeit und die Theilung des Cylinders durchaus noch nicht die Grenzen bezeichnet, bis zu welchen die Genauigkeit dieses Verfahrens zu treiben sein würde; wo sich diese Grenzen finden werden, ist noch gar nicht zu beurtheilen. In der That hat ein anderes Verfahren, welches auf einer anderen Anwendung desselben Principes beruht, schon zu viel erstaunenswerthen Resultaten geführt. Bei Lichtphänomenen nämlich, deren Zeitdauer bestimmt werden soll, erleichtern sich die Schwierigkeiten der Ausführung bedeutend, wenn man statt des rotirenden Cylinders einen rotirenden Spiegel anwendet. Wenn man in einen Spiegel sieht und die Neigung seiner Fläche langsam ändert, so scheinen sich zugleich die von ihm entworfenen Spiegelbilder äusserer Gegenstände zu bewegen, und zwar mit einer doppelt so grossen Winkelgeschwindigkeit als der Spiegel. Sie bewegen sich dabei in einem Kreise, dessen Mittelpunkt die Drehungsaxe des Spiegels und dessen Radius gleich dem Abstände des Gegenstandes von dieser Axe ist. Für die Zeitmessung vertritt uns nun das im Kreise herumlaufende Spiegelbild die Stelle der rotirenden Cylinderfläche. Seine augenblick-

liche Stellung ist durch ein Fernrohr ebenso genau zu bestimmen als die der Marke auf der Cylinderfläche durch das Mikroskop. Da es aber auf einem Kreise von viel grösserem Radius sich bewegt, wächst bei derselben Zahl von Rotationen in der Secunde und hinreichender Güte des Fernrohres die Genauigkeit der Messung in demselben Verhältnisse, als der Radius des scheinbaren Weges des Spiegelbildes den Radius des kleinen Stahlcylinders übertrifft. Der Vortheil liegt darin, dass, ohne die Masse des bewegten Körpers zu vermehren, wodurch die mechanischen Schwierigkeiten der Ausführung des Apparates unverhältnissmässig wachsen, die Geschwindigkeit, vermittelt deren wir die Zeit in eine scheinbare Raumdistanz verwandeln, so mächtig wächst. Nehmen wir an, zwei Lichtblitze, z. B. zwei elektrische Funken, folgten sich sehr schnell an derselben Stelle, so werden sie im rotirenden Spiegel gesehen nicht mehr an derselben Stelle erscheinen, falls der Spiegel in der Zwischenzeit seine Lage merklich ändern konnte; durch Messung des Winkels, unter dem die Bilder nun erscheinen, wird sich berechnen lassen, wie gross die Zwischenzeit ihrer Erscheinung war. Die Erfindung des rotirenden Spiegels rührt von Wheatstone her, welcher damit einen Versuch gemacht hat, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Entladung einer Leidener Batterie zu bestimmen. Die kühnste Vollendung hat aber dieses Verfahren in diesem Jahre durch Foucault's und Fizeau's Ausführung eines von Arago gleich nach der Erfindung Wheatstone's vorgeschlagenen Versuches empfangen, welcher nichts weniger leistet, als die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes, bekanntlich etwa 40000 Meilen in der Secunde, auf einer Strecke von 12 Fuss entsprechend dem 77milliontesten Theile einer Secunde zu bestimmen. Zweck dieser Messungen war die Geschwindigkeit des Lichtes in der Luft mit der im Wasser vergleichen zu können, welches auf grössere Strecken nicht durchsichtig genug ist. Es mussten dazu die vollendetsten optischen und mechanischen Hilfsmittel aufgeboden werden, namentlich um eine Rotation des Spiegels bei Foucault's Apparat von 6 bis 800, in Fizeau's von 12 bis 1500 Umläufen in der Secunde zu erreichen. Durch Anwendung einiger sinnreichen Kunstgriffe, auf welche näher einzugehen



hier nicht der Ort ist, ist in der That die Ausführung solcher Messungen möglich geworden. Sie sehen, dass die Mikroskopie der Zeit die des Raumes bei weitem überflügelt hat.

Endlich habe ich noch eine Methode der Zeitmessung zu erwähnen, der ein ganz anderes Princip zu Grunde liegt. Ich habe dasselbe vorher so bezeichnet: die zu messende Zeit soll berechnet werden aus der Wirkung, welche eine während derselben wirkende Kraft von bekannter Grösse hervorgebracht hat. In der Ausführung ist nun diese Kraft die elektromagnetische Einwirkung einer Kupferdrahtspirale auf einen an einem Faden schwebenden Magneten. Ich erinnere daran, dass jede Spirale, aus übersponnenem Kupferdraht gewickelt, sich so lange wie ein Magnet, dessen Nordpol an einem ihrer Enden, dessen Südpol am anderen liegt, verhält, als sie von einem elektrischen Strome durchflossen wird. In der Nähe dieser Spirale hänge an einem Coconfaden ein Magnet. So lange kein Strom vorhanden ist, macht derselbe unter dem Einfluss der richtenden Kraft der Erde grössere oder kleinere Schwingungen, die nur äusserst langsam kleiner werden und nie ganz aufhören, weil kleine Luftströme und Veränderungen in der Richtung der erdmagnetischen Kraft immer neue Anstösse geben. Jetzt gehe ein Strom durch die Spirale. So lange dies geschieht, zieht ihr zugewandtes Ende den einen Pol des Magneten an, stösst den anderen ab. Dessen Bewegung wird dadurch jedenfalls verändert, und je nachdem ihre Richtung mit der der elektromagnetischen Kraft übereinstimmt oder nicht, entweder beschleunigt oder verlangsamt, oder auch umgewendet. Nachdem der Strom beendigt ist, macht der Magnet wiederum regelmässige Schwingungen, deren Grösse sich nur äusserst langsam ändert und daher mit voller Musse bestimmt werden kann. Diese Schwingungen werden aber wegen der Aenderung, die der elektrische Strom in der Geschwindigkeit des Magneten hervorgebracht hat, nicht mehr dieselbe Grösse haben wie die früheren. Da die Gesetze der Bewegung eines solchen Magneten ganz genau bekannt sind, lässt sich genau berechnen, um wie viel der Strom die Geschwindigkeit des Magneten in der Stellung, wo er ihn traf, verändern musste, um die beobachtete Aenderung in den Schwingungsbögen hervorzubringen, und daraus wieder,

wie lange er einwirken musste, um die betreffende Aenderung der Geschwindigkeit zu erzeugen. Die beste Art zu beobachten ist die, dass man den Strom einwirken lässt, wenn der Magnet gerade durch den Meridian geht und die Richtung seiner Bewegung der der elektromagnetischen Kraft gleichgerichtet ist. Dann wird die Berechnung der Zeit sogar sehr einfach; man braucht nur den Unterschied der Schwingungsbögen vor und nach Einwirkung des Stromes mit einem constanten Factor zu multipliciren. Die Grösse des letzteren hängt nur von der Stromstärke und der Schwingungsdauer des Magneten ab. Da man übrigens die elektromagnetische Kraft durch Vermehrung der Drahtwindungen der Spirale und der Elemente der galvanischen Batterie beliebig vermehren kann, so ist es auch möglich, in jedem beliebig kurzen Zeitraume eine merkliche Wirkung auf den Magneten hervorzubringen.

Bei den Anwendungen dieser Methode ist es nun nöthig zu bewirken, dass Anfang und Ende des erwähnten elektrischen Stromes, des zeitmessenden Stromes, wie wir ihn nennen wollen, genau mit Anfang und Ende des zu messenden Vorganges zusammentreffen, was bei verschiedenen Zwecken der Messung natürlich auf sehr verschiedene Weise zu bewerkstelligen ist. Diese Methode hat den grossen Vortheil, dass sie der Uhrwerke mit constanter Rotation nicht bedarf. Eigentlich ist bis jetzt die Aufgabe, solche Werke zu construiren, nur annähernd gelöst, und alle bedürfen einer fortdauernden Controlle ihrer Geschwindigkeit. Ueberhaupt sind verhältnissmässig einfachere und sicherer zu beherrschende Apparate dazu nöthig. Die erste Erfindung rührt von Pouillet her aus dem Jahre 1844, sie wurde von ihm für artilleristische Zwecke vorgeschlagen und auch in einigen Anwendungen durchgeführt, ist aber nicht weiter gebraucht worden, weil einige Specialitäten in Pouillet's Ausführung die Genauigkeit erheblich beeinträchtigen. Nach ihm habe ich sie zuerst wieder für physiologische Zwecke in Gebrauch gezogen. Dadurch, dass ich die elektromagnetischen Messungen mittels eines am Magneten befestigten Spiegels in der höchst bequemen und feinen Weise anstellte, wie sie von Gauss und W. Weber in Deutschland eingeführt ist, und den constanten Factor zur Verwandlung der Differenzen



¹² der Schwingungsbögen in die entsprechenden Zeitunterschiede in genauerer Weise als Pouillet ermittelte, konnte ich mit verhältnissmässig einfachen Apparaten genaue Bestimmungen bis zu $\frac{1}{10000}$ Secunde ausführen. Die Feinheit der Messung weiter zu treiben, lag nicht in meinem Interesse, würde im Gegentheile die Schwierigkeiten unnütz erhöht haben; übrigens lässt sich die Tragweite der Methode noch gar nicht ermessen.

Ich komme jetzt zu meinen Messungen über physiologische Vorgänge.¹⁾ Sie sehen, die Methoden sind da, um unendlich viel feinere Bestimmungen auszuführen, als wir vor der Hand gebrauchen können. Die Schwierigkeit bleibt aber, die Methoden für den speciellen Zweck anwendbar zu machen, die Verbindungsglieder zwischen dem Ereignisse, dessen Zeit bestimmt werden soll, mit dem zeitmessenden Apparate zu construiren. Nach den verschiedenen Zwecken der Messung müssen sogar verschiedene Methoden gebraucht werden. Im allgemeinen hat mir Pouillet's elektromagnetische Methode die besten Dienste geleistet; für einzelne Fälle ist aber der rotirende Cylinder vortheilhafter.

Meine bisherigen Messungen beziehen sich theils auf die Dauer und den Verlauf der Muskelzuckungen, theils auf die Geschwindigkeit, mit der sich ein auf die Nervenfasern gemachter Eindruck durch dieselben hin fortpflanzt. Die lebenden Muskeln des menschlichen und thierischen Körpers haben Sie sich vorzustellen als starke elastische Bänder, welche zwischen den einzelnen Theilen des Knochengerüsts gespannt, bei ruhender Lage der Glieder entweder vollständig erschlaft sind, oder sich gegenseitig mit ihren Spannungen im Gleichgewichte halten. Die elastischen Kräfte dieser Bänder haben aber die eigenthümliche Eigenschaft, durch den Einfluss der Nerven sich sehr plötzlich ändern zu können. Man bezeichnet diesen durch Einfluss der Nerven, durch Innervation, geänderten Zustand der Muskeln als den der Thätigkeit. Der ¹³ thätige Muskel verhält sich ebenfalls wie ein elastisches Band, aber er strebt sich viel kräftiger und bis zu viel höherem Grade

1) Ausführlich dargestellt in den beiden vorausgehenden Aufsätzen.

zu verkürzen als der unthätige. Die Folge dieser Veränderung am lebenden Körper ist nun, dass die Kraft des thätig gewordenen Muskels die der unthätig gebliebenen überwiegt, dass er so das bestehende Gleichgewicht der Glieder stört und seine knöchernen Ansatzpunkte sich zu nähern zwingt. Im lebenden Körper empfängt der Muskel die Anregung zu seiner Thätigkeit von den in ihm verbreiteten Nervenfasern, diese wieder die ihrige vom Gehirn; hier ertheilt ihnen der geheimnissvolle Einfluss des Willens einen Anstoss unbekannter Art, welcher längs der ganzen Länge der Faser sich fortpflanzt, und im Muskel angekommen, seine Thätigkeit erregt. Modernisiren wir das Bild des Menenius Agrippa, der die hungernden Plebejer durch eine kluge Vergleichung des Staates mit dem menschlichen Körper zu beschwichtigen wusste, so dürfen wir die Nervenfasern nicht unpassend mit den elektrischen Telegraphendrähten vergleichen, welche einmal augenblicklich jede Nachricht von den äussersten Grenzen her dem regierenden Centrum zuführen, und dann ebenso dessen Willensmeinung nach jedem einzelnen Theile des Ganzen zurückbringen, um daselbst in Ausführung zu kommen. Die Hauptfrage, welche ich zu entscheiden bemüht gewesen bin, ist die: Vergeht eine angebbare Zeit bei der Beförderung einer solchen Nachricht, welche von den entfernten Enden der empfindenden Hautnerven oder den Nervenbreiten in den Sinnesorganen nach dem Gehirn hineilt, oder einer solchen, welche der Wille vom Gehirn durch die motorischen Nervenfasern zu den Muskeln hinsendet?

Das erscheint vielleicht unwahrscheinlich. Wir haben nie etwas der Art an uns selbst wahrgenommen. Wenn wir aber bedenken, welche geringe Genauigkeit unsere Zeitwahrnehmungen haben, und dass wir natürlich nicht schneller wahrnehmen können, als unsere Empfindungsnerven, die nothwendigen Vermittler aller unserer Wahrnehmungen, diese uns zukommen lassen, so werden Sie leicht einsehen, dass uns die Aussagen unserer eigenen Erfahrung keine Richtschnur abgeben können. Frühere ¹⁴ physiologische Theorien waren geneigt, als das in den Nerven sich verbreitende Agens die Elektrizität oder ein ihr ähnliches Imponderabile anzusehen, und glaubten demselben demgemäss auch eine ungeheuer grosse Fortpflanzungsgeschwindigkeit zu-



schreiben zu müssen. Die neuesten bewunderungswürdigen Untersuchungen von du Bois-Reymond über die elektromotorischen Wirkungen der Muskeln und Nerven haben aber Thatsachen nachgewiesen, welche gar nicht zu verstehen sind, als unter der Annahme, es sei die Leitung eines solchen Reizungszustandes von den Enden der Empfindungsnerven zum Gehirn oder vom Gehirn zum Muskel durchaus immer mit einer Umlagerung der wägbaren Theilchen des Inhaltes der Nervenfasern verbunden; es beruhe also diese Leitung auf der Wirkung wägbarer Theilchen aufeinander. Sie gehört folglich etwa in die Ordnung der physikalischen Ereignisse, zu denen die Fortpflanzung des Schalles gehört, und dadurch schon würde eine so extravagante Geschwindigkeit der Fortpflanzung unwahrscheinlich.

Ich musste mit den einfachsten Verhältnissen die Untersuchung anfangen. Ich wählte dazu einen Froschmuskel, der nur noch mit seinem motorischen Nervenstrange, aber nicht mehr mit dem Thiere und den Centralorganen des Nervensystems zusammenhing. Ein solches Präparat behält lange genug ohne beträchtliche Veränderung seine Lebenseigenschaften, sodass man bei passender Anordnung 2 bis 3 Stunden hintereinander Versuche mit constantem Erfolg an ihm wiederholen kann, was bei den abgetrennten Theilen warmblütiger Thiere nicht der Fall ist. Wenn man irgend eine Stelle des Nervenstranges zerzt, schneidet, anätzt, am leichtesten aber, wenn man einen elektrischen Strom hindurchgehen lässt, d. h. wenn man nach dem technischen Ausdrucke der Physiologie eine Stelle reizt, erregt diese Reizung dasselbe, was sonst nur vom Gehirn durch den Willen erregt wird. Der Muskel zuckt, d. h. er geht auf einen Augenblick in Thätigkeit über; die Zuckung geht so schnell vorüber, dass man die einzelnen
15 Stadien ihres Verlaufes nicht erkennen kann. Es kommt also jetzt darauf an, zu entscheiden, ob die Zuckung später eintritt, wenn eine entferntere Stelle gereizt wird, die Reizung also eine grössere Strecke des Nerven zu durchlaufen hat. Wir müssen demnach die Zeit messen, welche zwischen der Reizung einer bestimmten Nervenstelle und der Zuckung vergeht. Aus den Versuchen ergab sich aber, dass die Thätigkeit des Muskels

keineswegs momentan fertig da ist, sondern erst einige Zeit nach der Reizung eintritt, allmählig ansteigt, endlich erst schneller, dann langsamer wieder sinkt, sodass der grösste Theil derselben nach $\frac{1}{3}$ Secunde, der letzte Rest aber erst nach mehreren ganzen Secunden verschwunden ist. Wir konnten das bisher an den Muskeln, welche den willkürlichen Bewegungen dienen, wegen der Schnelligkeit der Zuckung nicht erkennen; wir wussten es aber schon von denen, welche die unwillkürlichen Bewegungen ausführen, z. B. denen des Darmes, der Iris, den Fäserchen, welche in den Gefässwandungen, an den Drüsen etc. vorkommen. Bei diesen geht dasselbe nämlich in 100 oder 1000-mal längeren Zeiträumen vor sich, sodass wir die einzelnen Stadien sehr gemächlich unterscheiden können. Da demnach der Eintritt der Zuckung nicht scharf abgegrenzt ist, so können wir ihn nicht als Endpunkt der zu messenden Zeit anwenden, sondern wir müssen dazu den Eintritt einzelner bestimmter Stufen der Zuckung benutzen, d. h. also die Augenblicke, wo die Thätigkeit des Muskels bestimmte, genau zu messende Werthe erreicht. Dabei müssen wir uns aber zugleich versichern, dass die Zeitunterschiede, welche wir etwa finden sollten, nicht von einer ungleichmässigen Thätigkeit des Muskels herrühren, dass vielmehr die Stärke und der zeitliche Verlauf seiner Zuckung genau dieselben sind, welche Stelle des Nerven auch gereizt werden möge. Es ist deshalb unser Zweck, nur durch Reihen von Beobachtungen zu erreichen, welche ergeben müssen, dass sämtliche einzelne Stufen der Thätigkeit um ein Gleiches später eintreten, wenn die Reizung durch eine längere Nervenstrecke hinablaufen muss. Das findet sich aber in der That so.

Die Messungen wurden nach der elektromagnetischen Methode ausgeführt. Die Bedingungen derselben erfordern, dass der zeitmessende Strom beginne im Augenblicke einer momentanen Reizung des Nerven, diese wurde durch einen anderen elektrischen Strom von verschwindend kleiner Dauer bewirkt, — dass er endige in dem Augenblicke, wo ein bestimmtes Stadium der Zuckung des Muskels, d. h. eine bestimmte genau gemessene Vermehrung seiner Spannung eingetreten war. Der Muskel öffnete zu dem Behufe selbst durch seine Zusammen-



ziehung die Leitung des Stromes, musste aber dabei den Widerstand eines gewissen Gewichtes überwinden, und konnte den Strom erst in dem Augenblicke unterbrechen, wo seine Spannung die Schwere dieses Gewichtes zu übertreffen anfang. Die Unterbrechungsstelle wird durch zwei Metallstücke gebildet, welche mit den beiden Enden der galvanischen Batterie leitend verbunden sind. So lange sie sich berühren, kreist der Strom ungehindert, sowie sie aber um den kleinsten denkbaren Zwischenraum getrennt werden, hört der Strom augenblicklich in der ganzen Leitung ganz auf. Es ist also dazu nicht nöthig, eine Bewegung von einer messbaren Ausdehnung auszuführen, wobei Zeit verloren gehen würde, sondern der zeitmessende Strom wird beendet, sowie der Muskel eines der Metallstücke nur zu bewegen anfängt, und das geschieht, sowie seine Spannung den bezeichneten Grad erreicht hat. Dass die Wirklichkeit dieser theoretischen Ableitung entspreche, davon habe ich mich durch besondere Controlversuche überzeugt.

Die Messungsreihen des Zeitraumes zwischen Reizung und Anfang der Zusammenziehung zeigten so viel Regelmässigkeit als nur irgend zu erwarten war; der wahrscheinliche Fehler der Mittelzahl gut gelungener Reihen betrug nur $\frac{1}{400}$ des ganzen Werthes. Der Unterschied zwischen den Messungen, bei welchen verschiedene Nervenstellen gereizt wurden, war allerdings wegen der geringen Länge des Nerven sehr klein, 1 bis 2 Tausendtheile einer Secunde, aber doch noch 10mal so gross als der wahrscheinliche Fehler der Messungsergebnisse. Es ergab sich daraus als wahrscheinlichster Werth der Fortpflanzungsgeschwindigkeit in den motorischen Nerven des Frosches 26,4 Meter, d. h. etwa 80 Fuss in der Secunde. Diese Grösse ist allerdings unerwartet gering, mehr als 10mal kleiner als die Schallgeschwindigkeit in der Luft.

Für warmblütige Thiere liess sich diese Methode nicht anwenden, weil sie ausgedehnte Messungsreihen von 2 bis 3 Stunden Dauer forderte, in denen sich der Zustand des Präparates nicht merklich ändern durfte. Ich habe deshalb gegenwärtig einen Apparat mit rotirendem Cylinder durch Herrn E. Rekoss erbauen lassen, mit dem ich die ersten Probeversuche an Fröschen angestellt habe, und der vielleicht

auch für warmblütige Thiere zu brauchen sein wird. Das Princip des Gebrauchs ist nicht ganz dasselbe wie bei dem Apparate von Siemens. Der Cylinder, ausserordentlich genau von Glas ausgeführt, steht senkrecht; zum Versuch wird seine Oberfläche dünn berusst, auf ihr zeichnet eine Spitze, welche mittels einer Hebelverbindung vom Muskel getragen wird und in die Höhe steigt, wenn er sich zusammenzieht. So lange die Spitze unbewegt in gleicher Höhe bleibt, zeichnet sie also eine horizontale Kreislinie auf der rotirenden Cylinderfläche. Stände der Cylinder still und zuckte der Muskel, so würde sie einen einfachen, senkrechten Strich machen. Rotirt aber der Cylinder, während der Muskel zuckt, so zeichnet sie eine an- und dann wieder absteigende Curve. Reizt man nacheinander zwei verschiedene Nervenstellen und fällt dabei der Augenblick der Reizung genau mit derselben Stellung der Spitze auf dem Cylinder zusammen, so entstehen zwei congruente Curven, die aber in horizontaler Richtung gegeneinander verschoben sind, die Grösse der Verschiebung entspricht der Fortpflanzungszeit der Reizung in der Nervenstrecke. Dabei controllirt jeder einzelne Versuch, ob der zeitliche Verlauf und die Stärke der Zuckung im Muskel bei beiden Reizungen gleich waren. Wenn das der Fall ist, sind nämlich die beiden Curven congruent, wenn nicht, incongruent. So vertritt jeder einzelne Versuch ¹⁸ die Stelle einer ganzen Versuchsreihe des früheren Verfahrens, aber freilich habe ich bisher noch nicht denselben Grad von Genauigkeit und Uebereinstimmung wie bei jenem erreicht.

Wie verhält sich nun die Sache beim Menschen? Wir müssen am Menschen unter sehr viel complicirteren Verhältnissen experimentiren als am Froschpräparat, wir können den noch nicht speciell gekannten Einfluss der Nervenleitungen im Gehirn und Rückenmark nicht nur nicht beseitigen, sondern müssen ihn sogar nothwendig mitbenutzen. Nachdem sich aber durch strenge Versuche feststellen liess, dass in den Froschnerven eine merkliche Zeit zur Fortpflanzung der Reizung nöthig ist, glaube ich nicht Anstand nehmen zu dürfen, meine bis jetzt ausgeführten Versuche am Menschen so zu deuten:

Die Nachricht von einem Eindruck, der auf das Hautende empfindender Nerven gemacht ist, pflanzt sich mit einer zu



verschiedenen Zeiten und bei verschiedenen Individuen nicht merklich variirenden Geschwindigkeit von etwa 60 Meter (180 Fuss) nach dem Gehirn zu fort. Im Gehirn angekommen, vergeht eine Zeit von etwa $\frac{1}{10}$ Secunde, ehe der Wille auch bei der angespanntesten Aufmerksamkeit die Botschaft an die Muskelnerven abzugeben im Stande ist, vermöge welcher gewisse Muskeln eine bestimmte Bewegung ausführen sollen. Diese Zeit variirt besonders nach dem Grade der Aufmerksamkeit bei verschiedenen Personen und zu verschiedenen Zeiten bei derselben Person, und ist bei laxer Aufmerksamkeit sehr unregelmässig und lang, bei gespannter dagegen sehr regelmässig. Nun läuft die Botschaft wahrscheinlich mit derselben Geschwindigkeit nach den Muskeln hin, und endlich vergeht noch etwa $\frac{1}{100}$ Secunde, ehe der Muskel sich nach ihrer Empfangnahme in Thätigkeit setzt. Im Ganzen vergehen also von der Reizung der sensiblen Nervenenden bis zur Bewegung des Muskels $1\frac{1}{4}$ bis 2 Zehnthelle einer Secunde. Die Messungen werden ähnlich ausgeführt wie die an Fröschen die Zwischenzeit der Reizung und der Muskelwirkung betreffenden. Es wird einem Menschen ein ganz leichter elektrischer Schlag an irgend einer beschränkten Hautstelle beigebracht, und derselbe ist angewiesen, wenn er den Schlag fühlt, so schnell es ihm möglich ist, eine bestimmte Bewegung mit der Hand oder den Zähnen auszuführen, durch welche der zeitmessende Strom unterbrochen wird. Es kann also nur immer die Summe der vorher bezeichneten einzelnen Zeiträume gemessen werden. Wenn wir aber den Eindruck auf die Empfindungsnerven von verschiedenen Hautstellen, dem Gehirn bald nahe, bald entfernt, ausgehen lassen, so ändern wir von der ganzen Summe nur das erste Glied, die Fortpflanzungszeit in den empfindenden Nerven. Wenigstens dürfen wir wohl annehmen, dass die Vorgänge des Wahrnehmens und des Wollens im Gehirn in ihrer Dauer nicht wesentlich von dem Ort der getroffenen Hautstelle abhängen werden. Ich muss aber dies als eine nicht vollständig erwiesene Annahme anerkennen; erweisen lässt sich nur, dass sie nicht von der Empfindlichkeit der Hautstelle, oder etwa von bestimmten besonderen physiologischen Beziehungen derselben zu den zu bewegenden Muskeln abhängen. Der Ver-

lauf in den motorischen Nerven und im Muskel ist schliesslich natürlich gleich. Wahrscheinlich gemacht wird unsere Deutung dadurch, dass der Zahlenwerth der Fortpflanzungsgeschwindigkeit, wie er sich aus den verschiedenen Combinationen der Beobachtungen ergibt, bei denen die Empfindung durch das Gehör, durch die Haut des Gesichtes, des Nackens, der Hände, des Kreuzbeines, der Füsse, aufgenommen ist, hinreichend gut übereinstimmt. Es ergibt sich z. B., dass eine Nachricht vom grossen Zehen etwa $\frac{1}{30}$ Secunde später ankommt als eine vom Ohr oder Gesicht. Wenn man nun von der gemessenen Summe der einzelnen Zeiträume das abzieht, was den Nervenleitungen in den empfindenden und bewegenden Fasern angehört, und die aus anderen Versuchen bekannte Zeit, während welcher der Muskel sich in Bewegung setzt, so bleibt die Zeit übrig, welche im Gehirn vergeht, um die von den Empfindungsnerven empfangene Depesche an die motorischen abzugeben.

Andere Versuche am Menschen, die ganz denen am Frosche entsprachen, indem auch die motorischen Nerven direct gereizt wurden, gaben bis jetzt keine genauen Zahlenresultate, wiesen aber auf andere hierher gehörende interessante Verhältnisse hin. Man kann nämlich durch die Haut hindurch die motorischen Nerven der Vorderarmmuskeln mittels schwacher, ganz leicht erträglicher elektrischer Schläge in Zuckung versetzen, wie den Muskel des Froschpräparates. Dabei werden Hand und Finger gebeugt und es stellt sich heraus, dass diese Bewegungen vom Willenseinfluss deshalb ganz unabhängig sind, weil der Wille, durch die sensiblen Nerven von dem erfolgten elektrischen Schlage benachrichtigt, nicht zeitig genug seine Wirkung auf die Muskeln ausüben kann. Eine solche Versuchsreihe, wo die Hand sehr schnell wieder zurückfiel und es gerade darauf ankam, sie in der gebogenen Lage zu erhalten, in welche sie durch die Zuckung der Vorderarmmuskeln versetzt war, misslang deshalb gänzlich, weil der Willenseinfluss auf den Muskel immer erst anlangte, nachdem die Hand schon wieder zurückgefallen war und sie dann nur zum zweiten Male erhob.

Wir sehen also in der That, wenn wir an das zurückdenken, was ich im Anfange meiner Vorlesung über die Grenze der Ungenauigkeit unserer Zeitwahrnehmungen erwähnt habe,



dass die wirklich vorhandenen Zeitunterschiede in solchen Nervenvorgängen, welche wir als gleichzeitig voraussetzen gewöhnt sind, ganz nahe an jene Grenze heranstreifen, und dass uns wohl deshalb eben nicht feinere Unterscheidungen möglich sind, weil unsere Nerven nicht schneller arbeiten können. Die Astronomie lehrt uns, dass wir wegen der Fortpflanzungszeit des Lichtes jetzt sehen, was sich in der Fixsternwelt vor Reihen von Jahren zugetragen hat; dass wir wegen der Fortpflanzungszeit des Schalles später hören als sehen, lehrt uns die tägliche Erfahrung. Glücklicherweise sind die Strecken kurz, welche unsere Sinneswahrnehmungen zu durchlaufen haben, ehe sie zum Gehirn kommen, sonst würden wir mit unserem Bewusstsein weit hinter der Gegenwart und selbst hinter den Schallwahrnehmungen herhinken; glücklicherweise sind sie so kurz, dass wir die Verzögerung nicht bemerken und in unserem praktischen Interesse nicht dadurch berührt werden. Für einen ordentlichen Wallfisch ist es vielleicht schlimmer; denn aller Wahrscheinlichkeit nach erfährt er vielleicht erst nach einer Secunde die Verletzung seines Schwanzes und braucht eine zweite Secunde um dem Schwanz zu befehlen, er solle sich wehren.

LXXXVIII.

Ueber die Geschwindigkeit einiger Vorgänge in Muskeln und Nerven.

Monatsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin.
15. Juni 1855.

Ich erlaube mir, der Akademie folgende Resultate weiterer Untersuchungen über die Zeitverhältnisse bei der Thätigkeit der Muskeln und Nerven mitzutheilen, welche ich mittels der in J. Müller's Archiv für Anat. und Physiol. 1852. S. 199 beschriebenen Methode gewonnen habe, wobei der zuckende Muskel auf einem rotirenden Cylinder Curven verzeichnet, deren senkrechte Ordinaten der Grösse der Zusammenziehung proportional sind.

Ich erinnere daran, dass nach einer momentanen elektrischen Reizung des Muskels oder seines Nerven zunächst ein Zeitraum folgt, während dessen die mechanischen Eigenschaften des Muskels keine Veränderung zeigen, ein Zeitraum der latenten Reizung. Dann wächst die Spannung des Muskels eine Zeit lang, bis sie ein Maximum erreicht (Zeitraum der steigenden Energie) und sinkt wieder, erst schnell, später sehr allmählig, bis schliesslich der frühere Zustand der Ruhe wieder eingetreten ist. (Zeitraum der sinkenden Energie.)

1) Eintritt der secundären Zuckung vom Muskel aus. Der Hüftnerv eines Frosches wurde gereizt; an dem zugehörigen Wadenmuskel war ein künstlicher Querschnitt angelegt. Ueber diesen und den natürlichen Längsschnitt des Muskels war ein zweiter Nerv hingebreitet, dessen Muskel



secundär mitzuckte, und seine Zuckung auf dem Cylinder verzeichnete. Eine zweite Zuckung desselben Muskels wurde von seinem eigenen Nerven aus erregt. Dabei fielen vermöge einer schon früher beschriebenen Einrichtung des Apparates in den beiden gezeichneten Zuckungscurven die Punkte, welche den beiden Augenblicken der Reizung entsprechen, genau zusammen. Zu einem gelungenen Versuche gehört, dass beide Curven von gleicher Grösse und Form seien. Der horizontale Abstand zwischen beiden Curven entspricht dann dem Zeitraume, um welchen die secundäre Zuckung des Muskels später eintrat als die primäre. Dieser Zeitraum war in allen Fällen viel grösser als der Unterschied, der von der verschiedenen langen, von der Reizung durchlaufenen Nervenlänge abhängen würde; er war aber kleiner, etwa halb so gross als der der latenten Reizung des Muskels. Diese Grösse überstieg er übrigens in keinem Falle beträchtlich, auch dann nicht, wenn die secundäre Zuckung anfang schwächer zu werden als die primäre. Daraus folgt, dass die negative Schwankung des Muskelstromes früher eintritt als die Zusammenziehung des Muskels. Am schnellsten scheint der Muskelstrom seine Stärke zu ändern etwa während der Mitte der Periode der latenten Reizung. Ueber Anfang und Ende der negativen Stromesschwankung lässt sich aber aus meinen Versuchen nichts bestimmen.

2) Eintritt der secundären Zuckung vom Nerven aus. Es gelang mir nur in wenigen Fällen, diese Art der secundären Zuckung bei einmaliger Reizung in gleicher Stärke zu erhalten wie die primäre. Um die Unterschiede in der Länge der Nervenleitung zu eliminiren, wurde die dem zeichnenden Muskel nähere Hälfte seines Nerven in Berührung mit der entsprechenden Hälfte eines zweiten Nerven gebracht, und dann wurden nacheinander die peripherischen Enden beider Nerven gereizt und zwar, um unipolare Zuckungen zu vermeiden, durch den Strom einer kleinen Daniell'schen Batterie, für deren Strom die stromunterbrechenden Theile des Apparates bis zum Augenblicke der Reizung eine Nebenschliessung bildeten.

Die Versuche ergaben, dass die secundäre Zuckung vom Nerven aus nicht merklich später eintritt als die primäre. Daraus folgt, dass der elektotonische Zustand des

Nerven nicht merklich später eintritt als der ihn erregende elektrische Strom.

3) Reizung durch zwei schnell aufeinander folgende elektrische Schläge. Zwei inducirende Drahtspiralen waren einer und derselben dritten inducirten Spirale genähert, deren Enden mit dem Nerven des zeichnenden Muskels verbunden waren. Die beiden Leitungen der inducirenden Spiralen wurden kurz nacheinander durch den zeichnenden Apparat und einen besonderen Hilfsapparat unterbrochen, welcher letztere die zweite Unterbrechung um eine genau bestimmte Zeit später als die erste ausführte. Die Dauer dieser Zwischenzeit konnte aber von einer Versuchsreihe zur anderen verändert werden. Ich liess den Muskel in der Regel drei Curven auf gleicher Abscissenlinie zeichnen, eine, wo nur die erste inducirende Spirale von einem Strome durchflossen war, Curve der ersten Reizung, eine, wo dies nur mit der zweiten der Fall war, Curve der zweiten Reizung, und eine, wo beide wirkten, Curve der doppelten Reizung.

Wenn beide elektrische Schläge stark genug sind, um jeder allein das Maximum momentaner Reizung im Muskel hervorzubringen, so sind die Curven der ersten und zweiten Reizung von congruenter Form und liegen nur über verschiedenen Theilen der Abscissenlinie. Die senkrechten Ordinaten der Curve der doppelten Reizung sind keineswegs, wie man vielleicht erwarten möchte, nahe gleich der Summe der betreffenden Ordinaten der Curven der einfachen Reizungen. Im Anfange fällt natürlich die Curve der doppelten Reizung mit der der ersten Reizung zusammen, bis die Periode der Latenz auch für die zweite Reizung vorübergegangen ist; dann erhebt sich die Curve der doppelten Reizung über die der ersten Reizung und verläuft von nun ab ziemlich parallel mit der sich unter ihr von der Abscissenlinie erhebenden Curve der zweiten Reizung bis zum Maximum, und kehrt dann erst im Stadium der sinkenden Energie zur Curve der zweiten Reizung und zur Abscissenlinie zurück.

So lange also die zweite Reizung latent ist, stören sich die beiden Vorgänge im Muskel nicht. Von da an aber, wo die zweite Reizung wirksam wird, verläuft die Zuckung nahehin



so, als wäre der in diesem Augenblicke stattfindende Contractionszustand des Muskels sein natürlicher Zustand, und die zweite Zuckung allein eingeleitet worden, bis im Stadium der sinkenden Energie der Muskel zu seinem früheren Ruhestande zurückkehrt.

Aus dieser Regel ergibt sich in Uebereinstimmung mit den Versuchen, dass zwei momentane Reizungen die stärkste Zusammenziehung eines Muskels dann hervorbringen, wenn ihre Zwischenzeit gleich ist der Länge des Zeitraumes der steigenden Energie. Dann geht natürlich die zweite Zusammenziehung vom Maximum der ersten aus, und die stärkste Verkürzung des Muskels wird fast doppelt so gross als die Verkürzung nach einer einfachen Reizung. Auffallend ist dabei, was übrigens auch aus der aufgestellten Regel hervorgeht, dass diese stärkste Verkürzung zu einer Zeit eintritt, wo die Wirkung der ersten Reizung, wenn ihr keine zweite gefolgt wäre, fast ganz wieder verschwunden gewesen wäre.

Dagegen wirken zwei Reizungen nicht stärker als eine einzige Reizung, wenn ihre Zwischenzeit so klein ist, dass beim Anfange der zweiten Zuckung die erste noch keine merkliche Höhe erreicht hat. Dies findet statt, wenn die Zwischenzeit beider Schläge kleiner ist als ungefähr $\frac{1}{600}$ Secunde.

Sind die Schläge aber so schwach, dass jeder einzelne nicht das Maximum der Reizung hervorzubringen vermag, so verstärken sie sich auch bei der kleinsten Zwischenzeit.

Die Verkürzung des Muskels bei diesen zusammengesetzten Zuckungen kann, wie schon Ed. Weber gezeigt hat, nur ein gewisses Maximum erreichen, und wenn sie sich diesem nähert, fällt sie stets etwas kleiner aus, als die aufgestellte Regel fordern würde.

Uebrigens sah ich auch bei Hrn. Prof. Volkmann im vorigen Sommer Zeichnungen von Doppelzuckungen, die derselbe, ohne von meinen Untersuchungen zu wissen, hatte ausführen lassen.

332 4) Eintritt der reflectirten Zuckungen. Ich reizte Gefühlsnerven geköpfter oder strychninisirter Frösche und liess die Zuckung des Wadenmuskels aufzeichnen. Als vorläufiges Resultat hebe ich hervor, dass im Vergleich zur Fortpflanzungs-

geschwindigkeit in den Nerven die reflectirten Zuckungen erst nach verhältnissmässig langen Zwischenzeiten eintreten. Der Unterschied zwischen dem Eintritte durch Reizung des Hüftnerven direct erregter und reflectirter Zuckungen pflegt $\frac{1}{30}$ bis $\frac{1}{10}$ Secunde und mehr zu betragen, sodass auch bei den scheinbar blitzschnell eintretenden Strychninreflexen die Uebertragung der Reizung im Rückenmark eine mehr als 12mal so grosse Zeit in Anspruch nimmt als die Leitung in den betreffenden sensiblen und motorischen Nerven.

Dadurch wird es möglich, direct erregte und reflectirte Zuckungen zu unterscheiden, was für die Mechanik des Rückenmarkes von grosser Wichtigkeit zu werden verspricht. Ja, selbst wenn die Reizung des Hüftnerven gleichzeitig, insofern sie motorische Fasern trifft, eine directe Zuckung, und insofern sie sensible trifft, eine reflectirte auslöst, erkennt man in der Zeichnung der Zuckung sehr deutlich die Stelle, wo zu der directen sich die reflectirte hinzugesellt.