



LXXXIX.

Die Resultate der neueren Forschungen über
thierische Elektricität.

Aus der Allgemeinen Monatsschrift für Wissenschaft und Literatur.
Kiel, April 1852. S. 294—309 und 366—377.

294 Die Grundlage der äusseren Körpergestalt des Menschen und der Wirbelthiere bilden die ineinander gelenkten knöchernen Theile des Skeletts. An den Knochen sind zunächst die Muskeln befestigt, starke elastische Fleischbänder, welche die Hauptmasse der Gliedmaassen und der Rumpfwände bilden. Deren wichtigste Eigenschaft ist die Veränderlichkeit ihrer elastischen Spannung, weil sie dadurch in den Stand gesetzt werden, den knöchernen Stützen des Körpers die verschiedensten Stellungen gegeneinander zu geben. Denn letztere folgen jedesmal, soweit es die Construction ihrer Gelenke erlaubt, dem Zuge derjenigen sie umgebenden Muskeln, deren Spannung zur Zeit überwiegt. In der Tiefe der Glieder, wohl geschützt vor allen äusseren Eingriffen und Verletzungen, verlaufen von jedem Muskel aus verhältnissmässig winzige weisse Fädchen, die Nerven, bis zum Gehirn, dem Sitz des bewussten Willens. Aber trotz ihrer unscheinbaren Grösse sind sie es, welche die mächtigen mechanischen Wirkungen der Muskeln vermitteln, sie bilden den Weg, auf welchem der geheimnissvolle Einfluss des Willens vom Gehirn zu den Muskeln sich hin erstreckt, diese spannt oder abspannt, stark oder schwach, blitzschnell oder dauernd, einzeln oder in Gruppen, und dadurch die unendlich mannigfaltigen, stets wechselnden Stellungen und Be-

wegungen des Körpers zu Stande bringt. Den vorläufig noch unbekannten Einfluss, vermöge dessen die Nerven die Spannung der zugehörigen Muskeln hervorrufen, nennen wir die Innervation. Um eine Anschauung von der Grösse der dadurch erregten mechanischen Kräfte zu geben, führe ich als Beispiel an, dass der Wadenmuskel eines Mannes während seiner Innervation einen Zug von nicht weniger als drei Centnern auf das Fersenbein ausübt. Durchschneiden wir aber die Nervenfädchen eines solchen Muskels, pressen wir sie oder schnüren sie mit einem Faden zusammen, so verfällt der mächtige Bewegungsapparat in Unthätigkeit, keine Anstrengung des Willens kann ihn mehr aus seiner Erschlaffung erwecken, er ist zu ewiger Ruhe verdammt, wenn nicht etwa ein günstig verlaufender Heilungsprocess die Integrität des leitenden Nervenfadchens wieder herstellt. Wir nennen die Nervenfasern, welche den Einfluss des Willens zu den Muskeln hinleiten, motorische oder Bewegungsnerven. Es giebt noch eine andere Classe derselben mit nicht weniger wunderbaren und wichtigen Verrichtungen, die sensiblen oder Empfindungsnerven. Sie bringen die Nachricht von jeder äusseren Einwirkung, welche irgend einen Körpertheil getroffen hat, zum Gehirn, und hier wird diese Nachricht als Empfindung wahrgenommen. Drückt man die sensiblen Nerven eines Theiles, so wird seine Empfindung zeitweise, zerstört man sie, so wird sie für immer aufgehoben. Man mag dann einen solchen Theil stechen, brennen, schneiden, Martern aller Art und Grösse unterwerfen, sein Inhaber fühlt davon nicht mehr, als wenn das Glied einem anderen Menschen angehörte und er die Rolle des müssigen Zuschauers zu spielen hätte. Solche Schmerzensfreiheit darf uns aber nicht als ein wünschenswerther Vorzug erscheinen; denn der Schmerz ist es, der alle Kräfte zum Schutz jedes einzelnen Theiles aufzubieten zwingt, er bildet die unmittelbarste Verknüpfung der Interessen aller, und der schmerzfreie Theil wird das Spiel äusserer schädlicher Einflüsse, falls nicht bewusste Einsicht es übernimmt, den natürlichen Schutz des Schmerzes zu ersetzen.

Fasern, welche Empfindungen, und solche, welche Be-



wegungsantriebe fortleiten, sind an den meisten Nervenstämmen des Körpers gemischt und nur in den Wurzeln dieser Stämme, welche aus dem Rückenmark, und einigen, die aus dem Gehirn hervortreten, gesondert. Uebrigens ist das Aussehen und die Structur beider Classen von Fasern vollkommen gleich, sodass an ausgeschnittenen Nervenstücken durchaus nicht mehr ermittelt werden kann, welcher Classe sie angehören.

Nach dem bisher Gesagten leiten die Nerven gewisse Veränderungen oder Thätigkeiten fort, welche, auf einen Muskel übertragen, Bewegung, im Gehirn aber Empfindung hervorbringen. Sie vermögen aber noch mehr; sie sind nicht bloss passive Leiter, sondern sie können auch an jeder Stelle ihres Verlaufes active Erreger dieser selben Thätigkeiten werden. Jede hinreichend kräftige und plötzliche Einwirkung auf einen motorischen Nerven, möge er nun vom Gehirn getrennt sein oder mit ihm zusammenhängen, erregt eine Zusammenziehung des zugehörigen Muskels, jede Einwirkung auf den Stamm eines Empfindungsnerven bringt darin eine Veränderung hervor, welche nach dem Gehirn fortgeleitet ähnliche Empfindungen erregt, wie sie sonst von dem Organe aus erregt zu werden pflegen, in dem sich der Nerv verbreitet. Die Einwirkungen der verschiedensten Art, Schneiden, Quetschen, Brennen, Aetzen, elektrische Entladungen u. s. w. haben im Nerven immer denselben Erfolg. Die Physiologie pflegt sie deshalb unter dem gemeinschaftlichen Namen der Reize zusammenzufassen. Die unbekannte Veränderung, welche durch ihre Einwirkung im Nerven hervorgebracht und zum Gehirn oder Muskel fortgeleitet wird, bezeichnen wir demgemäss als Zustand der Reizung, und die Fähigkeit, bei der Reizung Empfindung und Bewegung hervorzurufen, als Reizbarkeit.

Ich bemerke hier noch für das Verständniß der später beschriebenen Versuche, dass die Reizbarkeit der Muskeln ²⁹⁶ und Nerven eines thierischen Theiles nicht gleich aufhört, wenn man ihn vom Ganzen abtrennt oder das Thier plötzlich tödtet. Die Lebensthätigkeiten der verschiedenen Organe des Körpers sind allerdings mehr oder weniger voneinander abhängig, und wenn eine der wesentlicheren Verrichtungen gestört wird, hören allmählig auch alle übrigen auf. Als Augen-

blick des Todes bezeichnen wir gewöhnlich den Augenblick, wo sämtliche Functionen des Gehirns aufhören; aber der Tod des Gehirns greift erst durch mehrere Zwischenglieder die Verrichtungen der übrigen Organe an. Zunächst hören die Athmungsbewegungen auf, mit ihnen die Aufnahme von neuem Sauerstoff in das Blut, und da sämtliche Organe zur dauernden Ausführung ihrer eigenthümlichen Thätigkeiten der Zufuhr sauerstoffhaltigen Blutes bedürfen, so sterben sie allmählig alle ab. Aber es kann ein ziemlich langer Zeitraum vergehen, ehe dies geschieht. So überdauert denn auch die Reizbarkeit der Muskeln und Nerven bei warmblütigen Thieren meist nur wenige Minuten, bei kaltblütigen viele Stunden, bei Fröschen wohl selbst $1\frac{1}{2}$ Tage die Abtrennung des Gliedes oder den Tod des Gehirns, namentlich dann, wenn die Theile Gelegenheit haben, Sauerstoff aus der Luft aufzunehmen. Während dieser Zeit behalten die genannten Gebilde ihre wesentlichen Lebenseigenschaften fast ungestört, und nur die Energie derselben sinkt allmählig. Daher sind abgetrennte Muskeln und Nerven namentlich der kaltblütigen Thiere noch zu den meisten Versuchen über Fortpflanzung der Reizung und Zusammenziehung brauchbar, und sogar brauchbarer, als wenn sie noch dem lebenden Körper angehören, in welchem die Bedingungen des Versuches nicht von einer Menge anderweitiger störender Einflüsse getrennt werden können.

Man begreift, wieviel unter solchen Umständen der Physiologie daran gelegen sein muss zu ermitteln, was dieses geheimnisvolle Agens sei, welches in unscheinbaren Fäden hin und her wirkend die zartesten Abstufungen, die mächtigsten Energien und mannigfaltigsten Wechsel der Empfindung und Bewegung hervorruft, dieses Agens, das erste Glied in der Kette von Vorgängen, durch welche die empfindende und wollende Seele mit der materiellen Aussenwelt, Einwirkungen empfangend und wiedergebend, in Verbindung tritt. Die Antworten auf diese grosse Frage waren ebenso verschieden als die philosophischen Ideen und physikalischen Kenntnisse der Physiologen. Bald soll es ein Pneuma sein, ein mehr oder weniger geistig gedachtes Wesen, welches in den Nerven wohnt und wirkt; bald waren es Vibrationen, die den Nerven



entlang, wie an einer gespannten Saite ablaufen, bald ein Nervenfluidum, abgesondert vom Gehirn, tropfbar flüssig oder den Imponderabilien ähnlich; endlich wurde die Meinung aufgestellt, und sie ist es, die wir in Folgendem besonders zu berücksichtigen haben, es könnte identisch sein mit der Elektrizität. Mit dieser bietet es allerdings viel Uebereinstimmendes. Wie sie ist es im Stande, durch die feinsten leitenden Fäden seine mächtigsten Wirkungen an weit entfernte Orte hinzutragen, und zwar mit einer Geschwindigkeit, welche unermesslich gross zu sein schien, während in dem leitenden Faden selbst keine Veränderung sichtbar wurde. Seit der Mitte des vorigen Jahrhunderts wurde diese Frage von Physikern und Physiologen verhandelt, wenn auch anfangs nur auf Scheingründe unbestimmter Analogien gestützt. Ein Leipziger Mathematiker August Hausen scheint die Ansicht zuerst 1743 ausgesprochen zu haben; im Jahre 1751 stellte die Berliner Akademie der Wissenschaften darüber eine Preisfrage und krönte die Abhandlung von Lecat aus Rouen, welcher die Identität verneinte. Seinen rechten, auf That-sachen gestellten Boden bekam der Streit aber erst 50 Jahre später durch die berühmten Entdeckungen des Galvani. Dieser lehrte in der Elektrizität das mächtigste Reizmittel der Nerven kennen und im Nerven das feinste Instrument zur Auffindung schwacher Spuren von Elektrizität. Mit Hilfe der ausserordentlichen Empfindlichkeit thierischer Präparate entdeckte er eine Reihe von That-sachen, welche in zwei neue Gebiete der Elektrizitätslehre und Physiologie einführten, nämlich in das des später nach ihm genannten Galvanismus, d. h. der Elektrizitätserregung, welche bei Berührung verschiedenartiger Leiter stattfindet, und in das der eigentlichen thierischen Elektrizität, welche wir zu besprechen vorhaben. Leider überwog bei ihm und seinem ungleich berühmteren Gegner Volta das natürliche Streben, die Gesamtheit der neu entdeckten Erscheinungen auf ein einziges Princip zurückzuführen, und während Galvani in allen seinen Versuchen die thierischen Theile als Quellen der Elektrizität angesehen wissen wollte, entwickelte Volta mit bewunderungswürdigem Scharfsinne und meisterhafter Konsequenz die Theorie der

Contactelektrizität, krönte sie durch die glänzendsten und einflussreichsten Entdeckungen und stellte dadurch bald nicht bloss die falschen Theorien seines Gegners, sondern leider auch die wirklich der thierischen Elektrizität angehörenden Versuche so in Schatten, dass dieselben trotz ihrer wohlbegründeten Bestätigung und Vertheidigung durch A. v. Humboldt fast unbeachtet liegen blieben. Erst 27 Jahre nach Galvani's Tode 1825 machte Nobili, berühmt durch die feinste Vervollkommnung des galvanischen Multipliers, die erste dahin gehörige weitere Entdeckung, ohne aber ihre Bedeutung zu verstehen. Er hatte die Versuche Galvani's wiederholt, Zuckungen durch Ketten hervorzubringen, welche ausser Nerv und Muskel eines Frosches nur Flüssigkeiten enthalten. Er versuchte die Ströme, welche hier wirksam sind, durch den Multiplikator anzeigen zu lassen; die Nadel blieb unbewegt. Eifersüchtig darauf, sein Instrument an Empfindlichkeit durch die thierischen Theile übertreffen zu sehen, bot er allen Fleiss und Scharfsinn auf, ein noch vollkommneres herzustellen, und es gelang; der in den Muskeln und Nerven circulirende Strom lenkte die Magnetonadel ab. Nobili selbst verfolgte seine Entdeckung nicht weiter, weil er die Ströme durch unwesentliche Umstände entstanden glaubte; es geschah aber zunächst durch seinen Landsmann Matteucci, welcher mit anerkanntem Fleisse eine grosse Anzahl mühevoller Versuche anstellte und mehrere nicht unwichtige hierher gehörige That-sachen fand. Leider gelang es ihm nicht, durch eines der schwierigsten und verwickeltsten Gebiete der Wissenschaft den richtigen Pfad zu finden, und seine theoretischen Vorstellungen sind voll von Widersprüchen und unlöslicher Verwirrung.

Einem Deutschen Forscher, E. du Bois-Reymond, war es vorbehalten, nicht bloss eine viel ausgedehntere Reihe der bedeutendsten Entdeckungen zu machen, sondern auch zuerst Ordnung und Licht in diesem dunklen Felde zu schaffen, und seine Arbeiten sind es daher fast allein, welche den Stoff meiner Berichterstattung zu bilden haben. Diese Arbeiten, mit denen er seine wissenschaftliche Laufbahn eröffnete, Früchte des angestrengten Studiums und der unablässig auf



ein Ziel gerichteten Consequenz von zehn Jahren, in denen „der Frosch und die Multiplicatortheilung seine Welt waren“, sind ein seltenes Beispiel methodischer Beobachtung, reicher Kenntnisse und derjenigen Schärfe und Klarheit der Begriffe, deren Schule die Mathematik ist, Eigenschaften, welche auch eine öffentliche Anerkennung durch seine, für einen so jugendlichen Gelehrten doppelt ehrenvolle Aufnahme in die Akademie der Wissenschaften seiner Vaterstadt gefunden haben. Seine Arbeiten sind hauptsächlich enthalten in einem grösseren Werke: „Untersuchungen über thierische Elektrizität“, von dem bis jetzt zwei Bände erschienen sind, der dritte aber noch fehlt. Ausserdem sind Einzelheiten, welche in jenen Bänden noch nicht enthalten sind, in den Sitzungsberichten der Berliner und Pariser Akademie zu finden. Trotz der mangelnden Vollendung des Hauptwerkes glaube ich doch denen, welche sich für die Sache interessiren, ohne die Zeit und die Lust zu dem allerdings Mühe erfordernden Studium des Originals zu haben, durch eine übersichtliche Darstellung des Hauptinhaltes einen Dienst leisten zu können, weil schon in den bis jetzt veröffentlichten Theilen einige Resultate von weit ausgedehnter physiologischer Wichtigkeit sich darbieten. Das Hauptwerk musste die neu hingestellte Thatsache vollständig wissenschaftlich begründen, der Verfasser war daher einerseits zu einer sehr detaillirten Beschreibung und Besprechung der Versuche, andererseits zu einer sehr ausgedehnten Polemik, namentlich gegen die irrthümlichen Behauptungen seines Gegners Matteucci genöthigt. Da nun derjenige, welcher die wissenschaftlich gesicherte Ueberzeugung von der Wahrheit der Thatsachen sucht, und derjenige, welcher die Versuche nachmachen will, doch immer zum Studium des Originals genöthigt sein werden, so will ich hier die Thatsachen ganz dogmatisch darstellen, wodurch ich dem Leser die Auffassung zu erleichtern hoffe. Ich bemerke übrigens noch, dass die Hauptversuche nach einer scrupulösen Prüfung einer dazu eingesetzten Commission der Pariser Akademie die volle Anerkennung ihrer Richtigkeit gefunden haben. Ich selbst habe die grössere Zahl der Versuche von du Bois ausführen sehen, viele selbst angestellt, und kann daher als Augenzeuge berichten.

Die Hauptthatsache dieses ganzen Gebietes ist die, dass alle thierischen Muskeln und Nerven, so lange sie noch reizbar sind, elektromotorische Kräfte besitzen. Ich rufe meinen Lesern deshalb noch kurz folgende Thatsachen und Begriffe²⁹⁹ aus der Lehre vom Galvanismus zurück. Wenn zwei verschiedenartige Metallmassen, welche vorher keine elektrische Ladung besaßen, in Berührung gebracht werden, so wird das eine negativ, das andere positiv elektrisch. Die Stärke dieser Elektrizität ist allerdings äusserst gering, kann aber doch durch feine Hilfsmittel sicher nachgewiesen werden. Sind es nur metallische Elektrizitätsleiter, welche wir in Berührung gebracht haben, so tritt eine dauernd beständige Vertheilung der elektrischen Ladungen, ein Gleichgewichtszustand für dieselben ein, der sich weiter nicht ändert. Wir erklären uns das vielleicht am besten durch die Annahme, dass die verschiedenen Stoffe verschiedene Anziehungskräfte für die elektrischen Fluida haben und deshalb im Falle der Berührung von zwei Metallen dasjenige, welches die stärkere Anziehung zur positiven Elektrizität hat, sich positiv ladet, während das andere negativ wird. Anders verhält es sich, wenn zwei Metalle, die sich untereinander berühren, auch noch beide mit einer zusammengesetzten Flüssigkeit, welche die Elektrizität leitet, in Berührung kommen. Hier tritt nämlich kein Gleichgewicht der elektrischen Vertheilung ein, wahrscheinlich deshalb nicht, weil die Flüssigkeit unter dem Einfluss der verschiedenartigen elektrischen Anziehungen der sie berührenden Metalle selbst in ihre einfacheren Bestandtheile zersetzt wird, und durch die innere Bewegung, in welche sie dadurch geräth, die Herstellung eines dauernden elektrischen Gleichgewichts fortdauernd hindert. Es tritt in einem solchen Falle vielmehr ein anhaltendes Strömen der Elektrizität durch den leitenden Ring ein, der von den zwei Metallen und der Flüssigkeit gebildet wird. Setzen wir z. B. ein Stück Kupfer mit einem Stücke Zink in Berührung, so ladet sich das Zink positiv, das Kupfer negativ elektrisch. Dieser Unterschied der Ladungen erneuert sich immer wieder in derselben Stärke, wenn wir auf irgend eine Weise den beiden Metallen Theile ihrer Ladung wegnehmen. Tauchen wir die so verbundenen



Metalle in Wasser oder verdünnte Schwefelsäure oder eine Salzlösung, so setzt sich diese Flüssigkeit mit ihnen nicht in ein Gleichgewicht elektrischer Vertheilung, sondern durch sie hindurch strömt fortdauernd die positive Elektrizität des Zinkes mit dem Wasserstoff der Flüssigkeit an das Kupfer über, und die negative des Kupfers mit dem Sauerstoff und der Säure an das Zink, während sich die Ladungen beider Metalle an ihrer Berührungsstelle immer wieder erneuern. Als Richtung des elektrischen Stromes bezeichnen wir stets die Strömungsrichtung der positiven Elektrizität. Sie geht in diesem Falle vom Zink zur Flüssigkeit, von da zum Kupfer, von dem wieder zum Zink u. s. w. Die negative Elektrizität dagegen strömt in entgegengesetzter Richtung. Die Fähigkeit einer solchen Anordnung einen fortdauernden elektrischen Strom zu unterhalten, nennen wir elektromotorische Kraft. Die Richtung des Stromes wird hier durch den elektrischen Gegensatz zwischen Kupfer und Zink bestimmt, und wir bezeichnen das Zink in diesem Falle als das positive Element, weil es sich im leitenden Kreise positiv geladen findet, das Kupfer als das negative.

300 Nun lassen sich auch elektromotorische Elemente aus drei oder mehr feuchten Leitern anordnen. Bilden wir einen leitenden Ring aus Schwefelsäure, Kalilösung und Wasser, so entsteht ein Strom, der vom Wasser zum Kali, von diesem zur Schwefelsäure und wieder zum Wasser zurückgeht. Mit solchen Strömen eines Systems feuchter Leiter haben wir es in den Muskeln und Nerven zu thun. Da wir die Vertheilung der Ladung in feuchten Leitern noch nicht genügend kennen, sind wir eigentlich ausser Stande zu bestimmen, welches das positive und negative elektromotorische Element sei. Es kommt bei der Ertheilung dieser Benennungen darauf an, an welcher Stelle wir die Strömungsrichtung untersuchen. Wir bezeichnen im Folgenden mit du Bois dasjenige Element als das positive, von dem aus die positive Elektrizität in den Schliessungsbogen eintritt. In der obigen Kette aus Schwefelsäure, Kali, Wasser scheint es angemessen, die beiden ersteren Stoffe als die wirksamen Elemente, das Wasser als den indifferenten verbindenden Leiter zu betrachten.

Die positive Elektrizität tritt aus der Schwefelsäure an das Wasser, wie in der oben beschriebenen Metallkette aus dem Zink, die negative dagegen aus dem Kali, wie dort aus dem Kupfer. Demgemäss würden wir die Schwefelsäure als das positive elektromotorische Element bezeichnen, das Kali als das negative. So viel über den Sinn dieser Ausdrücke.

Soll ein elektrischer Strom zu Stande kommen, so muss ihm immer ein ringförmiger in sich geschlossener Weg aus Stoffen, welche die Elektrizität leiten, geboten sein. Sind ihm mehrere Wege geboten, so schlägt er sie alle gleichzeitig ein und theilt sich zwischen sie so, dass auf dem, welcher die beste Leitung darbietet, der grösste Theil des Stromes kreiset, auf den Wegen von schlechterer Leitung dagegen kleinere Theile. Man nennt solche Ströme, denen mehrere gleichzeitige Bahnen freistehen, verzweigte Ströme. Geht ein Strom durch einen Körper von drei Dimensionen, so könnte er unendlich viele Wege von beliebiger Gestalt einschlagen. Die Grundsätze, aus denen bestimmt werden kann, auf welchen Linien die Elektrizität wirklich einen solchen durchfließt, sind von G. Kirchhoff und Smaasen bestimmt worden, meist ist aber ihre Anwendung zu schwierig, um in den einzelnen Fällen die Rechnung durchzuführen. Die Vertheilung der Ströme im Muskel bietet einen solchen Fall dar, doch ist es du Bois gelungen Betrachtungsweisen aufzufinden, durch welche die Vertheilung der Ströme wenigstens so weit zu bestimmen ist, als man für das Verständniss der Versuche braucht.

Von den vielen wunderbaren Wirkungen, durch welche die galvanischen Ströme in der Physik und Industrie einen so ausgedehnten Einfluss gewonnen haben, ist namentlich eine für unseren jetzigen Zweck von Bedeutung, weil sie uns dazu dient, die kleinsten Spuren elektrischer Strömung aufzufinden; das ist ihre Wirkung auf die Magnetnadel. Eine Drahtspirale, welche von einem elektrischen Strome durchflossen wird, hat vermöge einer bisher noch unverständenen Verkettung der magnetischen und elektrischen Kräfte vollständig die Wirkungen eines Magneten. Der Einwirkung einer solchen Drahtspirale, welche wenigstens bei den thierisch elektrischen 301



Versuchen im möglichst engstem Raume möglichst viel Windungen darbieten muss, ist im galvanischen Multiplicator eine astatische Verbindung zweier Magnetnadeln ausgesetzt. Eine solche besteht bekanntlich aus zwei parallelen gleich starken Magnetnadeln, deren Pole nach entgegengesetzter Richtung zeigen, und welche daher der Erdmagnetismus auch entgegengesetzt zu richten strebt. Könnte man die Nadeln ganz genau parallel und ganz genau gleich stark machen, so würde die Erde auf das astatische System gar keine Richtkraft ausüben; in Wirklichkeit bleibt immer ein geringer Rest dieser Kraft übrig, den man aber fast beliebig klein machen kann. Die beiden Nadeln hängen an einem Coconfaden, die eine innerhalb, die andere oberhalb der Drahtwindungen, sodass der galvanische Strom beide in demselben Sinne ablenkt. Diese Nadeln, an dem dünnsten Faden hängend, fast jeder anderen Kraft entzogen, folgen mit der grössten Leichtigkeit der Einwirkung der geringsten Spur elektrischer Strömung im Drahte; aber natürlich wächst die Menge der möglichen anderweitigen Störungen in demselben Verhältnisse wie ihre Empfindlichkeit, und erfordert die grösste Aufmerksamkeit und Vorsicht im Gebrauch des Instrumentes. Man hat nicht mit Unrecht gesagt, dass ein empfindlicher Multiplicator ein gefährlicher Schatz für einen jungen Gelehrten sei; es ist nicht schwer mit einem solchen elektrische Strömungen da zu finden, wo sie sind, wohl aber schwer, sie da nicht zu finden, wo sie nicht sind. Du Bois-Reymond hat die Empfindlichkeit des Multiplicators weiter getrieben als alle seine Vorgänger. Zu den Versuchen über die Nervenströme hat er sich ein solches Instrument von 24160 Windungen gebaut — er hat es gebaut, sage ich, denn um die praktischen Schwierigkeiten einer so ungewöhnlichen Aufgabe zu lösen, musste er selbst hülffreiche Hand an das Werk legen. Er hat ausserdem die Theorie und praktische Ausführung dieser empfindlichsten Instrumente in mehreren wesentlichen Punkten vervollkommen, sodass man sich ihrer jetzt mit grösserer Sicherheit bedienen kann.

Ich muss hier noch kurz die Art erwähnen, wie die Enden des Multiplicatordrahtes mit den thierischen Theilen in

Verbindung gesetzt werden. Man darf die letzteren nicht unmittelbar mit den metallischen Enden dieses Drahtes berühren wollen, denn kaum sind je zwei Stücke desselben Metalles so gleichartig, dass sie nicht, mit einem feuchten Leiter in Berührung gebracht, einen elektrischen Strom erregen. Der Multiplicatordraht endet in zwei Platinbleche, deren jedes in ein Gefäss mit Kochsalzlösung eingetaucht ist. In diesen Gefässen befinden sich über ihren Rand hervorragend, und mit derselben Lösung durchtränkt, Bäusche aus dicht zusammengelegten Fliesspapierblättern; diese erst bringt man an die thierischen Theile heran, wenn man deren Ströme prüfen will. Wenn nun auch die Platinplatten ganz gleichartig sind, so bringt doch jeder Strom, welcher durch einen Muskel in dem Kreise erregt wird, neue Ungleichartigkeiten hervor, indem er die Kochsalzlösung in ihre Bestandtheile zersetzt und die Zersetzungsproducte an den Platten ablagert. Man nennt diesen Zustand die galvanische Polarisation der Platten. Verbinden wir hinterher die beiden Gefässe durch ein ebenfalls mit Kochsalzlösung gefülltes heberartiges Rohr, sodass keinerlei elektromotorische Kraft innerhalb des flüssigen Leiters mehr vorkommt, so sind die galvanisch polarisirten Platinplatten doch noch im Stande, einen Strom zu erregen, dessen Richtung der des ersten entgegengesetzt ist. Dieser Strom vereinigt die vorher getrennten Bestandtheile der Flüssigkeit wieder und fährt so lange fort, bis alle Zersetzungsproducte verschwunden und die Platten wieder gleichartig sind. Dadurch ergibt sich zugleich das Verfahren, die Gleichartigkeit der Platten zu controlliren und herzustellen. Man verbindet die Kochsalzgefässe, in welche die Multiplicatorplatten tauchen, durch ein Rohr voll Kochsalzlösung und wartet, bis die Nadel keinen Strom mehr anzeigt, entfernt alsdann das Rohr und schliesst den Kreis dadurch, dass man die thierischen Theile auf die Bäusche legt. Ströme, welche sich dann zeigen, können nur von den elektromotorischen Kräften der letzteren herrühren.

Um die Richtung und Vertheilung der elektrischen Kräfte in den Muskeln und Nerven zu beschreiben, muss ich einiges über ihre Structur vorausschicken. Beide bestehen aus Fasern



eigenthümlicher Art. Die Muskelfasern (Primitivfasern) sind so fein, dass sie mit blossen Auge eben noch gesehen werden können, von röthlicher Farbe, liegen in der Regel parallel nebeneinander und sind meist mit ihren Enden zunächst an Sehnen und durch diese an Knochen geheftet. Die der willkürlich bewegten Muskeln, mit denen wir es hier hauptsächlich zu thun haben, erscheinen, frisch unter dem Mikroskope untersucht, auf ihrer Oberfläche fein quergestreift, im Inneren ganz homogen, durchscheinend. Bald tritt aber eine Art Gerinnung in ihnen ein, wobei sie trüb werden. Zu dieser Zeit gelingt es noch nicht, irgend eine Theilung ihres Inhaltes zu erkennen. Ueberlässt man sie aber längere Zeit der anfangenden Zersetzung durch die Luft, oder der Einwirkung auflösender Flüssigkeiten, so zerfällt der Inhalt in der Regel in ein Bündel feiner perlschnurartiger Fäserchen, Fibrillen genannt, deren abwechselnd dickere und dünnere Stellen der Querstreifung an der Oberfläche der Primitivfasern zu entsprechen scheinen. In selteneren Fällen dagegen zerfällt er in Scheiben, welche durch quere Theilung nach der Richtung der Querstreifen entstehen. Die meisten mikroskopischen Forscher glauben, dass diese Abtheilungen des Inhaltes schon während des Lebens vorhanden seien, und nehmen deshalb entweder Fibrillen oder Scheiben als Bestandtheile der Primitivfasern an. Vielleicht sind auch beide Arten der Abtheilung präformirt, d. h. es sind im Muskelinhalt Körperchen in regelmässiger Anordnung enthalten, sodass sie Längs- und Querreihen bilden, und nach dem Tode je nach der Art des lösenden Medium bald der Länge, bald der Quere nach ver kittet bleiben.

Die Nervenfasern sind viel feiner als die Muskelfasern und verlaufen ohne Unterbrechung, selten sich theilend, vom Gehirn bis zu den Muskeln oder anderen Körpertheilen hin.
³⁰³ Frisch sind sie glashelle Cylinder, in denen man nichts weiter erkennt; es ist aber schwer, sie in dieser Beschaffenheit zu Gesicht zu bekommen, weil sich nach ihrer Trennung von den übrigen lebenden Theilen sehr schnell eine Gerinnung in ihnen einstellt, wobei eine anscheinend öartige Masse an ihrer Oberfläche in einer unregelmässigen Schicht sich ausscheidet; im

Innern findet man dann ein nicht ganz regelmässig contourirtes Band, den sogenannten Axencylinder. Ob letzterer aber in den frischen Fasern schon vorhanden ist, bleibt durchaus zweifelhaft, da seine Entstehung sich auch erklären liesse, wenn in den Nervenfasern wie im Blute gelöster Faserstoff vorhanden wäre, der nach dem Tode gerönne, und sich zu einem Strang zusammenziehend, wie der geronnene Blut-faserstoff, sich von den übrigen flüssigen Theilen des Inhaltes sonderte.

Muskeln und Nerven sind nun Elektromotoren, und zwar von höchst eigenthümlicher Art, wie sie bisher in der Physik der unorganischen Körper nicht gefunden worden sind. Die elektrischen Gegensätze an ihnen finden sich nämlich nicht zwischen grösseren Massen ihrer Substanz vor, wie an unseren hydroelektrischen Ketten zwischen dem Zink, dem Kupfer und der Flüssigkeit, sondern sie finden sich in jedem kleinsten Theilchen ihrer Masse, welches wir mechanisch abtrennen können, wieder vor. Wie ein Magnet mit einem Nord- und einem Südpole, so vielfach wir ihn auch zersplittern mögen, nur Theile giebt, an deren jedem wieder ein Nord- und ein Südpol vorkommt, so bietet auch jedes Stückchen eines elektromotorisch wirksamen Muskels wieder die elektrischen Gegensätze dar, welche zur Erzeugung eines Stromes nöthig sind. Wir können an jeder Stelle des Innern Schnittflächen ausführen, die ein entgegengesetztes elektromotorisches Verhalten zeigen, je nachdem sie den Fasern parallel oder darauf senkrecht sind. Um diesen Gegensatz auszudrücken, hat du Bois jede Begrenzungsfläche eines Muskel- oder Nervenstückes, welche den Fasern parallel gelegt ist, und in der also die Fasern der Länge nach verlaufen, Längsschnitt benannt, eine jede aber, welche senkrecht gegen die Faserrichtungen ist, und in der also die durchschnittenen Enden der Fasern zu Tage liegen, Querschnitt. Um die Vertheilung der elektromotorischen Kräfte in ihrer regelmässigten Form kennen zu lernen, thut man am besten, ein cylindrisches Bündel von Muskel- oder Nervenfasern zu untersuchen, in welchem die Fasern alle unter sich und der Axe des Bündels parallel sind. Man kann dazu ein Stück ge-



brauchen, was man aus einem Nervenstamme oder aus einem Muskel, dessen Fasern der Länge nach verlaufen, durch zwei Querschnitte herausgetrennt hat. Aus anderen Muskeln, deren Fasern, wie es meistens der Fall ist, schief gegen die Axe des Muskels liegen, ähnlich den Fasern eines Federbartes, gewinnt man solche Stücke, wenn man sie in Richtung der Fasern zerreisst, und aus den Bündeln, welche man so gewonnen hat, passende Stücke herausschneidet. Die cylindrische Oberfläche des Bündels ist also Längsschnitt, die Grundflächen sind Querschnitte. Die Mittelpunkte der Querschnitte, da wo sie von der Axe des Ganzen getroffen werden, mögen die Pole, der Umfang eines angenommenen mittleren Querschnittes, der das ganze Bündel halbirt, der Aequator des Bündels heissen.

Die Regel der Wirksamkeit eines solchen Muskel- oder Nervenstückes ist nun folgende. Sobald man die Enden der Multiplicatorleitung mit zwei Punkten seiner Oberfläche in Berührung bringt, entsteht ein Strom, der im Multiplicator stets von der dem Aequator des Bündels näheren Berührungsstelle nach derjenigen hinfliesst, welche einem der Pole am nächsten ist. Die stärksten Ströme erhält man, wenn man das eine Ende des leitenden Bogens an den Aequator selbst, das andere an einen der Pole ansetzt, schwächere, wenn man einen vom Pole entfernteren Theil des Querschnittes mit einem vom Aequator entfernteren Theile des Längsschnittes, viel schwächere, wenn man zwei Punkte des Querschnittes unter sich, oder zwei des Längsschnittes unter sich durch den leitenden Bogen verbindet, gar keine, wenn die berührten Punkte des Cylinders entweder beide demselben oder einer dem einen, der andere dem anderen Pole gleich nahe liegen.

Die meisten Muskeln bieten nun nicht eine so einfache Anordnung der Fasern dar, wie sie das besprochene cylindrische Schema voraussetzt, ihre Fasern liegen in der Regel nicht ihrer Längsaxe parallel, sondern sind schief zwischen Sehnensträngen ausgespannt. Ich habe schon oben bemerkt, dass die Muskeln meist durch zwei Sehnen an Knochen festgeheftet sind. Von diesen tritt die eine häufig in das eine Ende des Muskels ein und setzt sich noch eine Strecke in

das Innere hinein fort, während die andere mantelartig das andere Ende des Muskels umfasst. Hier heften sich dann die Muskelfasern mit ihrem einen Ende nach innen gewendet an die innere, mit dem anderen nach aussen an die äussere Sehnenmasse an. So ist es z. B. bei dem Wadenmuskel des Frosches der Fall, welcher ein besonders passendes Object für viele Untersuchungen abgiebt. Die obere Sehne, welche sich an das untere Ende des Oberschenkelbeines anheftet, tritt in das Innere des Muskels, die untere, Achillessehne, bildet dagegen auf der äusseren Fläche des Muskels eine weissglänzende sehnige Ausbreitung. In anderen Fällen liegen beide Sehnen aussen, aber an den entgegengesetzten Seiten des Muskels; es finden sich überhaupt höchst mannigfaltige Abänderungen in der Anordnung dieser Theile vor. Die Enden der Muskelfasern also, welche in unserem cylindrischen Schema in den Querschnitten zusammenlagen, sind im unverletzten Muskel an die Sehnen geheftet. Letztere haben keine elektromotorischen Kräfte, sondern bilden einen unwirksamen leitenden Ueberzug der Querschnitte der Fasern. E. du Bois bezeichnet deshalb die Sehnen als die natürlichen Querschnitte der Muskeln, im Gegensatz zu den mit dem Messer angelegten künstlichen Querschnitten, und nennt ferner die Stellen der Muskeloberfläche, wo die rothe cylindrische Oberfläche der Fasern zu Tage liegt, den natürlichen Längsschnitt, im Gegensatz zum künstlichen Längsschnitt, der durch Zerreißung des Muskels in Richtung der Fasern entsteht. Man findet nun am unverletzten Muskel denselben elektromotorischen Gegensatz zwischen ³⁰⁵ natürlichem Längsschnitt und Querschnitt wieder, wie an unserem Schema die künstlichen Schnitte darboten. Nur ist natürlich die Vertheilung der elektromotorischen Kräfte bei der unregelmässigen Form und Structur solcher unverletzter Muskeln nicht auf einen so einfachen Plan zurückzuführen wie das unseres cylindrischen Schemas. Der natürliche Längsschnitt pflegt dem künstlichen elektromotorisch das Gleichgewicht zu halten, während der natürliche Querschnitt gegen den künstlichen zurücksteht, sodass bei leitender Verbindung derselben im Bogen ein Strom vom natürlichen zum künstlichen



Querschnitt entsteht. Das beruht zum Theil wohl darauf, dass die Fasern sich nicht senkrecht gegen die Sehnausbreitungen ansetzen, und daher am natürlichen Querschnitte nicht blos die Querschnitte, sondern auch Theile ihrer Längsschnitte zu Tage liegen; ausserdem kommt hier noch ein anderes, später zu besprechendes Verhältniss in Betracht.

Wenn die Muskeln eines Körpertheiles alle, oder doch die meisten und grössten von ihnen, vermöge der Anordnung ihrer Fleisch- und Sehnenmasse in derselben Richtung elektromotorisch wirksam sind, so erscheint der ganze Körpertheil mit elektromotorischen Kräften begabt zu sein, die eine bestimmte Richtung an ihm einhalten. Dieser Fall kommt beim Frosche vor. Enthäutet man einen noch reizbaren Frosch, und legt den leitenden Bogen so an, dass entweder das ganze Thier oder ein Theil von ihm in den Leitungskreis aufgenommen wird, so entsteht ein Strom, der im Thiere die Richtung von den Füßen zum Kopfe einhält. Dieser sogenannte Froschstrom ist es, der zuerst von Nobili am Multiplicator erkannt und von Matteucci weiter untersucht wurde. Beim Frosche ist die Beständigkeit in der Richtung dieses Stromes von den Füßen zum Rückenmark und Gehirn hin auffallend, aber sie ist nur zufällig und findet sich bei den meisten Thieren nicht wieder. Sie schien eine geheimnissvolle Beziehung dieses Stromes zu den Functionen der Centraltheile des Nervensystems zu verrathen; dadurch wahrscheinlich liess sich Matteucci verleiten, den Froschstrom von dem der einzelnen Muskeln, dem sogenannten Muskelstrom, trennen zu wollen. Die ersten Zeichen des letzteren fand er ungefähr gleichzeitig mit du Bois; aber diesem bleibt jedenfalls das nicht zu bestreitende Verdienst, sogleich die Identität von Frosch- und Muskelstrom erkannt und die Gesetze gefunden zu haben, von denen die Stromesrichtung abhängt, während sie seinem Gegner erst sehr viel später klar zu werden angingen, zu einer Zeit, wo er erweislich die betreffende Abhandlung von du Bois schon kannte. Dass die Nerven nach demselben Gesetze wie die Muskeln elektromotorisch sind, wurde ebenfalls von du Bois gefunden.

Die beschriebenen elektromotorischen Kräfte finden sich

in allen Muskeln und Nerven aller Thiere, so lange sie ihre Reizbarkeit bewahren, und sind im allgemeinen desto stärker, je frischer und reizbarer die Theile sind. Sobald die Muskeln todtstarr werden, was von der schon oben erwähnten Gerinnung ihres Inhaltes abhängt, verschwindet die letzte Spur ihrer elektrischen Wirkungen, um nie wiederzukehren. Eigenthümlich verhält sich aber die Sache während des unverletzten Lebens.¹⁾ Der natürliche und künstliche Längsschnitt und der künstliche Querschnitt zeigen dieselben Wirkungen wie an ausgeschnittenen Muskeln; nur der natürliche Querschnitt befindet sich in einem abweichenden Zustande und erweist sich als unwirksam. Deshalb geben die unverletzten von der Haut überzogenen Glieder keinen Strom, weil gegen die Haut hin nur natürlicher Quer- und Längsschnitt frei liegt. Die Deutung dieses Umstandes scheint sich daraus zu ergeben, dass eine jede äussere Einwirkung, welche die oberflächlichste unter der Sehnausbreitung gelegene Schicht der Muskelsubstanz ihrer Reizbarkeit beraubt, sogleich den Muskelstrom in voller Wirksamkeit herstellt. Man braucht die Sehnausbreitung nur mit irgend einer fremdartigen Flüssigkeit, welcher Art sie auch sei, einer Säure, einer Lösung von Alkali, Salz, Zucker u. s. w., mit Alkohol, Aether, Kreosot, Terpentinöl, fetten Oelen, ja selbst mit reinem Wasser zu benetzen, oder sie mit einem heissen Körper zu berühren, so entwickelt sich der Muskelstrom mehr oder minder schnell, je nachdem diese Mittel schneller oder langsamer auf die thierische Substanz einwirken. Die elektromotorischen Eigenschaften der gebrauchten Flüssigkeiten können hier nicht in Betracht kommen, da diese, z. B. die der Alkalien und Säuren, einander ganz entgegengesetzte Wirkungen hervorbringen müssten, während sie in der That immer nur die eine Wirkung haben, den Muskelstrom zu entwickeln. Es giebt nach den bisherigen Versuchen überhaupt nur zwei Flüssigkeiten, welche den Strom gar nicht entwickeln, nämlich Blut und Lymphe. Während also die unverletzten Glieder eines Thieres keinen

1) S. E. du Bois-Reymond in den Sitzungsberichten der Akademie d. Wissensch. zu Berlin, 30. Juni 1851.



Strom geben, und sich der Strom auch nicht nach ihrer Abtrennung vom Körper zu entwickeln pflegt, so lange sie von der Haut bedeckt bleiben, entwickelt er sich auch am lebenden Thiere, wenn man zwischen Haut und Muskeln eine elektrisch indifferente und selbst nicht leitende Flüssigkeit wie Alkohol oder Kreosot einspritzt. Du Bois schliesst daraus, dass unter der Sehnenausbreitung eine Muskelschicht eigenthümlicher Art existire, die er *parelektronomische Schicht* nennt, deren elektromotorische Kräfte denen der übrigen Muskelsubstanz entgegengesetzt sind und verhindern, dass die Muskelströme im lebenden Thiere auf die benachbarten Theile übergehen. Sobald diese Schicht aber durch irgend eine äussere Einwirkung zerstört wird, tritt die Wirksamkeit der übrigen elektromotorischen Anordnungen des Muskels ungeschwächt ein. Im Innern der Muskeln sind dagegen die elektromotorischen Gegensätze stets vollständig entwickelt, denn den künstlichen Querschnitt findet man stets wirksam, selbst wenn man ihn durch einen Einschnitt in die Muskeln eines lebenden Thieres bildet.

Wir kommen jetzt zu der Untersuchung darüber, wie wir uns die Vertheilung der elektromotorischen Kräfte, von denen ³⁰⁷ der Muskelstrom abhängt, zu denken haben. Zuvörderst ist klar, dass wir es hier nicht allein mit einem elektromotorischen Gegensatze zwischen der Oberfläche des Muskels und seinem Innern zu thun haben, wie Matteucci anfangs die Sache ansah. Je nachdem wir die Richtung eines Schnittes durch das Innere wählen, ob den Fasern parallel oder quer gegen die Fasern, bekommen wir eine Schnittfläche, welche sich elektrisch entweder positiv oder negativ verhält. Die kleinsten Bruchstücke der Muskelsubstanz, welche man isoliren kann, zeigen noch elektromotorische Kräfte, ja, du Bois giebt an, einmal durch eine einzelne Primitivfaser noch Zeichen des Stromes erhalten zu haben. Aber selbst, wenn das letztere nicht gelungen wäre, könnte nicht bezweifelt werden, dass noch innerhalb jeder Primitivfaser elektromotorische Gegensätze sich finden. Denn der künstliche Längsschnitt unterscheidet sich durch nichts anderes vom künstlichen Querschnitte, als dass im ersteren die cylindrischen Oberflächen

der Primitivfasern, im letzteren der Inhalt derselben zu Tage liegt. Man könnte nun vielleicht einen elektrischen Gegensatz zwischen Inhalt und Hülle der Primitivfasern annehmen, wie er stattfinden würde, wenn jener alkalisch, diese sauer wäre, und die Kochsalzlösung der Bäusche, welche an die thierischen Theile angelegt werden, als den dritten indifferenten Leiter betrachten. Doch hat du Bois gezeigt, dass auch das nicht genügt. Denn wenn man an die Bäusche zwei verschiedene Muskelbündel, entweder beide mit Längsschnitt oder beide mit Querschnitt anlegt, und dann die Leitung dadurch schliesst, dass man den Längsschnitt des einen gegen den Querschnitt des anderen legt, erhält man ebenfalls einen Strom. Das würde aber nicht der Fall sein können, wenn nur zwei differente Elemente in der Muskelsubstanz vorkämen. Zur Erregung eines hydroelektrischen Stromes sind mindestens drei Elemente nöthig, von denen jedes jedes andere berühren muss. Bei dem beschriebenen Versuche ist aber die Kochsalzlösung entweder nur mit Längsschnitt oder nur mit Querschnitt des Muskels in Berührung. Daraus folgt mit Sicherheit, dass innerhalb einer jeden Primitivfaser mindestens drei solche Elemente vorkommen müssen, wie sie zur Erregung eines Stromes nöthig sind; dass also schon innerhalb jeder Primitivfaser alle Bedingungen zur Erzeugung des Stromes gegeben sein müssen.

Jedenfalls ist also im Muskel ein höchst complicirtes System elektromotorisch wirksamer Theile vorhanden, und wir müssen daraus schliessen, dass der Muskelstrom, der die Multiplicatornadel ablenkt, nur ein abgezwigter Theil der Ströme ist, die im Innern des Muskels und der angelegten Bäusche kreisen, und die ihn jedenfalls sehr bedeutend an Intensität übertreffen. Wir können auf die Anordnung der elektromotorischen Kräfte im Innern des Muskels nur aus diesen abgezwigten Strömen schliessen, und aus den mathematischen Untersuchungen über die Stromvertheilung in leitenden Körpern geht hervor, dass unendlich viele verschiedene Anordnungen elektromotorischer Kräfte im Innern eines Leiters ganz dieselben abgeleiteten Ströme geben. Können wir einen solchen Leiter nicht theilen, und auch die Wirksamkeit



308 seiner Theile untersuchen, so haben wir bis jetzt kein weiteres experimentelles Mittel, etwas über das Innere zu erfahren. So hat z. B. du Bois die Wirkungen des Muskels nachgebildet durch einen Kupfercylinder, der am Mantel verzinkt, an den Grundflächen aber roth geblieben war, und mit einer dünnen Schicht eines feuchten Leiters überzogen wurde. Ebenso lassen sie sich aber auch nachbilden durch ein Bündel solcher Cylinder, entsprechend den Primitivfasern des Muskels. Dass nun die elektromotorischen Kräfte des Muskels nicht blos an oder dicht unter seiner Oberfläche ihren Sitz haben, wie an jenem einfachen Kupfercylinder, erfahren wir, wenn wir den Muskel theilen; die zweite Nachbildung durch ein Bündel solcher Cylinder scheint deshalb entsprechender. Die Primitivfaser des Muskels können wir aber nicht mehr theilen, wenigstens nicht in ihrer Längsrichtung, deshalb ist auch über die Vertheilung der Kräfte in ihrem Inneren nichts mehr zu ermitteln. Sie könnte z. B. jenem Kupfercylinder entsprechen. Wenn ihre Hülle indifferent wäre, darunter eine saure Schicht, endlich ein alkalischer Inhalt folgte, würden alle Erscheinungen des Muskelstromes erklärt sein. Andere Erscheinungen machen es aber sehr unwahrscheinlich, dass die Vertheilung so einfach sei. Wir werden später hören, dass der Strom der Muskeln und Nerven die allerschnellsten periodischen Wechsel seiner Stärke und Richtung zeigen kann, in einer Secunde mehr als hundertmal. Es ist im höchsten Grade unwahrscheinlich, dass ganze Schichten des Inhaltes so schnell ihre elektromotorische Rolle wechseln und wieder einnehmen sollten. Du Bois hat deshalb die Hypothese aufgestellt, dass es im Inhalt der Muskel- und Nervenfasern sehr kleine, regelmässig gestellte elektromotorisch wirksame Theilchen gebe, welche durch Aenderung ihrer Richtung die bezeichneten Schwankungen des Muskel- und Nervenstromes hervorbrächten. Er nimmt an, dass ihre nach den beiden Enden der Faser hingewendeten Flächen oder Pole sich elektrisch negativ, ihr nach der cylindrischen Oberfläche der Faser hingewendeter Umfang oder Aequator dagegen positiv verhält, und sie von einem indifferenten Medium umgeben werden. Jedes dieser hypothetischen Theilchen, die er peripolar elektromotorische Molekeln

nennt, wäre in Bezug auf elektromotorische Wirksamkeit ein Abbild des ganzen Muskels oder der Primitivfaser im Kleinen; es würde Ströme geben, die in einem angelegten leitenden Bogen vom Aequator aus nach den Polen kreisen, und ähnlich würde auch jedes regelmässig geordnete Aggregat solcher Theile, als welches wir den ganzen Muskel oder Nerven zu betrachten hätten, wirken. Ich erinnere hier daran, dass das Mikroskop in der That regelmässig in Längs- und Querreihen geordnete Theilchen im Inhalte der Muskelfasern nachzuweisen scheint, nämlich jene, welche, wenn sie der Länge nach zusammenhaften, als perlschnurartige Auftreibungen der Fibrillen sich darstellen, in anderen Fällen aber, wo sie der Quere nach verklebt sind, als Scheiben sich sondern.

Ich habe in der bisherigen Darstellung mich immer hauptsächlich auf die Muskeln bezogen. In den Nerven sind alle diese Verhältnisse ganz dieselben, auch scheint die Intensität 309 der elektromotorischen Kraft etwa ebenso gross zu sein wie in gleich grossen Muskeln, aber wegen der viel geringeren Dimensionen dieser Gebilde ist der Strom, den sie im Multiplicator erregen, viel schwächer. Namentlich zur Erforschung der feineren Verhältnisse des Nervenstromes hat denn auch du Bois den vorhin erwähnten Multiplicator von 24160 Windungen angewendet.

Das Nervensystem bietet uns keinen natürlichen Querschnitt, alle seine natürlichen Oberflächen verhalten sich dem natürlichen Längsschnitt gleich. Die Centraltheile verhalten sich in ihrer elektromotorischen Wirksamkeit ganz wie die Nervenstämmen, wenn man ihre äussere Oberfläche als natürlichen Längsschnitt ansieht. Im Rückenmark, dessen Fasern meistens der Länge nach verlaufen, lässt sich die Wirkung von künstlichem Längs- und Querschnitt unterscheiden. Im Gehirn, wo die Faserungen sehr unregelmässig verflochten sind, ist ein solcher Unterschied nicht durchzuführen. Durchschnitte verhalten sich hier gegen die Oberfläche immer wie künstliche Querschnitte zum Längsschnitt.



360 Veränderungen der Muskel- und Nervenströme.

Ich habe bisher die Ströme so beschrieben, wie sie am ruhenden Muskel und Nerven vorkommen. Es giebt nun namentlich zwei Vorgänge, bei denen theils die Stromesstärken, theils die Stromesrichtungen sich wesentlich ändern, nämlich die Innervation und die elektrische Durchströmung der thierischen Gebilde. Beide Aenderungen sind durch du Bois gefunden worden, nur eine hierher gehörige Thatsache, aber nicht ihre Deutung von Matteucci. Ich beginne mit der Aenderung, welche durch elektrische Durchströmung hervorgerufen wird, weil daraus sich zunächst eine wichtige Folgerung für die Zusammensetzung der elektromotorischen Molekeln ergibt. Bisher lagen am vollständigsten die Untersuchungen über den dahin gehörigen Vorgang am Nerven vor.

Lässt man irgend eine Stelle eines Nerven von einem elektrischen Strome durchfliessen, den wir den erregenden nennen wollen, so entwickelt sich neben dem Nervenstrom, den wir früher beschrieben haben, noch eine zweite Art elektromotorischer Wirksamkeit, vermöge deren jedes Stück des Nerven in einem angelegten leitenden Bogen einen Strom erregt, der es in derselben Richtung wie der erregende Strom durchfliesst. Du Bois nennt den auf diese Weise hervorgerufenen Zustand des Nerven den elektrotonischen. Während also sonst der Nerv Ströme erregt, die an seinen beiden Enden im Bogen vom Längs- zum Querschnitt oder von den der Mitte näheren Theilen des Längsschnittes zu den den Enden näheren gehen, erregt er während des elektrotonischen Zustandes noch ein anderes System von Strömen, welche je nach der Richtung der Durchströmung entweder im ganzen Nerven von oben nach unten, oder im ganzen Nerven von unten nach oben gehen und sich mit den gewöhnlichen Nervenströmen zusammensetzen, d. h. diese da, wo sie mit ihnen gleiche Richtung haben, verstärken, wo entgegengesetzte, schwächen. Es wirkt also hierbei der Nerv seiner ganzen Länge nach ähnlich einer Voltaischen Säule, die in regelmässiger Abwechselung aus Kupfer, Zink und feuchten Papp-

scheiben aufgeschichtet in jedem beliebig angelegten leitenden Bogen einen Strom immer in derselben Richtung entwickelt.³⁶⁷ Auch der elektrotonische Zustand kann sich nur ausbilden, so lange die Nerven ihre Reizbarkeit bewahren, und seine Ausbreitung wird durch alle Umstände, welche die Fortleitung der Reize hindern, z. B. durch Unterbindung gehemmt. Die Möglichkeit dieses Zustandes ist also eine Eigenschaft, die nur den lebendigen Nerven zukommt. So lange die elektrischen Schläge nicht zu heftig sind und zu schnell vorübergehen, ist die Stärke des elektrotonischen Zustandes der jeweiligen Stromstärke proportional, und er kann, wie aus einem später zu beschreibenden Versuche folgt, innerhalb einer Sekunde mehr als hundertmal seine Richtung wechseln, wenn es der erregende Strom thut. Er ist übrigens in der nächsten Nachbarschaft der durchströmten Nervenstelle stärker als an entfernteren Stellen, und auf der Seite des Nerven, wo er den Nervenstrom verstärkt, etwas stärker als auf der entgegengesetzten auch an solchen Stellen des natürlichen Längsschnittes, die keinen Nervenstrom in den Multiplicator hinein abgeben. Will man den elektrotonischen Zustand ohne Einmischung des normalen Nervenstromes untersuchen, so braucht man den Nerven nur mit zwei symmetrischen Theilen seines Längsschnittes auf die Bäusche zu legen, sodass er im Multiplicator keinen Strom erregt. Dann sind die bei Durchströmung eines der äusseren Enden des Nerven erscheinenden Ströme nur Wirkungen des elektrotonischen Zustandes. Man muss sich dabei natürlich dagegen sichern, dass kein Theil des Stromes, den man zur Erregung des elektrotonischen Zustandes gebraucht, sich in den Multiplicator hinein abzweige. Die Mittel, das zu verhüten und zu controlliren, sind von du Bois angegeben; sie hier zu besprechen, würde uns zu sehr in das Einzelne führen.

Auch im Muskel hat du Bois einen elektrotonischen Zustand gefunden, doch die Einzelheiten seiner Untersuchung darüber noch nicht veröffentlicht. Er giebt an, dass sich derselbe nicht wie beim Nerven über die durchströmte Strecke hinaus verbreite, wohl aber in dieser selbst auch noch nach der Durchströmung anhalte, sodass man ihn nach Entfernung



des erregenden Batteriestromes hier nachweisen könne. Die besprochenen Erscheinungen sind uns vorläufig wichtig wegen der Folgerungen, welche wir daraus auf die Zusammensetzung der kleinsten wirksamen Theile zu ziehen haben. Wir sahen oben, dass die elektromotorischen Gegensätze des normalen Muskel- und Nervenstromes sich innerhalb der Fasern vorfinden müssten, und die wahrscheinlichste Annahme erschien, dass sie äusserst kleinen beweglichen Theilen des Inhaltes der Fasern zukämen, elektromotorischen Molekeln, welche nach Analogie des ganzen Muskels negative Pole und eine positive Aequatorialzone hätten. Versuchen wir aber die Ströme des elektrotonischen Zustandes auf die Wirkung der kleinsten Theile des Muskels zurückzuführen, so müssen wir Theilchen annehmen mit einem positiven und einem negativen Pole, die im ganzen Muskel gleichmässig gerichtet sind. Im Gegensatze zu der ersteren Art der Molekeln, den peripolaren Elektromotoren des Muskelstromes, bezeichnet du Bois die zweiten ³⁶⁸ des elektrotonischen Zustandes als dipolare, und vereinigt beide durch die einfache Annahme, die peripolaren seien aus je zwei dipolaren zusammengesetzt, welche sich die gleichnamigen Pole zukehren. Gehe ein fremder Strom durch den thierischen Theil, so kehre er einen Theil der ihm entgegengesetzt wirkenden dipolaren Molekeln um, sodass sie mit ihm in gleicher Richtung wirken. Die eigenthümliche Beschaffenheit des natürlichen Querschnittes unter dem sehnigen Ueberzuge bei frischen Muskeln, welche ich oben erwähnt habe, erklärt sich dann sehr leicht durch die Annahme, dass hier eine Schicht dipolarer Molekeln vorhanden sei, welche dem Muskelstrom entgegenwirken und so die Wirkung der übrigen peripolaren Molekeln neutralisiren. Wird diese Schicht durch einen fremdartigen chemischen Einfluss oder Erwärmung unwirksam gemacht, oder wird sie durch das Messer abgetragen, so kommt die Wirkung der übrigen elektromotorischen Theile ungeschwächt zum Vorschein.

Es bleibt mir noch übrig, diejenige Veränderung des Muskel- und Nervenstromes zu schildern, welche eintritt, während diese Theile einer Reizung ausgesetzt werden. Ich habe schon oben angeführt, was man unter Reizung versteht,

und dass jede äussere Einwirkung von hinreichender Energie im Nerven den Empfindung und Bewegung vermittelnden Zustand hervorbringt. Bei den jetzt zu besprechenden Versuchen kommt es darauf an, diesen Zustand der Reizung so lange zu unterhalten, dass das astatische Nadelpaar des Multiplicators, dessen Bewegungen ziemlich träge sind, Zeit habe, die Veränderung der Stärke des elektrischen Stromes anzugeben. Eine solche anhaltende Reizung lässt sich bewirken durch fortschreitendes Zerquetschen, Verbrennen oder Anätzen des Nerven von seinem oberen Ende an bis zum Muskel hin, ferner durch Vergiftung des Thieres mit Strychnin, einem vegetabilischen Alkali, welches vom Rückenmark aus ziemlich anhaltende Anfälle von Starrkrampf in sämtlichen Muskeln des Körpers hervorbringt; endlich durch Electricität. Was das letztere Mittel betrifft, so entsteht durch einen anhaltenden elektrischen Strom, der einen motorischen Nerven durchläuft, nur im Moment seines Anfanges und seines Endes eine Reizung; oder allgemeiner gesagt, nicht die Durchströmung des Nerven an und für sich, sondern nur Schwankungen in der Stärke der Durchströmung reizen. Um also anhaltend zu reizen, muss man elektrische Ströme gebrauchen, deren Stärke fortdauernden Schwankungen ausgesetzt ist, am besten Ströme, deren Richtung zugleich möglichst schnell wechselt, wie sie z. B. durch die verschiedenen magnetelektrischen Apparate erzeugt werden. So lange solche den Nerven oder Muskel durchströmen, bleibt der letztere in anhaltender krampfartiger Spannung. Gleichzeitig haben die hin und hergehenden Ströme von stets wechselnder Richtung für unsere Versuche den Vortheil, dass sie die Magnetnadel des Multiplicators nicht in Bewegung setzen; sie geben ihr nämlich fortdauernd Anstösse in entgegengesetzter Richtung, die sich gegenseitig aufheben. Wenn also beim Gebrauche solcher Ströme zur Reizung des Nerven sich wirklich ein kleiner Theil durch die leitenden thierischen Gebilde hindurch in den Multiplicator ab- ³⁶⁹ zweigt, so würde derselbe die Nadel unberührt lassen.

Man lege einen Muskel so auf die Bäusche des Multiplicators, dass er Muskelstrom giebt, und reize anhaltend seinen Nerven mechanisch, caustisch, durch Aetzmittel, Strychnin-



vergiftung oder Elektrizität, so zeigt der Multiplicator so lange eine beträchtliche Verminderung des Muskelstromes an, als der Muskel contrahirt bleibt. Man lege ferner einen Nerven mit einem Ende auf die Bäusche, sodass er Nervenstrom giebt, und reize sein anderes Ende nach einer der bezeichneten Weisen anhaltend, so zeigt sich eine beträchtliche Verminderung des Nervenstromes, so lange die Reizung dauert. Hat man aber Muskel oder Nerv so aufgelegt, dass sie keinen Strom geben, so entsteht auch keiner während der Reizung. Die Art der Vertheilung der elektromotorischen Gegensätze, ihre peripolare Anordnung, bleibt also auch während der Reizung bestehen, nur die Intensität der Ströme erleidet eine Veränderung. Der Multiplicator giebt uns zunächst darüber nichts weiter an, als dass diese Intensität sich verringert; nachher werden wir durch ein anderes Hilfsmittel noch mehr darüber erfahren.

Ich gab eben an, dass bei allen denjenigen Anordnungen, wo der Muskel so aufgelegt ist, dass er keinen Muskelstrom giebt, auch während der Reizung keiner erscheine. Diese Regel erleidet eine Ausnahme. Der natürliche Querschnitt unterscheidet sich im ganz frischen, unverletzten Zustande in seinen elektromotorischen Wirkungen vom künstlichen. Er giebt mit dem Längsschnitt des Muskels keinen Strom; du Bois-Reymond erklärt das, wie ich oben angegeben, durch die Annahme einer dipolaren Schicht unter dem natürlichen Querschnitte, welche die Wirkungen der übrigen elektromotorischen Theilchen nach aussen hin aufhebe. Legt man nun einen Muskel mit natürlichem Längs- und Querschnitt so auf die Bäusche, dass sein Querschnitt vor allen fremdartigen Flüssigkeiten geschützt bleibt, z. B. eingehüllt in seinen natürlichen Hautüberzug, so giebt er vor der Reizung keinen Strom, wohl aber während derselben, und dieser Strom ist dann entgegengesetzt gerichtet, als es der normale Muskelstrom sein würde, wenn er existirte. Die Erscheinung erklärt sich, wenn wir annehmen, dass die hypothetische Schicht dipolarer Moleculn am natürlichen Querschnitte bei der Reizung unverändert bleibt; dann muss nämlich der Strom derselben, welcher vorher dem Muskelstrom das Gleichgewicht hielt, nach der Verminderung des

letzteren überwiegend werden, und in einer Richtung erscheinen, welche der des Muskelstromes entgegengesetzt ist.

Durch diesen Umstand wird es möglich, die Schwankung des Muskelstromes während der Reizung — du Bois nennt sie negative Schwankung, um die Verminderung des Stromes durch diesen Namen auszudrücken — diese Schwankung auch an unversehrten Gliedmaassen nicht bloss lebender Thiere, sondern selbst des Menschen zu zeigen. Da der Versuch am letzteren für uns von besonderem Interesse ist, beschreibe ich ihn kurz. Die Platinplatten, welche an die Enden der Multiplicatordrähte befestigt sind, tauchen wie gewöhnlich in Gefässe mit Kochsalzlösung gefüllt. In eines dieser Gefässe taucht der Experimentirende einige Finger der einen, in das andere dieselben der anderen Hand, während er die Hände selbst auf eine hölzerne Unterlage aufstützt, um ihnen eine sichere Stellung zu geben. Ungleichmässigkeiten in der Haut der eingetauchten Finger bedingen gewöhnlich vorübergehende leichte Bewegungen der Nadel; endlich kommt sie zur Ruhe. Jetzt spannt der Experimentirende sämtliche Muskeln des einen Armes, während die des anderen erschlafft bleiben. Sogleich setzt sich die Nadel in Bewegung und zeigt einen Strom an, welcher in dem gespannten Arme von der Hand zur Schulter geht und so lange anhält wie die Spannung des Armes. Es geht daraus hervor, dass auch der Mensch in jedem seiner Muskeln einen elektromotorischen Apparat besitzt, den er in jedem Augenblicke nach aussen wirksam machen kann. Freilich sind diese Wirkungen sehr schwach, weil eben nur ein äusserst geringer Theil dieser Ströme nach aussen abgeleitet werden kann.

Eine viel vollständigere Idee von der negativen Stromeschwankung bekommen wir durch ein zweites Hilfsmittel zur Auffindung sehr schwacher elektrischer Ströme, nämlich durch den stromprüfenden Froschschenkel. Man versteht darunter einen enthäuteten Unterschenkel nebst Fuss eines Frosches, den man so vom Thiere getrennt hat, dass der ganze Hüftnerv damit in Verbindung bleibt. Der schwächste und flüchtigste elektrische Strom, welchen man durch den Nerven fliessen lässt, erregt eine Zuckung. Ich habe schon erwähnt, dass erst die



höchste Vervollkommenung des Multiplicators nöthig war, um ihm dieselbe Empfindlichkeit für elektrische Ströme zu geben, wie sie der Nerv besitzt. Diese beiden Stromprüfer gehen sich aber in ihren Anzeigen keineswegs parallel. Der Multiplicator giebt das dauernde Vorhandensein eines Stromes zu erkennen, das thierische Präparat antwortet nur auf Stromesschwankungen. Jener kann sehr schnell vorübergehende schwache Ströme nicht angeben, welche hier die heftigste Zuckung hervorrufen, und wiederum bleibt der Nerv unempfindlich gegen langsam ansteigende, gleichmässig andauernde und langsam sinkende selbst recht heftige Ströme, welche auch durch einen unempfindlichen Multiplicator leicht angegeben werden. So lange ein Strom gleichmässig andauert, wird wohl der Multiplicator, nicht aber das thierische Präparat afficirt, aber jener kann einen gleichmässig andauernden Strom nicht von einem solchen unterscheiden, welcher sehr schnellen periodischen Schwankungen seiner Grösse oder Unterbrechungen unterworfen ist, während der Muskel durch letzteren in anhaltenden Krampf versetzt wird. Wir können also durch den stromprüfenden Froschschenkel einiges ermitteln, wobei uns der Multiplicator seine Dienste versagt.

Der normale Muskelstrom kann durch den stromprüfenden Schenkel angegeben werden; man braucht nur den Nerven des letzteren als leitenden Bogen so mit einem Muskel in Verbindung zu setzen, dass er dessen Längs- und Querschnitt berührt. So oft man diese Verbindung herstellt und unterbricht, erfolgt Zuckung des stromprüfenden Schenkels. Diese Versuche lassen uns nicht mehr, und noch nicht einmal so viel erkennen wie die am Multiplicator, und gelingen nur bei ausgesucht reizbaren Präparaten. Sie sind nur deshalb wichtig, weil es die ersten sind, welche die Kenntniss der thierischen Elektrizität unter Galvani's und A. v. Humboldt's Händen eröffneten.

Wenn man nun den Nerven des stromprüfenden Schenkels so auf einen Muskel gelegt hat, dass er vom Muskelstrom durchflossen wird, und diesen Muskel zucken lässt, so wird man finden, dass bei jeder seiner Zuckungen auch der stromprüfende Schenkel zuckt. Bringt man jenen Muskel in anhaltende Zusammenziehung, so bleibt auch der stromprüfende

Schenkel ebenso lange in krampfhafter Spannung wie jener. Diese Erscheinung ist von Matteucci entdeckt und inducirte Zuckung, von du Bois aber erst erklärt und secundäre Zuckung genannt worden. Legt man auf den secundär zuckenden Muskel wieder den Nerven eines dritten Muskels und auf diesen den eines vierten, so zucken sämtliche Muskeln, so oft der erste zuckt.

Du Bois hat zunächst gegen Matteucci nachgewiesen, dass es elektrische Strömungen sind, welche die secundäre Zuckung hervorrufen, und dass diese nur dann eintritt, wenn der Nerv so mit dem Muskel entweder unmittelbar oder durch andere elektrische Leiter verbunden ist, dass er vom Muskelstrom durchflossen wird. Die secundäre Zuckung entsteht also während der negativen Schwankung des Muskelstromes, und da der stromprüfende Froschschenkel während der ganzen Dauer der negativen Stromesschwankung in der Zusammenziehung beharrt, so folgt nach dem, was wir oben über die Eigenthümlichkeit seines Verhaltens gegen elektrische Ströme gesagt haben, dass wir es hier nicht mit einer gleichmässigen Verringerung des Muskelstromes, sondern mit einer sehr schnellen periodischen Ab- und Zunahme desselben zu thun haben. Wie weit seine Abnahme geht, ob er gleich Null wird, oder selbst für Augenblicke seine Richtung umkehrt, darüber hat noch nichts ermittelt werden können.

Der Versuch gelingt übrigens auch, wenn man den Nerven des stromprüfenden Präparates theilweis in eine Muskelwunde eines beliebigen lebenden Thieres hineinlegt und nun Zusammenziehungen hervorruft. Bei jeder Zuckung des verwundeten Muskels zuckt der Froschschenkel mit. Es findet hier eine merkwürdige Aehnlichkeit zwischen diesen Vorgängen an Muskeln und den wunderbaren Wirkungen der elektrischen Organe einiger Fische statt. Jeder Muskel bildet gleichsam ein elektrisches Organ im Kleinen. Am meisten bekannt sind die Wirkungen der Zitterrochen des mittelländischen Meeres und der Zitteraale Südamerikas. Diese Fische sind fähig, mittels ihrer an den Seiten ihres Körpers liegenden eigenthümlichen Organe von verhältnissmässig beträchtlicher Grösse elektrische Entladungen hervorzubringen, welche sich durch die umgebende



Wassermasse ausbreiten und die darin befindlichen Thiere tödten, oder doch durch wiederholte heftige Zuckungen ermatten. Sehr lebhaft hat A. v. Humboldt den Kampf der ³⁷² Zitteraale gegen Pferde beschrieben, welche in das Wasser hineingetrieben sind. Die elektrischen Entladungen können ganz wie die Zusammenziehungen der Muskeln durch den Willen des Fisches und durch jede künstliche Reizung der Nerven des elektrischen Organs hervorgerufen werden. Ganz wie der Muskel versetzt das elektrische Organ während der Innervation einen seinem Strome ausgesetzten Nerven in dauernde Reizung, und bei beiden müssen wir aus der Art ihrer physiologischen Wirkungen auf Ströme mit sehr schnellen Schwankungen oder Unterbrechungen schliessen. Sie unterscheiden sich nur bedeutend durch die Stärke ihrer elektrischen Wirkungen und durch die Zusammenziehung, welche dem elektrischen Organe fehlt.

Auch vom Nerven aus kann man secundäre Zuckungen hervorbringen, wenn man den Nerven des stromprüfenden Schenkels der Länge nach an eine Strecke eines zweiten elektrisch gereizten Nerven anlegt. Dabei zuckt der Schenkel, als wäre es sein eigener Nerv, der von den elektrischen Strömen getroffen würde. Aber es ist hier nicht die negative Stromesschwankung des zweiten Nerven, welche den ersten erregt, sondern es sind die Ströme seines elektrotonischen Zustandes. Daher entsteht diese Art der secundären Zuckung nur bei elektrischer Reizung, und es ist nicht nöthig, dass der stromprüfende Nerv vom normalen Nervenstrom des anderen getroffen werde, sondern es genügt, dass beide mit einer kleinen Strecke ihrer Länge nebeneinander liegen. Die negative Stromesschwankung im Nerven bei mechanischer, chemischer, caustischer Reizung oder Vergiftung durch Strychnin scheint den angelegten Nerven nicht kräftig genug zu afficiren, um Zuckungen hervorzubringen.

Die inducirte Zuckung vom Nerven aus lehrt uns übrigens die Schnelligkeit kennen, mit welcher der Nerv im elektrotonischen Zustande die Richtung seiner Wirksamkeit ändern kann. Wir besitzen eine Art von magnetelektrischen Inductionsapparaten, erfunden von Neef, in denen ein hydroelektrischer

Strom durch eine schwingende Feder, deren Bewegung er selbst unterhält, fortdauernd geöffnet und wieder geschlossen wird. Eisenmassen, welche durch diesen Strom magnetisirt werden, erzeugen in einer zweiten Stromleitung bei jeder Oeffnung jenes ersten Stromes einen inducirten elektrischen Schlag in der einen, bei jeder Schliessung einen in der entgegengesetzten Richtung, welche Schläge durch einen thierischen Theil geleitet, eine mächtige physiologische Wirkung hervorbringen. Durch den Ton, welchen die schwingende Feder giebt, kann man die Zahl ihrer Schwingungen in der Secunde, also auch die Zahl der hin und hergehenden Inductionsschläge ermitteln. Die gewöhnlichen Apparate geben einen Ton von 100 bis 300 Schwingungen in der Secunde und doppelt so viel Wechsel in der Richtung der inducirten Ströme. Leitet man die letzteren durch einen Nerven, so kann dieser nur dann secundäre Zuckungen bewirken, wenn sein elektrotonischer Zustand ebenso schnelle Schwankungen macht wie der erregende Strom. Bei der Ausführung des Versuches findet man in der That sehr leb- ³⁷³hafte secundäre Zuckungen. Doch beweisen gewisse Erscheinungen am Multiplicator, deren Erörterung hier nicht wohl auszuführen ist, dass man bei so flüchtigen Strömen schon der Grenze nahe kommt, wo die Nervenmoleculn dem erregenden Strome nicht mehr zu folgen vermögen.

Neben den bisher besprochenen Bewegungserscheinungen des Muskel- und Nervenstromes ist noch zu bemerken, dass beiderlei Ströme zuweilen im letzten Stadium des Absterbens namentlich der zarteren thierischen Theile eine umgekehrte Richtung zeigen. Das ist bei den Muskeln warmblütiger Thiere, an den centralen Theilen des Nervensystems und den Nervenwurzeln auch der Frösche nicht ganz selten. Dieselbe Umkehr in der Richtung fand du Bois häufig bei Muskeln und Nerven, die einen Augenblick in siedendes Wasser getaucht waren. Wenn die Ströme von kleinen beweglichen elektromotorischen Theilchen erregt werden, so hat auch diese Aenderung ihrer Richtung nichts auffallendes.

Ich habe jetzt die Uebersicht der wesentlichsten Thatsachen, welche in dem besprochenen Gebiete aufgefunden sind, gegeben. Fassen wir sie noch einmal mit Weglassung aller



theoretischen Zusätze und mit besonderer Berücksichtigung des physiologischen Interesse zusammen.

1) Die unverletzten ruhenden Muskeln und Nerven wirken nach aussen hin gar nicht elektromotorisch.

2) Sie thun dies aber, sobald ihre Fasern quer durchschnitten werden, oder eine äusserst dünne Schicht Muskelsubstanz unter der Sehnenausbreitung (dem natürlichen Querschnitte) unwirksam gemacht wird.

3) Innerhalb einer jeden Primitivfaser sind sämtliche Bedingungen für elektromotorische Wirksamkeit vorhanden. Ob dadurch innerhalb der unverletzten Fasern schon Ströme erzeugt werden, wie es die Hypothese der peripolaren Molekeln von du Bois voraussetzt, kann allerdings aus den Thatsachen bis jetzt noch nicht geschlossen werden. Es wäre möglich, dass den Strömen erst durch die Verletzung und Anlegung eines Bogens Wege gegeben würden. Jedenfalls sind die Ströme im Multiplicator nur schwache abgezweigte Theile der Strömungen, welche in den thierischen Theilen und an der Grenzfläche zwischen ihnen und dem ableitenden Bogen kreisen.

4) Im angelegten leitenden Bogen gehen die Ströme von demjenigen seiner Endpunkte, welcher der Mitte des Längsschnittes zu dem, welcher der Mitte eines der Querschnitte am nächsten ist, nur bei absterbenden Muskeln und Nerven findet man zuweilen das Gegentheil. Liegen beide Enden des Bogens am Querschnitte oder beide am Längsschnitte, so sind die Ströme sehr viel schwächer, als wenn eines am Längsschnitte und eines am Querschnitte liegt.

5) Die elektromotorische Wirksamkeit verschwindet mit dem Eintritt der Todtenstarre und dem Verlust der Reizbarkeit.

374 6) Die elektromotorische Wirksamkeit der Muskeln und Nerven ist sehr schnellen Wechseln ihrer Stärke und Richtung ausgesetzt, sowohl im elektrotonischen Zustande als während der Innervation.

7) Am unwirksamen unverletzten Muskel ist die Innervation begleitet von Strömen im leitenden Bogen, deren Vertheilung dem normalen Muskelstrom entspricht, deren Richtung ihm aber entgegengesetzt ist. Am verletzten wirksam gewordenen Muskel zeigt sich eine Verminderung des

normalen Stromes. Die Stromstärke ist aber während der Dauer der Innervation nicht constant, sondern in sehr schnellen Schwankungen begriffen.

8) Wirksame Nervenstücke zeigen, während sie eine Innervation fortleiten, ebenso eine Verminderung des Nervenstromes. Bei ihnen wie bei den Muskeln ist die Stromesschwankung, welche jede Innervation begleitet, zwar zunächst nur im leitenden Bogen wahrgenommen worden, lässt aber mit Sicherheit auf eine gleichzeitige Veränderung der elektromotorischen Anordnungen im Innern der thierischen Theile zurückschliessen.

9) Die Fähigkeit des Nerven, bei Durchströmung eines seiner Theile in elektrotonischen Zustand zu gerathen, kommt ihm ebenfalls nur zu, so lange er noch reizbar ist. Er wirkt in diesem Zustande seiner ganzen Länge nach in gleichem Sinne elektromotorisch.

Ich füge noch einige Bemerkungen über die physiologische Bedeutsamkeit dieser Thatsachen an. Was zunächst den normalen Muskel- und Nervenstrom betrifft, so verrathen sie uns eine sehr eigenthümliche Beschaffenheit des Innern dieser Gebilde, wie wir sie bisher noch an keinem unorganischen Körper gefunden haben, eine Beschaffenheit, welche auch offenbar mit den wesentlichen Lebenseigenschaften dieser Theile im engsten Zusammenhange steht, da sie immer nur mit diesen verbunden vorkommt. Eine nähere Einsicht in die Verbindung zwischen der elektromotorischen Wirkungsfähigkeit und der Reizbarkeit ist uns allerdings noch nicht verstattet. Wir wissen nicht einmal mit Bestimmtheit, ob Ströme im unverletzten Muskel vorkommen. Chemische Zersetzungen, wie sie durch solche Ströme bedingt werden müssten, scheinen allerdings vorhanden zu sein, da auch der ruhende Muskel nach G. Liebig's Versuchen der Absorption von Sauerstoff zur längeren Unterhaltung seiner Reizbarkeit bedarf. Jedenfalls werden die elektromotorischen Anordnungen im Innern des Muskels wirksam und geben auch nach aussen hin Ströme ab, sowie der Muskel in Thätigkeit gesetzt wird.

Viel mehr Erkenntniss versprechen die Gesichtspunkte, welche die Kenntniss der negativen Stromesschwankung bei der Innervationsthätigkeit im Muskel und Nerven eröffnet.



375 Während eine Nervenstrecke eine Reizung fortleitet, geht in ihr selbst eine physikalisch wahrnehmbare Veränderung vor, in welche jedenfalls — und das ist eine Thatsache von höchster Wichtigkeit — auch die materiellen Theile des Nerveninhalts mit hineingezogen werden. Denn elektrische Ströme, welche flüssige Leiter durchfliessen, bringen chemische Zersetzungen derselben hervor, welche letzteren wiederum auf die Stärke jener Ströme zurückwirken. Also selbst abgesehen von der Hypothese der elektromotorischen Molekeln, lässt die negative Stromesschwankung schliessen, dass jede Thätigkeitsäusserung der Muskeln und Nerven von Veränderungen in den elektrochemischen Processen begleitet sei. Eine bestimmtere Vorstellung über die Art, wie die materiellen Theile afficirt werden, bietet die theoretische Ansicht von du Bois. Wir werden uns in Erwägung der ungemein schnellen Wechsel, welche Richtung und Stärke der elektromotorischen Kräfte darbieten, kaum der Ansicht entziehen können, dass diese Kräfte sehr beweglichen kleinen Theilchen des Inhalts zukommen, wie diese auch übrigens gestaltet und geordnet sein mögen, und dass durch die Reizung die Richtung dieser Theilchen vorübergehend von der gereizten Stelle des Nerven ab bis zum Muskel und in diesem selbst geändert werde. Die Lagenänderung der elektromotorischen Molekeln würde danach also mindestens ein Glied in dem Mechanismus der Reizung bilden. Hier drängt sich natürlich die Frage auf: sollte diese Bewegung der Molekeln vielleicht mehr sein als ein unwesentlicher Nebenvorgang, welcher das Spiel immaterieller Agentien begleitet? Die Physiologie wird diese neue Thatsache darauf prüfen müssen, ob sie nicht den Schlüssel zur Erklärung der Fortpflanzung der Nervenwirkungen bietet. Ich habe vorher schon angeführt, dass einige Physiologen annehmen, was sich bei der Reizung durch die Nerven hin fortplanze, sei eine Schwingung, ein Stoss, oder irgend eine bestimmte Bewegungsform, ähnlich den Wellen, wie sie sich an einer Saite, an der Oberfläche des Wassers, oder als Schallwellen in der Luft, als Lichtwellen im Aether fortplanzen. Jetzt sind wir auf die Vorstellung einer solchen Bewegung auch durch die elektrischen Erscheinungen geführt worden. Ich bemerke, dass das Re-

sultat meiner eigenen Untersuchungen über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Nervenreizung, aus denen sich ein unerwartet niedriger Werth derselben ergibt, so unverträglich es mit der älteren Ansicht vom Nervenagens als einem immateriellen oder imponderablen Principe ist, ebenso gut dagegen mit der eben bezeichneten Ansicht übereinstimmt. Denn von einer Bewegung der materiellen Theile des Nerveninhalts brauchen wir eine so überaus grosse Fortpflanzungsgeschwindigkeit nicht zu erwarten.

Du Bois verspricht eine positive, auf Thatsachen gestützte Theorie des Nervenagens und der motorischen Kraft der Muskeln zu geben.¹⁾ Aus dem eben Gesagten erhellt nun in der That, dass schon seine bis jetzt veröffentlichten Untersuchungen neue, bisher fehlende Anhaltspunkte gewähren; wir können seinen weiteren Veröffentlichungen hier natürlich nicht vorgreifen. Nur gegen ein häufig vorgekommenes Missverständniss seiner darauf bezüglichen Aeusserungen kann ich ihn hier verwahren, weil die Widerlegung sich aus den bisher vorgetragenen Thatsachen leicht ergibt. Es betrifft dies seine Aeusserung, er habe vor, die Identität der Elektricität und des Nervenagens nachzuweisen.²⁾ Man glaubt vielfach, er wolle im alten Sinne 376 der Identitätslehre Elektricität durch die Nerven wie durch leitende Drähte strömen lassen. Dass dies nicht der Fall ist, ergibt sich am besten daraus, dass er einen Abschnitt seines Werkes der Widerlegung der Annahme isolirender Hüllen um die Nervenfasern gewidmet hat.³⁾ Dass dagegen die elektrischen Kräfte der stromumflossenen Molekeln in einer Theorie ihrer Bewegungen mit in Betracht gezogen werden müssen, versteht sich von selbst. Es wird also der Elektricität eine Rolle in der Theorie der Nervenreizung bei den vorliegenden Thatsachen nicht mehr versagt werden können.

Ausser dieser Frage über die Natur des Nervenagens sind es aber noch einige andere wichtige physiologische Punkte, über welche uns die negative Stromesschwankung Aufschluss giebt

1) Comptes rendus. 25 Mars 1850.

2) Unters. über th. Elektr. Bd. I. Vorrede XV und Sitzungsbericht der Berl. Akad. 3. Juli 1851.

3) Unters. über th. Elektr. Bd. II. S. 275.



oder verspricht. Bisher hatten wir kein anderes Mittel zu erfahren, ob ein Nerv im Reizungszustand sei, oder eine Reizung leite, als die daraus resultirende Thätigkeit anderer organischer Theile, entweder die Bewegung des Muskels oder die Empfindung im Gehirne. Die negative Stromesschwankung giebt ein neues Mittel in die Hand, wodurch wir, unabhängig von der Wirksamkeit jedes anderen Theiles, durch eine physikalische Thätigkeit des Nervenstammes selbst darüber Auskunft erhalten können. So z. B. war bisher nicht zu ermitteln, ob die Reizung einer Stelle im Stamme eines motorischen Nerven sich nur nach den Muskeln hin oder auch nach dem Gehirn zu, die eines sensiblen sich nur nach dem Gehirn oder auch nach der Peripherie hin fortpflanze. Wahrgenommen wurde ein Erfolg der Reizung des motorischen Nerven nur am Muskel, eines sensiblen nur im Gehirn. Das konnte aber sehr wohl auch bei doppelsinniger Leitung in beiderlei Arten der Nerven davon abhängen, dass die Wurzeln der motorischen Nerven mit keinen empfindungsfähigen Hirntheilen, und die peripherischen Enden der sensiblen Nerven in der Haut mit keinen contractilen Organen in Verbindung standen, sodass ihre Reizung immer nur an einem ihrer Enden einen Erfolg haben konnte. Es war daher wichtig zu entscheiden, ob die negative Schwankung des Nervenstromes bei der Reizung sich auch in rein motorischen und rein sensiblen Nervenstämmen doppelsinnig fortpflanze. Die meisten Nervenstämmen des Körpers enthalten beiderlei Arten von Fasern; aber jeder Nerv, welcher aus dem Rückenmark der Wirbelthiere hervorkommt, entspringt mit zwei Wurzeln, einer vorderen rein motorischen und einer hinteren rein sensiblen, deren Fasern sich bei der Vereinigung zu einem Nervenstamme vermischen. Du Bois hat die Fortleitung der negativen Stromesschwankung an diesen Wurzeln untersucht, und gefunden, dass sie sich in beiderlei Arten von Fasern nach beiden Richtungen, sowohl nach dem Gehirn als nach den peripherischen Theilen hin fortpflanze.

377 Ob der elektrotonische Zustand der Nerven, diese eigenthümliche Art elektrischer Polarisirung, welche bei der Durchleitung eines elektrischen Stromes entsteht, eine physiologische Bedeutung habe, lässt sich noch nicht entscheiden. Es scheint

unwahrscheinlich, weil dieser Zustand sich in einiger Entfernung von der durchströmten Stelle merklich schwächt, und weil im Organismus, so viel uns bekannt ist, keinerlei Gelegenheit zur Erzeugung eines elektrischen Stromes gegeben ist, der die Nerven der Länge nach durchströmt. Von den motorischen Nerven wissen wir ausserdem mit Bestimmtheit, dass eine anhaltende elektrische Durchströmung von constanter Stärke, also auch ein constant unterhaltener elektrotonischer Zustand nicht als Reiz auf sie einwirkt. Anders ist es freilich mit den sensiblen. Auch in ihnen erregen Schwankungen der Stromstärke heftigere Empfindungen als ein gleichmässig andauernder Strom, aber letzterer ist nicht ganz ohne Wirkung. Bei schwacher aufsteigender Durchströmung des Sehnerven, d. h. einer solchen vom Auge zum Gehirn, empfinden wir ein hellvioletttes Licht, bei absteigender ein dunkleres rothgelbes. Bei aufsteigender Durchströmung der Zungennerven empfinden wir einen lebhafteren sauren, bei absteigender einen schwächeren unbestimmt bitteren oder alkalischen Geschmack. Hier wäre es nun allerdings möglich, dass der elektrotonische Zustand des Nerven das ist, was die Empfindung vermittelt.

Dies möge genügen, um die physiologische Wichtigkeit dieser Untersuchungen an das Licht zu stellen, welche früher manchem Physiologen als müssige Kleinigkeitskrämerei erschienen sein mögen. Ich übergehe manche andere wichtige Folgerungen aus ihnen, welche mehr den experimentirenden Physiologen als den Physiker oder Arzt interessieren.



XC.

Versuche über das Muskelgeräusch.

Aus den Monatsberichten der Akademie der Wissenschaften zu Berlin vom 23. Mai 1864. S. 307–310. — Verhandlungen des naturhistorisch-medizinischen Vereins zu Heidelberg. Bd. III. S. 155–157. 27. Mai 1864.

907 1. Das bekannte und oft bezweifelte Muskelgeräusch hört man sehr deutlich und unter Umständen, wo Reibung des Ohres oder des Stethoskops an der den Muskel bedeckenden Haut ganz ausgeschlossen sind, wenn man sich an einem stillen Orte, am besten des Nachts, die Ohren mit Pfropfen aus Siegellack oder aus nassem Papier dicht verstopft, und dann Muskeln des Kopfes z. B. die Masseteren in kräftige Zusammenziehung bringt. So lange die Muskeln in gleichmässiger Spannung bleiben, hört man ein dumpfes, brausendes Geräusch, dessen Grundton durch vermehrte Spannung nicht wesentlich verändert wird, während das damit vermischte Brausen stärker und höher wird.

Nicht bloss die Spannung der kräftigen Kaumuskeln, der Masseteres, Pterygoidei und Temporales, sondern auch die der viel schwächeren Gesichtsmuskeln, der Orbiculares oris und palpebrarum, des Platysma myoides, des Levator labii superioris alaeque nasi, der Zunge u. s. w. giebt hörbare Geräusche, die alle im Wesentlichen von demselben Charakter sind, nur lauter, deutlicher und reiner, wie die bekannten Geräusche, welche man hört, wenn man das Stethoskop auf die zusammengezogenen Muskeln des Armes setzt.

Die Höhe des Grundtones des musikalischen Theiles dieser Geräusche zu bestimmen ist sehr schwer, weil er an der unteren

Grenze der wahrnehmbaren Töne liegt. Herr S. Haughton¹⁾ 308 hat ihn kürzlich durch mehrere Personen bestimmen lassen, er entsprach bald dem C von 32 Schwingungen, bald dem D von 36; 35 bis 36 war auch die höchste Zahl, welche Wollaston dafür gefunden hat. Ich finde dasselbe für meine Kaumuskeln, dagegen ist der Ton für die schwächeren Gesichtsmuskeln etwas tiefer.

2. Ich wiederholte diese Beobachtungen, aber so, dass ich die Zusammenziehung der Muskeln nicht durch meinen Willen, sondern durch einen Inductionsapparat mit schwingender Feder hervorbrachte, der bei passender Einstellung bis 130 Schwingungen der Feder und ebenso viel Oeffnungsschläge geben konnte. Der Inductionsapparat stand in einem durch zwei geschlossene Thüren getrennten Zimmer, sodass unmittelbar durchaus nichts von seinem Tone gehört werden konnte. So wie ich aber die Elektroden an meinen Masseter ansetzte und ihn dadurch in kräftige Contraction brachte, hörte ich den Ton der Feder des Inductionsapparates. Wurde derselbe von einem Gehülfen durch andere Einstellung der Schraube verändert, so hörte ich die Veränderung.

Dass der Ton aus dem zusammengezogenen Muskel gehört wurde, und nicht durch eine directe Wirkung der elektrischen Ströme auf das Ohr, ging namentlich daraus hervor, dass der Ton erst dann hörbar wurde, wenn die Stromstärke genug gesteigert wurde, um eine Zusammenziehung des Muskels zu geben.

3. Ebenso gelang es, wenn auch weniger stark, den Ton mittels des Stethoskops zu hören aus den Armmuskeln eines jungen Mannes, welche durch die sie durchfliessenden Inductionsströme in Zusammenziehung gebracht waren. In diesem Falle wurde das Ohr und der Gehörnerv des Beobachters selbst gar nicht von den elektrischen Strömen getroffen. Man hätte aber daran denken können, dass der elektrische Strom den gespannten Muskel direct, wie einen gespannten Draht, in Erschütterung setzte. Um auch diese Möglichkeit auszuschliessen, liess ich endlich den Strom durch den Nervus medianus am Oberarm

1) Outlines of a new theory of muscular action, being a thesis read for the degree of Doctor in Medicine etc. London 1863.



gehen und schwächte seine Stärke so, dass er direct auf die Muskeln applicirt, diese nicht in Zusammenziehung brachte. Sowie der Strom den Nerven kräftig genug traf, dass starke Contractionen der Vorderarmmuskeln entstanden, hörte ich aus diesen den Ton der stromunterbrechenden Feder deutlich heraustönen. Wenn ich dagegen die Elektroden am Oberarm ganz wenig zu Seite schob, dass die Wirkung auf die Vorderarmmuskeln aufhörte, so verschwand auch der Ton.

Daraus geht hervor, dass die periodische Bewegung, welche der Draht dem Nerven zuleitete in Form von elektrischen Stössen, vom lebenden Nerven mit unveränderter Periode zum Muskel geleitet wurde, und in diesem endlich wieder in eine mechanische Erschütterung, in Schallschwingungen, umgesetzt wurde. Die Zahl der Schwingungen betrug hierbei 130 in der Secunde.

Diese Versuche scheinen mir erstens jeden Zweifel an der Existenz eines eigenthümlichen, von dem Zustande der Contraction abhängigen Muskelgeräusches und jede Erklärung desselben aus einer Reibung des Muskels an den umliegenden Theilen oder dieser aneinander zu beseitigen.

Dass ein scheinbar gleichmässig zusammengezogener Muskel in der That in einem schnellen Wechsel entgegengesetzter Molecularanordnungen begriffen sei, war von Hrn. E. du Bois-Reymond schon aus der Erscheinung des sogenannten secundären Tetanus gefolgert worden. Die Geschwindigkeit dieses Wechsels ist einer der wesentlichsten Gründe, dass die elektrischen Wirkungen der Muskeln auf die Existenz sehr kleiner elektromotorischer Molekeln zurückgeführt werden müssen. Aber der Beweis eines solchen Wechsels beruhte hauptsächlich nur auf dem Umstande, dass der Muskelstrom eines tetanisirten Muskels, durch einen anderen Nerven geleitet, dessen Muskel ebenfalls tetanisirt. Dazu würden etwa zehn Wechsel in der Secunde ausreichen. Wenn es nun auch schon äusserst wahrscheinlich erscheinen mochte, dass die Zahl der inneren Veränderungen eines durch eine Reihe von Inductionsschlägen tetanisirten Muskels der Zahl der elektrischen Schläge gleich käme, so glaube ich doch, dass ein directer Beweis dafür, wie er durch den Ton des Muskels geliefert wird, unter diesen Verhältnissen von Wichtigkeit ist.

Ich bemerke, dass ich auch in meinen Untersuchungen über die Tonempfindungen genöthigt war, die Möglichkeit von etwa 130 getrennten Erregungen in der Secunde für den Gehörnerven anzunehmen.

Im Augenblicke hatte ich keine Apparate, um mit Sicherheit mehr als 130 Oeffnungsschläge in regelmässiger Periodicität zu geben, doch zweifle ich nicht, dass sich viel höhere Töne in den Muskeln werden erzeugen lassen. Als ich eine Stimmgabel von 120 Schwingungen den Strom unterbrechen liess, hörte ich im Muskel verhältnissmässig stark auch den Ton von 240 Schwingungen, die höhere Octave des Tones der Gabel, welcher durch die gleichzeitig wirkenden 120 Oeffnungsschläge und die etwas schwächeren 120 Schliessungsschläge hervorgerufen zu sein schien. Der Unterschied in der Stärke beider Arten von Schlägen war in diesem Falle weniger gross, weil die Unterbrechung des Stromes aus Quecksilber geschah.

Andererseits habe ich durch Stimmgabeln, die zwischen den Schenkeln von Elektromagneten stehen, und welche mit dem Bogen gestrichen durch ihre Bewegung elektrische Ströme von der Form regelmässiger Sinuswellen in der Drahtumwicklung der Elektromagneten erzeugten, Froschschenkel in Tetanus gesetzt, und gefunden, dass selbst 600 ganze Schwingungen in der Secunde noch Tetanus geben; indessen war ich bisher noch nicht im Stande, Schallschwingungen der Froschmuskeln wahrnehmbar zu machen.



XCI.

Ueber den Muskelton.

Aus den Verhandlungen des naturhistorisch-medizinischen Vereins zu Heidelberg. Bd. IV. S. 88–90. Vom 20. Juli 1866.

88 Der Vortragende hat schon früher über denselben Gegenstand gesprochen und damals gezeigt, dass, wenn Muskeln von Menschen oder Kaninchen von ihren Nerven her in Tetanus versetzt werden mittels der Ströme eines Inductionsapparates, dessen Feder regelmässige Schwingungen ausführt, man statt des normalen Muskeltones einen Ton von der Höhe desjenigen hört, den die schwingende Feder des Inductionsapparates giebt. Die gewöhnlichen Apparate dieser Art geben nur 40 bis 60 Schwingungen in der Secunde; von dem blossgelegten Hüftnerven eines Kaninchens aus hatte ich schon früher Tetanus erzeugt durch einen Inductionsapparat, in welchem eine Stimmgabel von 120 Schwingungen den Strom unterbrach, und aus den Muskeln des Thieres den entsprechenden Ton von 120 Schwingungen und daneben auch, wenn auch nicht ganz so sicher, dessen ersten Oberton von 240 Schwingungen gehört. Es ist schwer, die so schnell unterbrochenen Inductionsströme so stark zu machen, dass sie menschliche Nerven durch die Haut hindurch afficiren, weil sie das Quecksilber, was man an der Unterbrechungsstelle anwenden muss, schnell verbrennen und in Staub zerstreuen. Durch eine sorgfältige Abgleichung aber von passend angebrachten Nebenschliessungen (theils metallische für die Elektromagneten, theils Wasserzersetzung-

zellen für die Funkenstrecke) gelang es mir mit einer Gabel von 240 Schwingungen hinreichend kräftige Schläge herzustellen, dass vom Nervus medianus aus Tetanus der Vorderarmmuskeln beim Menschen erreicht wurde, und in diesen der Ton von 240 Schwingungen deutlich hörbar wurde, was jedenfalls einen ausserordentlich hohen Grad von Beweglichkeit in den Molecularapparaten des Muskels anzeigt.

Da der Muskelton in dieser Weise beobachtet ein Phänomen von geringer Intensität ist, und ziemliche Aufmerksamkeit bei der Beobachtung fordert, habe ich mich vielfach bemüht, Resonanzapparate zu bauen, um ihn deutlicher hörbar zu machen, namentlich auch, weil es mir darauf ankam, den natürlichen Muskelton, der an der Grenze der tiefsten hörbaren Töne liegt, deutlicher zu hören und seiner Natur nach zu bestimmen. Auf akustischem Wege gelang dies nur sehr unvollkommen, dagegen fand ich es eher möglich, die Schwingungen der Muskeln, namentlich bei ihren tieferen Tönen, dem Auge sichtbar zu machen.

Zu dem Ende benutze ich stählerne Federn (Uhrfedern), die so lang gemacht werden, dass ihre Schwingungsperiode derjenigen des wahrzunehmenden Tones gleich wird. Dieselben sind zu dem Ende zwischen vier Drahtstiften eingeklemmt, die an den Enden eines durch Längsschnitte unvollkommen getheilten elastischen Brettchens befestigt sind. Legt man das Brettchen so an die Muskeln an, dass einer seiner federnden Abschnitte die Erschütterungen des Muskels empfängt, so werden diese auf die Uhrfeder übertragen, und diese kommt in starkes, leicht sichtbares Mitschwingen. Mittels eines Apparates der 19,5 Unterbrechungen in der Secunde gab, brachte man von den menschlichen Muskeln aus starkes Mitschwingen der Feder hervor, wenn die Feder auf 19,5, schwächeres auch, wenn sie auf 39 oder 58,5, ganz schwach endlich, wenn sie auf 78 Schwingungen eingestellt war.

Sucht man diejenige Länge der Feder, bei welcher sie durch die natürliche Zusammenziehung der Muskeln am besten in Schwingung versetzt wird, so findet man diese bei 18 bis 20 Schwingungen in der Secunde. Die Schwingungen



hierbei sind aber nicht so regelmässig, und daher auch nicht so stark, wie sie bei dem künstlichen Tetanus sind. Da eine Stahlfeder zu lange nachschwingt, und eben deshalb auch nicht schnell genug die übertragene Schwingungsweise annimmt, fand ich zur Beobachtung der natürlichen Muskelschwingungen ähnliche Apparate mit zugespitzten schwingungsfähigen Papierstreifen besser. Deren Schwingungsperiode ist am besten zu ermitteln, wenn man sie an die schwingende Feder eines passend abgestimmten Inductionsapparates hält, und ermittelt, bei welcher Schwingungsperiode sie am stärksten mitschwingen.

Diese Versuche lehren nun, dass die Schwingungszahl der natürlichen Muskelvibration des Menschen nicht, wie Wollaston und Haughton glaubten beobachtet zu haben, 36 bis 40, sondern dass sie nur 18 bis 20 ist. Was man als Muskelton hört, ist also nur der erste Oberton der wahren Muskelvibration, deren Grundton nicht mehr im Bereich der hörbaren Töne liegt. Ausserdem ist diese natürliche Muskelvibration zwar annähernd periodisch, aber nicht so genau periodisch, wie die Bewegungen der schwingenden Stimmgabeln und Stahlfedern.

In der Hoffnung die Versuche wesentlich zu erleichtern, wenn ich sie mit Fröschen anstellen könnte, habe ich auch mit deren Muskeln Versuche angestellt. Den Ton von 120 Schwingungen zu hören, gelang spurweise, als ich einen Froschmuskel, der ein Gewicht hob, an einen in den Gehörgang gesteckten Stab gehängt hatte. Dagegen sieht man die Vibrationen der Feder von 16 bis 20 Schwingungen sehr gut, wenn man den Muskel an das beschriebene Brettchen, welches die Feder hält, anhängt, und ihn im elektrischen Tetanus von entsprechender Anzahl von Schlägen ein Gewicht von zwei Unzen heben lässt. Schwingungen der Feder von der Schwingungszahl 120 durch isochrone elektrische Schläge vom Nerven aus hervorzurufen misslang gänzlich. Dagegen sah ich schwache Schwingungen der Feder, welche der natürlichen Vibrationsperiode des Froschrückenmarkes zu entsprechen schienen, wenn ich den Inductionsapparat auf 120 Schwingungen einstellte, und die mitschwingende Feder auf 16 Schwingungen.

Es ist dabei zu bemerken, dass, wie E. du Bois-Reymond zuerst bemerkte, und ich selbst bestätigt fand, Tetanus auch bei Kaninchen vom Rückenmark aus durch schnellschwingende Ströme hervorgerufen, nicht den Ton der Stromvibrationen, sondern den natürlichen Muskelton giebt.

Ströme von der Schwingungszahl 18, auf das Froschrückenmark einwirkend, gaben dagegen auch an der Feder starke isochrone Schwingungen. Deren Schwingungszahl scheint der natürlichen des Rückenmarkes so nahe zu sein, dass dieses sich vollkommen adaptirt.



XCII.

Mittheilung, betreffend Versuche über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Reizung in den motorischen Nerven des Menschen, welche Herr N. Baxt aus Petersburg im Physiologischen Laboratorium zu Heidelberg ausgeführt hat.

Aus den Monatsberichten der Akademie der Wissenschaften zu Berlin.
Vom 29. April 1867. S. 228—234.

228 Die bisher über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Reizung in den menschlichen Nerven angestellten Versuche beziehen sich auf die sensiblen Nerven und leiden an dem grossen Uebelstande, dass ein Theil der dabei gemessenen Zeit von psychischen Processen abhängt. Es wurde dabei nämlich immer die Zeit gemessen, welche nach der Erregung eines sensiblen Nerven vergeht, bis der Inhaber dieses Nerven, der die Erregung empfindet, in Folge davon eine willkürliche Bewegung eines Muskels eintreten lassen kann. Die Uebertragung der Reizung von den sensiblen auf die motorischen Nerven geschieht also hierbei durch einen Willensact des Experimentirenden, bei recht gespannter Aufmerksamkeit allerdings ziemlich regelmässig in etwa dem zehnten Theile einer Secunde, aber doch immerhin nicht regelmässig genug, dass nicht die kleinen, verschieden langer Nervenleitung entsprechenden Zeitdifferenzen bei verschiedenen Beobachtern und auch bei demselben Beobachter zu verschiedenen Zeiten ziemlich erhebliche Abweichungen zeigten. Meine eigenen ersten Beobachtungen vom Jahre 1850 hatten mir für die Leitung in den Armen

eine Geschwindigkeit von $61,0 \pm 5,1$ Meter für die Secunde ergeben, für die Beine $62,1 \pm 6,7$ Meter. Spätere Fortsetzungen dieser Versuchsreihen ergaben mir immer wieder ähnliche Zeitdifferenzen, nur bei zweien, wo ich statt mit der Hand den Strom mittels der Zähne geöffnet hatte, um eine grössere Sicherheit der Action zu erreichen, erhielt ich Zahlen, die mit den später von dem Astronomen Hrn. A. Hirsch gefundenen besser übereinstimmen.¹⁾ Letzterer Beobachter fand dagegen eine Geschwindigkeit von 34 Meter, Herr Dr. Schelske 29,6 Meter, Herr F. C. Donders 26,09 Meter, Herr F. Kohlrausch wieder Werthe, die bis zu 94 Meter stiegen.

Unter diesen Umständen schien es mir wünschenswerth einen älteren Versuchsplan, bei dessen Ausführung ich früher gescheitert war, wieder aufzunehmen, und nach der für die motorischen Nerven des Frosches so sehr geeigneten Methode auch am Menschen Versuche anzustellen. Wenn man einen menschlichen Bewegungsnerven an zwei verschiedenen Stellen seines Verlaufes erregt, und die dadurch ausgelösten Zuckungen am Myographion aufschreiben lässt, so lässt der horizontale Abstand der beiden Zuckungscurven voneinander den Zeitunterschied wegen der Fortpflanzung im Nerven erkennen. Eine erste Schwierigkeit für die Uebertragung dieser Versuchsmethode auf den Menschen liegt aber in dem Umstande, dass jede Reizung eines Nervenstammes an einem höheren Punkte mehr Muskeln in Bewegung setzt, als die an einem tieferen Punkte, und deshalb auch andere Bewegungsformen der Glieder zu Stande kommen. Indessen versprach die von Marey angewendete Methode, die Anschwellung der Daumen-

1) Ein Rechenfehler, Auslassung des Factor 2, den ich anfangs den Beobachtungen von Hirsch gegenüber selbst vermuthete, ist bei jenen Beobachtungen nicht gemacht worden, wie auch die Nebeneinanderstellung der unmittelbar beobachteten Zeiten zeigt. Es brauchte die Uebertragung

von Hand zu Hand, von Gesicht zu Hand,		
1. Bei mir, ältere Versuchsreihe	$0'',13524$	$0'',12040$
2. „ „ spätere Versuchsreihe	$\left\{ \begin{array}{l} 0'',12776 \\ 0'',12495 \end{array} \right\}$	$0'',11320$
3. Bei Herrn Guillaume (Beobachter Hirsch)	$0'',1424$	$0'',1110$



ballenmuskeln bei ihrer Zuckung aufschreiben zu lassen, diese Schwierigkeit zu beseitigen, und ich forderte deshalb Herrn N. Baxt auf, zu versuchen, ob auf diesem Wege das Ziel zu erreichen sei.

Es geschah das schliesslich nach vielen vergeblichen Versuchen folgendermaassen: Der Experimentirende (d. h. derjenige, dessen Nerven gereizt wurden; denjenigen, welcher am Myographion operirt, werde ich den Beobachter nennen) umfasst mit seiner rechten Hand in Supinationsstellung einen kurzen Holzcylinder, der in etwa drei Zoll Entfernung über einem horizontalen Brette festgelegt ist. Der Ellenbogen wird²³⁰ auf das Brett gestützt. In dieser Lage wird der Vorderarm mit Gyps umgossen, sodass eine aus drei Stücken, einem unteren und zwei oberen, bestehende Gypsform für den Arm gebildet wird. Das untere Stück der Form umfasst den Ellenbogen, die Dorsalseite des Vorderarmes und der Hand, und reicht bis an die Enden der ersten Fingerphalangen. Von den beiden Deckelstücken überdeckt eines die Hand und den von ihr umfassten Holzcylinder bis zum Handgelenk hin. Das zweite Deckelstück bedeckt die Volarseite des Vorderarmes. Zwischen diesen beiden letzteren Stücken bleibt ein Zwischenraum von zwei Zoll Länge dicht über dem Handgelenk, in welchem man das untere Paar von Elektroden anlegt, und zwar auf den ulnaren Rand der Sehne des Flexor carpi radialis, unter welchem die Zweige des N. medianus liegen, die zum Daumenballen gehen.

Das erste Deckelstück der Gypsform hat ausserdem gerade über dem Daumenballen eine Oeffnung, sodass die Muskeln dieses Theiles frei liegen, die Knochen der Handwurzel dagegen und das Köpfchen des Metacarpalknochens des Daumens von der Form überdeckt und festgehalten werden.

So sind die Knochen des Vorderarmes und der Hand in dieser Weise vollständig festgehalten und unbeweglich; reizt man aber den N. medianus entweder dicht über dem Handgelenk an der genannten Stelle, oder weiter oben am Oberarm neben dem M. biceps, so sieht man die Muskeln des Daumenballens zucken und bei der Zuckung schwellen. Auf die Mitte dieser Muskeln wurde nun das Ende eines dünnen

Glasstabes gestellt, dessen oberes Ende sich von unten gegen einen Stab stemmte, der den Schreibhebel des Myographion rückwärts verlängerte. Zuckten die Muskeln des Daumenballens, so hoben sie den Glasstab und drängten den Schreibhebel des Myographion nach abwärts, wobei dieser eine Zuckungcurve auf den rotirenden Cylinder schrieb. Eine passend angebrachte Spiralfeder hob den Schreibhebel wieder empor.

Damit die zu vergleichenden Zuckungscuren immer genau von gleicher Grundlinie ausgehen, und die Gleichmässigkeit des Muskeltonus vor der Zuckung constatirt wird, diene der erwähnte Stab am Schreibhebel. Derselbe war etwa $1\frac{1}{2}$ Fuss lang und trug an seinem Ende eine Nadelspitze, welche sich dicht vor einer Millimetertheilung bewegte. Der Experimentirende hatte darauf zu sehen, dass die Nadel vor jeder Zuckung immer auf denselben Punkt der Theilung zeigte.²³¹

Uebrigens war das Verfahren, wie bei den entsprechenden Versuchen an den motorischen Nerven des Frosches. Das Myographion, wenn es die normale Umlaufszeit erlangt hatte, unterbrach den primären Strom eines Inductionsapparates, der inducirte Strom wurde dem N. medianus zugeleitet, und zwar bald am Handgelenk, bald am Oberarm neben dem unteren Ende des M. coracobrachialis. Zwei solche von den beiden verschiedenen Nervenstellen her ausgelöste Zuckungen wurden so auf den Cylinder geschrieben, dass sie von gleicher Grundlinie ausgingen, und dass der dem Augenblicke der Reizung entsprechende Punkt in beiden derselbe war. Hatten die Curven gleiche Höhe und congruente Form, so entsprach die horizontale Differenz ihrer Stellung dem Zeitunterschiede wegen der Nervenleitung.

Bei den Fröschen ist es verhältnissmässig leicht, Zuckungscuren von congruenter Gestalt zu erlangen, indem man die elektrischen Schläge so stark macht, dass man von beiden Nervenstellen aus das Maximum der Zuckung erhält. Beim menschlichen Arme stellte sich dagegen heraus, dass das Maximum der Zuckung bei momentaner Reizung des Nerven desto grösser ausfällt, je höher oben der Nerv gereizt wird.

Es ist dies ein wichtiger Umstand, weil er zeigt, dass



momentane Reizungen der motorischen Nerven des Menschen sich nicht in vollständig unveränderlicher Form durch längere Nervenstrecken fortpflanzen. Schon Pflüger hat nachgewiesen, dass die von den Muskeln entfernteren Theile der Nerven schwächere Reizungen erfordern, um schwache Zuckungen zu erzeugen. Dasselbe zeigte sich auch bei diesen Versuchen am menschlichen Arme; trotzdem im Allgemeinen die Nervenstämme desselben höher oben, zwischen dickere Muskeln verpackt, viel ungünstiger für die elektrische Reizung liegen, waren schwächere Schläge erforderlich zur Erregung der Muskeln des Daumenballens, je höher oben die Reizung ausgeführt wurde.

232 Unter diesen Umständen müssen die Bedingungen, unter denen von einer Fortpflanzungsgeschwindigkeit die Rede sein kann, enger begrenzt werden. Wir haben die Versuche so ausgeführt, dass der elektrische Schlag für die obere Stelle des Nerven so weit abgeschwächt wurde, bis die von ihm erregte Zuckung dieselbe Stärke und Höhe erhielt, wie das Zuckungsmaximum von der unteren Stelle aus erregt. Wir hatten dann also zwei momentane Erregungen des Nerven, welche gleiche mechanische Wirkungen nach aussen hervorbrachten, und da der Muskel in beiden Fällen gleich arbeitete, waren wir sicher, dass die Verzögerung der Wirkung bei Reizung der oberen Stelle nur der Leitung im Nerven angehörte.

Da es nicht immer gelang, die Stärke der Reizung für die obere Stelle so zu treffen, dass die entsprechende Zuckungscurve genau gleich hoch mit der für die untere Nervenstelle wurde, so wurde aus längeren Versuchsreihen, die unter übrigens gleichen Umständen angestellt waren, eine Interpolationsformel berechnet von der Form:

$$D = A + B\delta$$

worin D das Mittel der Horizontalabstände eines einzelnen Curvenpaares bezeichnet, dieselben in verschiedenen Höhen über der Grundlinie gemessen, δ dagegen den Höhenunterschied der beiden Zuckungen, A und B zwei empirisch zu bestimmende Constanten, die nach der Methode der kleinsten Quadrate aus sämtlichen Curvenpaaren einer Versuchsreihe bestimmt wurden. Die Constante A ist der gesuchte mittlere Horizontalabstand der Curven.

Um den Grad der Uebereinstimmung der Versuche zu zeigen, setze ich die Resultate einer Reihe von Versuchen hierher, wobei Herr Studiosus F. als Experimentirender, Herr Baxt als Beobachter fungirte; h_0 ist die Zuckungshöhe von der unteren, h_1 die von der oberen Nervenstelle, das obige $\delta = h_0 - h_1$. Unter Differenz sind in der letzten Columne die Unterschiede der beobachteten und der aus der Interpolationsformel berechneten Werthe angegeben.

	D	h_0	h_1	$A + B\delta$	Differenz
1	6,9375	12,725	11,95	6,8409	— 0,0966
2	6,65	13,025	12,475	6,6797	0,0297
3	5,966	9,45	9,5	6,2704	0,3044
4	5,566	9,1	9,15	6,2687	0,7027
5	6,195	17,6	17,8	6,2186	0,0236
6	6,27	10,5	10,9	5,9885	— 0,2815
7	6,06	10,25	10,65	5,9798	— 0,0802
8	6,7	17,325	18,075	5,9436	— 0,7564
9	5,925	9,7	10,15	5,9169	— 0,0081
10	6,0875	11,575	12,125	5,9066	— 0,1809
11	6,6166	9,8	10,5	5,7006	— 0,9160
12	4,3	10,25	11,15	5,5592	— 0,2592

$A = 6,3160$ Millimeter. $B = 8,6193$. Nervenlänge = 400 Millimeter.

Aus dem Werthe von A ergibt sich als mittlerer Werth der Fortpflanzungsgeschwindigkeit für diese Reihe
31,5389 Meter per Secunde.

Eine andere vorher ausgeführte Versuchsreihe von 15 Curvenpaaren, wobei Herr Baxt Experimentirender, ich selbst Beobachter war, und wobei der Schreibhebel vor der Zuckung einen festen Anschlag gehabt hatte, statt in seiner Stellung durch den langen Hebel controlirt zu sein, hatte bei 44 Centimeter Nervenlänge ergeben

33,395 Meter.

Eine dritte Reihe von 10 Curvenpaaren, wo ebenfalls Herr Baxt Experimentirender, ich selbst Beobachter war, die Anordnung des Apparates übrigens wie bei der ersten Reihe, ergab
37,4927 Meter.



Der Mittelwerth aus allen diesen Bestimmungen würde sein
33,9005 Meter
sehr nahe übereinstimmend mit dem von Herrn A. Hirsch
erhaltenen Resultate.

Nach der oben gegebenen Interpolationsformel treten
schwächere Zuckungen von der oberen Nervenstelle später
ein als stärkere; es scheint dies nicht bloß eine Folge der
grösseren Steilheit der höheren Zuckungscurven zu sein, son-
234 dern schwächere Zuckungen von der oberen Nervenstelle er-
regt, lösen sich auch merklich später von der Grundlinie ab,
als stärkere Zuckungen, während dies bei den von der unteren
Nervenstelle erregten Zuckungen nicht in gleichem Maasse der
Fall ist. Daraus scheint zu folgen, dass schwächere Reizungen
sich im Nerven langsamer fortpflanzen als stärkere. Versuchs-
reihen, bei denen absichtlich schwächere Zuckungen von beiden
Nervenstellen aus hervorgerufen wurden, haben noch keine hin-
reichende Zahl guter Resultate ergeben.

Eine andere Versuchsreihe, wobei die obere gereizte Stelle
dicht über dem Ellenbogen lag, schien eine etwas schnellere
Fortpflanzung der Reizung in den Nerven des Vorderarmes zu
ergeben, den Angaben von H. Munk für Froschnerven ent-
sprechend; doch war der Unterschied zu klein, um ihn bei der
nicht sehr grossen Zahl gelungener Versuche schon als sicher
zu betrachten.

Die Abreise des Herrn Baxt und die Nothwendigkeit,
die Apparate den Versuchen besser anzupassen, hat für den
Augenblick die Versuche unterbrochen, weshalb ich mir er-
laubt habe, vorläufig die bisher gewonnenen Resultate der
Akademie mitzutheilen.

XCIII.

Neue Versuche über die Fortpflanzungsgeschwindig-
keit der Reizung in den motorischen Nerven der
Menschen, ausgeführt von N. Baxt aus Petersburg.

Aus den Monatsberichten der Akademie der Wissenschaften zu Berlin.
31. März 1870. S. 184—191.

In der Sitzung vom 29. April 1867 habe ich der Akade- 184
mie Mittheilung gemacht über Versuche, welche Herr N. Baxt
in meinem Laboratorium unternommen hatte, um die Fort-
pflanzungsgeschwindigkeit der Reizung in den motorischen
Nerven des lebenden Menschen nach einer Methode zu be-
stimmen, wobei die psychischen Thätigkeiten des Experimen-
tirenden zur Erregung der motorischen Nerven nicht in An-
spruch genommen werden. Es wurde damals der Nervus
medianus bald am Oberarm, bald am Handgelenk gereizt.
Der Vorderarm und die Hand waren in eine Gypsform un-
verschieblich eingelegt, und die Zuckung der Muskeln des
Daumenballens wurde durch einen hölzernen Stab auf den
Schreibhebel des für die Versuche mit Froschmuskeln con-
struirten Myographion übertragen. Uebrigens wurden mit den
genannten Abänderungen die Versuche wesentlich nach dem-
selben Principe ausgeführt, wie die zur Bestimmung der Fort-
pflanzungsgeschwindigkeit in den motorischen Nerven des
Frosches.

Es ergaben sich hierbei Fortpflanzungsgeschwindigkeiten
in drei Versuchsreihen von 31,53, 33,39 und 37,49 Meter für
die Secunde.



Bei der Wichtigkeit dieses Resultates und in der Hoffnung auch noch einige andere damit zusammenhängende Fragen entscheiden zu können, beschlossen wir die Methode zu möglicher Genauigkeit auszubilden, und ich liess deshalb (nach einem schon früher von A. Fick angegebenen Plane) ein Pendelmyographion bauen, im Wesentlichen aus einem schweren und festen eisernen
185 Pendel bestehend, dessen ganze Schwingung nahehin zwei Sekunden dauerte, und welches an seinem unteren Ende eine rechteckige ebene Glastafel trägt, auf der die Zuckungscurven geschrieben werden. Das Pendel wird vor dem Versuche in schräger Lage durch einen Sperrhaken gehalten; sobald dieser gelöst wird, fällt es, löst in der Mitte seiner Bahn den Inductionsschlag aus, der den Nerven trifft, und wird schliesslich beim Rückschwunge vom Beobachter wieder aufgefangen und hinter den Sperrhaken gelegt. Somit dauert jeder Versuch nur zwei Sekunden, und man kann schnell hintereinander sehr viele Zuckungen zeichnen. Um dies zu können, lässt sich die Glasplatte mittels einer Schraube am Pendel auf- und abschieben. Eine gleiche Platte an der anderen Seite des Pendels, welche die entgegengesetzte Bewegung macht, bewirkt, dass die Schwingungsdauer dabei nicht geändert wird.

Die Zuckungscurven erhalten auf dem neuen Apparat viel beträchtlichere Höhe (20 bis 40 Millimeter) und Länge, sodass auch ihre Entfernung voneinander viel genauer gemessen werden konnte. Letzteres geschah mit dem Ophthalmometer.

Unsere Hoffnung, genauere Resultate zu erhalten, erschien nach den ersten Versuchsreihen mit dem neuen Apparate zunächst fast ganz vereitelt zu sein. Bei den Versuchen Ende des Sommers 1868, im Winter 1868/69 und Anfang des Sommers 1869 fanden sich ziemlich ähnliche Werthe der Fortpflanzungsgeschwindigkeit für die Nervenstrecke vom Ellenbogen zum Handgelenk, wie die früher mitgetheilten für die Strecke von einer oberen Oberarmstelle (vom unteren Ende des Deltoideus) zum Handgelenk, dazwischen aber auch viel grössere für die Nervenstrecke zwischen Deltoideus und Ellenbogengelenk. Die Werthe der Fortpflanzungsgeschwindigkeit für die Strecke vom Ellenbogen bis zum Handgelenk wurden ziemlich übereinstimmend erhalten, sowohl bei Reizung des N. medianus, wo-

bei die Contractionen der Muskeln des Daumenballens verzeichnet wurden, als auch bei anderer Einrichtung der Gypsform und bei Reizung des N. ulnaris, wobei die Contractionen der Mm. abductor indicis et adductor pollicis verzeichnet wurden. Diese Werthe für die Strecke vom Ellenbogen zum Handgelenk waren:

Reizung des N. medianus:

30,3904 Meter als Mittel aus 9 Curvenpaaren,

Reizung des N. ulnaris:

27,8081 Meter als Mittel aus 9 Curvenpaaren,

32,8827 " " " " 8 "

29,5142 " " " " 18 "

also im Mittel 30,1488 Meter in der Secunde.

Von Mitte des Sommers 1869 fanden sich aber ganz regelmässig grössere Werthe der Geschwindigkeit für die grosse Strecke vom unteren Rande des Deltoideus bis zum Handgelenk, und zwar:

62,1462 Meter als Mittelwerth aus 12 Curvenpaaren,

64,2099 " " " " 9 "

67,3272 " " " " 9 "

also im Mittel 64,5611 Meter in der Secunde.

Mancherlei Veränderungen in der Methode der Reizung und in den sonstigen Anordnungen der Versuche änderten nichts an diesen letzten Resultaten, bis endlich mit Anfang des Winters wieder kleinere Zahlen auch für diese grosse Strecke erhalten werden konnten.

Dieser Umstand schien anzuzeigen, dass die Temperatur die Ursache dieser Schwankungen sein müsse, obgleich die Veränderung der Temperatur der tiefer gelegenen Theile des menschlichen Körpers, der Muskeln und Nerven, so lange nicht gerade ein Gefühl des Unbehagens durch sie hervorgerufen wird, nach den bisher vorliegenden Beobachtungen nur sehr geringe Grösse haben kann. Diese Vermuthung hat sich vollständig bestätigt. Wir haben an demselben Versuchstage absichtlich hintereinander Veränderungen der Temperatur des zuckenden Armes hervorgebracht, und es gelang auf diese Weise abwechselnd, bald bei höherer Temperatur grössere, bald bei



stärkerer Abkühlung, namentlich des Vorderarmes, kleinere Werthe der Fortpflanzungsgeschwindigkeit zu erhalten.

Versuchsreihe I. Das Handgelenk wurde durch eine Eisblase gekühlt, während der Arm in der Gypsform lag. Die brauchbaren Curven der ersten Tafel gaben eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit von 41,2752 Meter, die einer zweiten Tafel, wobei die Abkühlung mehr eingewirkt haben wird, 36,4765 Meter in der Secunde. Darauf wurden die Gypsplatten etwas gewärmt und das Handgelenk mit einer Blase voll Wasser von 40° C. bedeckt. Die Curven der ersten Tafel gaben dabei eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit von 45,2332 Meter, die einer zweiten 187 Tafel, wo die Erwärmung mehr eingewirkt haben wird, eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit von 51,8016 Meter in der Secunde. Es ist zu bemerken, dass auch bei dieser Erwärmung der Vorderarm zu einer behaglichen warmen Temperatur nicht gekommen war.

Versuchsreihe II. Der Arm wurde bei Winterkälte vor dem Versuche stark abgekühlt. Höhe der Zuckungen nur 15 bis 17 mm, deshalb die Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit unsicher, etwa 47,22 Meter. Darauf wurde der Arm durch die erwärmten Gypsplatten und warme Bedeckung gewärmt. Die Zuckungshöhe steigt auf 26 mm, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit für die Curven der ersten Tafel auf 54,1755 Meter, für die der zweiten Tafel auf 56,7808 Meter. Endlich wird der untere Theil des Vorderarmes wieder durch eine Eisblase gekühlt. Die erste Tafel ergibt im Mittel 47,7276 Meter, die zweite Tafel 38,2331 Meter Fortpflanzungsgeschwindigkeit; die Höhe der Zuckungscurven sinkt dabei wieder bis auf 14 mm.

Hinsichtlich des erwärmten Armes gilt übrigens auch hier, obgleich in geringerem Grade, dieselbe Bemerkung wie bei Versuchsreihe I.

Versuchsreihe III. Um eine möglichst grosse Steigerung der Temperatur des Unterarmes zu erreichen, wurde das Zimmer ziemlich stark geheizt, die Gypsform erwärmt und äusserlich mit erwärmten Sand umgeben. Im Anfang wurde die Fortpflanzungsgeschwindigkeit für die Strecke zwischen Handgelenk und unterem Rande des Deltoideus bestimmt, und gleich

61,4185 Meter gefunden (Mittel aus 10 Curvenpaaren). Dann wurden zwei Tafeln voll Curven gezeichnet, welche der Fortpflanzungsgeschwindigkeit zwischen unterem Ende des Oberarmes und Handgelenkes entsprechen; der Werth dieser Geschwindigkeit betrug 57,3400 Meter (Mittel aus 8 Curvenpaaren). Endlich wurden die Versuche für die längere Strecke noch einmal wiederholt und ergaben nun eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit von 89,4272 Meter (Mittel aus 10 Curvenpaaren). Dabei war die Höhe der Zuckungen von 21,4 mm, ihrem Mittelwerthe im Anfang, bis auf 30 mm. gestiegen.

Versuchsreihe IV. Ein Versuch, den Oberarm durch eine Eisblase in einem ziemlich stark geheizten Zimmer abzukühlen, sodass der Unterarm warm blieb, brachte keine erhebliche Aenderung hervor. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ergab sich im Mittel aus 5 Versuchen 50,6262 Meter in 1 Secunde, ein Werth, der etwas kleiner ist, als er sich unter übrigens 188 gleichen Umständen ohne die Eisblase ergeben haben würde.

Es ist hierbei noch zu bemerken, dass die Versuche mit abgekühltem Vorderarm immer nur wenige brauchbare Curvenpaare geben, weil das Zuckungsmaximum bei Reizung der Nerven am Handgelenk dann sehr geringe Höhe hat, und man stark abgeschwächte Inductionsschläge zur Reizung der oberen Nervenstelle anwenden muss. Deren Wirkung ist aber ziemlich unregelmässig, und es gelingt dann nur selten, zwei an Höhe wenigstens nahehin gleiche Curven von den beiden Reizungsstellen nebeneinander zu zeichnen.

Wird der Vorderarm gewärmt, so wächst das Zuckungsmaximum der unteren Nervenstelle stets erheblich, obgleich es uns bisher doch nicht gelungen ist, es dem von der oberen Stelle bei derselben Stärke des Inductionsschlages zu erhalten ganz gleich zu machen. Es ist dann aber viel leichter eine Stellung der Inductionsrollen zu finden, welche mit ziemlich grosser Regelmässigkeit Zuckungen der verlangten Höhe auch von der oberen Nervenstelle her giebt, sodass es unter solchen Umständen leicht ist schnell hintereinander eine grosse Anzahl brauchbarer Curvenpaare zu erhalten.



Die Versuche über Fortpflanzungsgeschwindigkeit zwischen Ellenbogengelenk und Handgelenk ergaben regelmässig eine kleinere Geschwindigkeit als zwischen Deltoideus und Handgelenk, wie es aus den zuerst angeführten Versuchen, die übrigens bei etwas niedrigerer Temperatur als die zuletzt angeführten angestellt worden sind, und ebenso aus der Versuchsreihe III zu ersehen ist. Die Ursache davon kann in dem Umstande gesucht werden, dass die Nerven im Vorderarm regelmässig kälter sind als im Oberarm; es könnte dabei aber auch an eine ungleichförmige Geschwindigkeit des Nervenreizes gedacht werden. In unseren Versuchen war eben selbst nach der eine Stunde lang fortgesetzten Einwirkung eines äusseren warmen Mediums der erwähnte Unterschied in der Fortpflanzung nicht ganz verschwunden.

Andererseits ergaben einige, wegen Kleinheit der Strecke allerdings nicht sehr sichere Bestimmungen der Fortpflanzung 189 zwischen Deltoideus und Ellenbogengelenk grosse Werthe der Geschwindigkeit. Da es zweifelhaft erscheinen konnte, ob die geringe Geschwindigkeit bei kaltem Vorderarm nicht herühre von einer langsameren Fortpflanzung schwächerer Reizungen, wie sie unter solchen Umständen an der oberen Stelle angewendet wurden, so wurden die Ordinaten von Curven miteinander verglichen, welche von derselben Stelle aus mit verschiedener Stärke der Reizung hervorgebracht waren, aber gefunden, dass sich ihre Ordinaten für gleiche Zeiten nach der Reizung fast genau in dem Verhältniss der verminderten Gesamthöhe vermindern und keine Verzögerung der schwächeren Zuckungen zu bemerken ist.

Es sei noch erlaubt einige Resultate zu erwähnen, welche bei den Versuchen mit abgeänderten Reizungsmethoden gelegentlich erhalten wurden.

Um vom Handgelenk aus Zuckungen von grösserer Stärke zu erhalten, als sie ein einzelner Oeffnungsinductionsschlag lieferte, versuchten wir zwei schnell hintereinander zu gebrauchen. Es zeigte sich dabei, dass die Zeit, welche zwischen beiden Schlägen verfiessen musste, ehe der zweite

Schlag im Stande war, die maximale Wirkung des ersten ein wenig zu verstärken, $\frac{1}{600}$ Secunde betrug. Bei einer Zwischenzeit von $\frac{1}{300}$ Secunde war die Verstärkung schon bedeutend. In dieser Beziehung verhält sich also der menschliche Nerv denen des Frosches nahezu gleich.

Zweitens versuchten wir auch constante Ströme zur Reizung zu verwenden, diese gaben aber am lebenden Menschen leicht Tetanus, namentlich bei absteigender Stromesrichtung. Die Oscillationen, welche man dabei im Muskel fühlt, konnten auch mit Hülfe des Myographions verzeichnet werden. Es ergaben sich für die ersten Oscillationen dieser Art unmittelbar nach Beginn des Stromes folgende Werthe:

Zeitdauer der Oscillationen in Secunden.

Batterie	1	2	3
11 Kleine Groves	0,0936 0,0883 0,0906	0,0912 0,0897 0,0892	
15 Kleine Groves	0,0927 0,0925 0,0962 0,0907 0,0901	0,0876 0,0860 0,0856 0,0863 0,0854	0,0859 0,0828 0,0840

Die Vorzüge der bei den Versuchen über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit gebrauchten neuen Untersuchungsmethoden leuchten unter Anderem aus der Uebereinstimmung der einzelnen Versuche einer jeden Versuchsreihe hervor. Um den Grad dieser Uebereinstimmung zu zeigen, möge beispielsweise folgende Zusammenstellung nur einer Versuchsreihe dienen, wobei wegen der Bedeutung der einzelnen Buchstaben auf den Eingangs erwähnten Bericht verwiesen werden mag. D ist nämlich das Mittel der gemessenen Horizontalabstände eines einzelnen Curvenpaares, h_0 — die Zuckungshöhe von der unteren, h_1 — die von der oberen Nervenstelle, $A + B(h_1 - h_0)$ der aus der im angeführten Bericht angegebenen Interpolationsformel berechneten Werth der Horizontalabstände; in der letzten Ver-



ticalcolumnne sind die Differenzen der gemessenen und berechneten Werthe der Horizontalabstände angegeben.

191	D	h_0	h_1	$A +$ $B (h_1 - h_0)$	Differenz
1	3,8537	35,35	36,1	4,0182	+ 0,1645
2	4,3975	36,0	35,8	4,3392	- 0,0583
3	3,8274	34,35	35,7	3,8013	- 0,0261
4	3,8069	33,9	34,7	3,9897	+ 0,1828
5	4,3177	35,4	35,2	4,3402	+ 0,0225
6	4,2577	36,3	36,7	4,1406	- 0,1171
7	3,8526	36,1	37,0	3,9736	+ 0,1210
8	3,9614	36,7	38,3	3,7498	- 0,2116
9	4,4304	37,55	37,3	4,3523	- 0,0781

Wie man sieht, stimmen sowohl die einzelnen gemessenen Horizontalabstände unter sich, als die gemessenen mit den berechneten Horizontalabständen viel besser überein, als in der früher mitgetheilten Zusammenstellung.

Nach Ausführung mancher noch mangelnden Versuche wird die ausführlichere Auseinandersetzung der Resultate dieser Untersuchung von Herrn N. Baxt ausgearbeitet und veröffentlicht werden.

XCIV.

Ueber die Zeit, welche nöthig ist, damit ein Gesichtseindruck zum Bewusstsein kommt, Resultate einer von Herrn N. Baxt im Heidelberger Laboratorium ausgeführten Untersuchung.

Aus den Monatsberichten der Akademie der Wissenschaften zu Berlin.
Vom 8. Juni 1871. S. 333—337.

Wenn ein sehr schnell vorübergehender Lichteindruck die Netzhaut trifft, so entwickelt sich ein Reizungszustand in den nervösen Apparaten, der, wie wir wissen, erheblich viel länger dauert als die Einwirkung des Lichtes. Es zeigt sich dies in dem scheinbar continuirlichen Gesichtseindrucke intermittirender Beleuchtungen und sehr deutlich in den positiven Nachbildern. Letztere können unter günstigsten Bedingungen, bei ganz ausgeruhtem Auge, mässiger Dauer eines lebhaften Reizes, auf ganz dunklem Felde bis zu 12 Secunden dauern, wobei die Formen wenigstens der grösseren Gegenstände im Nachbilde noch erkennbar bleiben. Unter diesen Verhältnissen ist also auch bei kürzester Dauer des ursprünglichen Lichtreizes immer eine gewisse Zeit gegeben, während welcher der Beobachter mittels des Nachbildes eine Reihe von Einzelheiten des gesehenen Objectes wahrnehmen kann, zu deren Wahrnehmung ihm der unmittelbare Lichtreiz keine Zeit gelassen haben würde. So können wir im Dunkeln nach einem Blitze eine ganze Reihe von einzelnen Gegenständen erkennen, obgleich die Dauer der Beleuchtung nur Zehntausendtheile einer Secunde beträgt; das positive Nachbild ist aber gerade in einem



solchen Falle auch unter günstigsten Bedingungen entwickelt, und dauert deshalb verhältnissmässig lange Zeit.

Da es nun vielfaches Interesse hat zu ermitteln, welche Zeit für das Bewusstwerden eines mehr oder minder zusammengesetzten Gesichtsbildes nöthig ist, so veranlasste ich Hrn. N. Baxt seine zeitmessenden Versuche, über die ich schon früher der Akademie berichtet habe, auch nach dieser Richtung hin auszudehnen.

Das positive Nachbild kann man zwar nicht direct auslöschen, aber man kann es durch einen neu eintretenden mächtigen Lichteindruck so übertäuben, dass es seinen Werth für die Wahrnehmung verliert. Die Versuche wurden ausgeführt mit einem von mir construirten und schon früher von Hrn. S. Exner¹⁾ beschriebenen Tachistoskope. Der Beobachter erblickte bei diesem Instrumente ursprünglich durch einen Schlitz einer rotirenden Scheibe für eine sehr kurze Zeitdauer das Object; unmittelbar nachher trat an Stelle des Schlitzes ein schwarzer, danach ein hell beleuchteter weisser Sector der Scheibe, dessen Beleuchtung den zuerst erhaltenen Eindruck modificiren sollte. Bei den neuen Versuchen zeigte es sich, dass die starke Beleuchtung, welche das positive Nachbild auslöschen sollte, nicht von vorn her auf die rotirende Scheibe fallen durfte, weil selbst schwarzer Sammet unter solcher Beleuchtung nicht dunkel genug war, um nicht das Nachbild wesentlich zu beeinflussen. Es wurde deshalb ein schmaler Streif eines Spiegels normal zur Axe an der Scheibe befestigt, welcher das Object für einen Augenblick sichtbar machte. Das auslöschende Licht fiel dann eine kurze Zeit später durch einen Ausschnitt der Scheibe von deren hinterer Seite her in das Auge des Beobachters. Als solches wurde das Licht einer Petroleumflamme gebraucht, die im Brennpunkte einer Convexlinse von kurzer Brennweite stand. Die durch den Spiegel gesehenen Objecte waren theils Buchstaben, theils verschlungene Curven (Lissajou's Schwingungscurven), welche hell auf dunklem Grunde erschienen.

1) Sitzungsberichte der Wiener Akademie. Bd. LVIII. Abth. 2. 1868.

Als Beispiel citire ich einige der Resultate einer so ausgeführten Versuchsreihe. Der primäre Eindruck dauerte 0,0129 Secunden, der zweite, der nach einer Pause von veränderlicher Länge eintrat, um den ersten auszulöschen, 0,055 Secunden. Das Object bestand aus einer Druckschrift, von der etwa drei Buchstaben zugleich sichtbar wurden. Wurde in diesem Falle der erste Eindruck $\frac{1}{50}$ Secunde, nachdem er begonnen hatte, wieder ausgelöscht, so war durchaus nichts von ihm zu erkennen. Bis zu $\frac{1}{30}$ Secunde Dauer waren zwar undeutliche Spuren gesehener Objecte wahrnehmbar, ohne dass aber einer der Buchstaben zu errathen war. Wurde die Dauer grösser als $\frac{1}{30}$ Secunde, so konnte der Beobachter von den Buchstaben desto mehrere und diese desto deutlicher erkennen, je länger er das Nachbild ungestört bestehen liess. Endlich bei einer Dauer von $\frac{1}{13}$ Secunde war kein Unterschied mehr zu bemerken, ob nun das auslöschende Licht eintrat oder ganz weggelassen wurde.

In sehr auffallender Weise zeigte sich übrigens hierbei der Einfluss verschiedener Figuren, welche als Objecte benutzt wurden, je nachdem sie mehr oder weniger bekannt, einfacher oder verwickelter waren. Bei einer einfachen Ellipse war der Eindruck vollständig da in $\frac{1}{20}$ Secunde, so-³³⁵ dass Eintritt oder Nichteintritt des auslöschenden Lichtes gleichgiltig wurde. Dagegen bei der verwickelteren Lissajou'schen Curve für die Schwingungen der Quinte wurde etwa vier mal so viel Zeit, nämlich 0,2085 gebraucht.

Bei den angegebenen Zahlen ist nun zu bemerken, dass auch der zweite starke Lichteindruck nicht unmittelbar in der Nervensubstanz seine ganze Höhe erreicht, sondern dazu eine gewisse kleine Zeit braucht. Allerdings steigt er nach dem von Hrn. Exner gefundenen Gesetze schneller als der schwächere erste. Bei den hellsten von Exner angewendeten Beleuchtungsstärken, die aber immer nur Beleuchtungen weissen Papieres, nicht directes Flammenlicht waren, trat das Maximum der subjectiven Lichtstärke sogar erst $\frac{1}{9}$ Secunde nach Beginn der objectiven Beleuchtung ein. In Hrn. Baxt's Versuchen muss es wegen der viel grösseren Licht-



stärke beträchtlich schneller eingetreten sein; ausserdem dürfen wir darauf rechnen, dass das zurückgebliebene Nachbild schon, ehe der zweite Lichtreiz das Maximum seiner Erregung herbeigeführt hatte, bis zum Unwahrnehmbaren abgeschwächt sein konnte. Dass dies wirklich der Fall war, geht namentlich aus anderen Versuchsreihen von Hrn. Baxt hervor, welche zeigen, dass innerhalb ziemlich weiter Grenzen die Helligkeit des gesehenen Objectes keinen merklichen Einfluss auf die Zeit der Wahrnehmung hatte. Die Aenderungen der Helligkeit wurden theils durch Aenderung der Breite des Spiegels erzeugt, theils durch Einschaltung von transparentem Papier zwischen dem Lichte und der dunklen Schicht, in welche die Figuren eingeschnitten waren. Bei sehr schwachem oder sehr starkem, blendendem Lichte dagegen ergab sich die für seine Wahrnehmung nöthige Zeit grösser als bei mittlerer Lichtstärke. Es ist deshalb nicht als wahrscheinlich anzusehen, dass die oben gegebenen Zahlen für die zur Wahrnehmung nöthige Zeit eine erhebliche Vergrösserung wegen der Dauer der Ansteigung des zweiten Lichtreizes zu erleiden haben.

Andere Versuchsreihen von Hrn. Baxt beziehen sich auf den Einfluss der gesehenen Objecte. Dazu war es nicht nöthig, den momentanen Lichteindruck durch einen zweiten auszulöschen, da bei gleichem Zustand des Auges und gleicher Helligkeit das positive Nachbild immer in gleicher Weise erzeugt wird.

³³⁶ Es wurden Schriftproben (Jäger's, für ophthalmologische Zwecke herausgegeben) von verschiedener Grösse bei gleicher Beleuchtung und gleicher Spaltbreite dem Versuche unterworfen. Es ergab sich, dass zur Erkennung kleiner Schrift eine viel längere Lichtwirkung, also auch ein länger dauerndes positives Nachbild nöthig war als für grosse Schrift. So war bei directer Sonnenbeleuchtung und einer Dauer des Lichteindruckes von 0,0007 Secunde von der kleinsten Schrift No. 1 nichts zu errathen, selbst die Zeilen nur als undeutliche Striche zu sehen, von No. 4 einzelne Buchstaben zu lesen, No. 11–14 dagegen waren vollständig zu lesen. Bei doppelt so grosser Dauer des Reizes waren dagegen auch von No. 2 und 3 einzelne Buchstaben zu erkennen.

Diese Versuche zeigen, dass grosse räumliche Differenzen im Gesichtsfelde schneller wahrgenommen werden als kleine.

Andere Versuche zeigten, dass auch grosse Helligkeitsdifferenzen (Differenzen der Logarithmen der Lichtstärke) schneller wahrgenommen werden als kleine. Zu dem Ende wurden Schriftproben auf transparent gemachtem Papier betrachtet. Die Schrift befand sich auf der Hinterseite des Papiers und erschien ganz schwarz, wenn sie nur von hinten beleuchtet wurde. Wurde ausserdem eine zweite Lichtquelle vor dem Papiere aufgestellt, so fügte diese noch eine gleichmässige Erhellung der Substanz des Papiers hinzu, und die Buchstaben erschienen grau auf weissem Grunde, übrigens bei dauernder Betrachtung vollkommen deutlich. Dadurch aber wurde die zu ihrer Wahrnehmung nöthige Dauer der Lichtwirkung ausserordentlich vergrössert.

So waren zum Beispiel bei constant bleibender Transparentbeleuchtung und ohne vordere Beleuchtung 4 Buchstaben nach einer Beleuchtungsdauer von $\frac{1}{500}$ Secunde zu lesen; bei etwa gleich starker Beleuchtung von vorn dagegen zwei Buchstaben erst nach mehr als $\frac{1}{2}$ Secunde Lichtwirkung; bei halb so starker vorderer Beleuchtung etwa drei Buchstaben nach $\frac{1}{10}$ Secunde Lichtwirkung.

Ich selbst erlaube mir noch aus eigenen früheren Beobachtungen, die ich bei Beleuchtung mit dem elektrischen Funken angestellt habe, Einiges hinzuzufügen. Wenn man ³³⁷ gedruckte Zeilen vor sich hat und die Aufmerksamkeit nicht absichtlich auf einen bestimmten Theil des Sehfeldes richtet, erkennt man bei jedem Funken bald hier, bald dort einzelne Gruppen von Buchstaben. Dabei ist es sehr sonderbar, dass zuweilen mitten aus einem Worte, welches man liest, ein Buchstabe fehlt, oder dass man auch wohl von einzelnen Buchstaben nur einen Strich sieht, den andern nicht.

Ich hatte bei meinen Versuchen immer einen dauernd hellen Punkt im dunklen Felde vor mir, den ich als Fixationspunkt benutzte. Dabei fand ich es möglich, ohne diesen Fixationspunkt zu verlassen, die Aufmerksamkeit schon



vor der Belenchtung durch den Funken auf diesen oder jenen Theil des dunklen Feldes hinzurichten, und dann sah ich, was dort erschien. Es scheint mir dies eine Thatsache von grosser Wichtigkeit zu sein, weil sie zeigt, dass das, was wir das willkürliche Richten der Aufmerksamkeit nennen, eine von Bewegungen der äusseren beweglichen Theile des Körpers unabhängige Veränderung in unserem Nervensystem ist, wodurch Reizungszustände gewisser Fasern vorzugsweise zum Bewusstsein gelangen.

XCV.

Ueber die Bewegungen des Brustkastens.

Aus den Sitzungsberichten der niederrheinischen Gesellschaft zu Bonn vom 12. März 1856. Abgedruckt in den Verhandlungen des naturhistorischen Vereins für Rheinland und Westphalen. Jahrgang XIII. S. 70—71.

Professor Helmholtz theilte die vorläufigen Resultate ⁷⁰ seiner Untersuchungen über die Bewegungen der Rippen mit. Eine jede Rippe ist mit zwei Gelenken an der Wirbelsäule befestigt, und wenn sie vom Brustbein gelöst ist, dreht sie sich um eine durch die genannten beiden Befestigungen bestimmte Axe, welche von innen und von vorn nach hinten und aussen gerichtet ist. Da nun die vorderen Enden der Rippe alle tiefer liegen, als die hinteren Befestigungen, so ist der Erfolg einer solchen Drehung stets der, dass das vordere Rippenende, indem es sich hebt, sich auch von der Mittelebene des Körpers und dem Brustbein entfernt. So lange nun die natürlichen Verbindungen der Rippen bestehen, ist es nicht möglich, dass sich die vorderen Enden der Rippen vom Brustbein entfernen, und deshalb können sich die Rippen nur heben, indem sie selbst und ihre Knorpel sich gleichzeitig biegen.

Wenn man daher das Brustbein zwischen je zwei Rippen quer durchsägt und die Zwischenrippenmuskeln wegnimmt, erhält man eine Reihe von Rippenringen, die hinten an der Wirbelsäule zwar durch Gelenke befestigt sind, sich in diesen Gelenken aber nicht frei bewegen können, sondern vielmehr eine Gleichgewichtslage haben, in welche sie stets wieder zurückspringen, sobald man sie nach unten oder oben aus ihr entfernt. Die Federkraft der oberen Rippen ist am stärksten,



sie wird nach unten hin immer schwächer. Der Thorax ist demnach als ein Korb von elastischen Stäben zu betrachten, deren jeder eine Gleichgewichtslage hat, aus welcher er bei der Inspiration durch den Muskelzug entfernt wird, und in welche er bei der Expiration von selbst wieder zurückspringt. Die Expiration scheint bei ruhigem Athmen nur durch das Nachlassen der Inspirationsmuskeln bewirkt zu werden, ja es wird sogar durch die Verengung der Stimmritze meist noch der Ausgang der Luft erschwert, um denselben zu verzögern.

Es wurden männliche und weibliche Rippen vorgelegt, um daran nachzuweisen, wie beträchtlich der Unterschied der Biegsamkeit zwischen beiden sei.

Dadurch erklärt sich die grosse Beweglichkeit des oberen Theiles der Brust bei Frauen gegenüber der von Männern.

Wegen der Biegsamkeit der Rippen kann der Thorax beim Einathmen sehr verschiedene Formen annehmen. Der Vortragende glaubt aus den geschilderten Verhältnissen schliessen zu dürfen, dass die äusseren Zwischenrippenmuskeln namentlich bei der *Respiratio thoracica*, die inneren bei der *abdominalis* in Anwendung gezogen werden.

XCVI.

Die Wirkungen der Muskeln des Armes.

Vorgetragen in der ärztlichen Section der niederrheinischen Gesellschaft für Natur und Heilkunde vom 10. Decbr. 1856. — Aus der Allgemeinen medicinischen Centralzeitung. Jahrgang 1857. S. 85.

Herr Professor Helmholtz berichtete über Versuche, ⁸⁵ welche theils an Leichen, theils an Lebenden angestellt waren, um die Wirkung verschiedener Muskeln des Körpers zu bestimmen. An Leichen war nicht, wie gewöhnlich geschieht, ein Zug vom Muskel oder von seiner Sehne aus ausgeübt worden, um dadurch das Glied zu bewegen, sondern es war das Glied bewegt worden, zu dem der Muskel ging, und die dabei erfolgende Verkürzung oder Verlängerung des Muskels beobachtet worden.

Der Vortragende sprach besonders über die obere Extremität. Er wies zunächst nach, dass die Bewegungen des Schultergürtels in Hebung oder Senkung des Schlüsselbeins, und Vorwärts- oder Rückwärtsbewegung desselben bestehen, und dass zu jeder dieser Stellungen des Schlüsselbeins eine Drehung des Schulterblattes im Acromialgelenke eintreten kann, wobei sich dessen unterer Winkel nach innen oder aussen bewegt, sodass also diese Drehung des Schulterblattes nicht blos als eine accessorische Bewegung für die Hebung der Schulter zu betrachten ist, sondern als eine selbständige Bewegung. Die Hebung des Armes geschieht bis zur Horizontale im Schultergelenke, von da ab weiter durch Drehung der Scapula im Acromialgelenke und durch Hebung des Schlüsselbeins. Zur



Hebung der Schulter ist namentlich die Clavicularportion des Cucullaris bestimmt, welche fast ganz zu trennen ist von dem Reste des Muskels, und an der Wirbelsäule bis zum fünften Halswirbel reicht. Dieselbe agirt auch beim Lebenden ganz unabhängig vom Reste des Muskels. Zur Drehung der Scapula mit dem unteren Winkel nach aussen wirken der Rest des Cucullaris und der untere Theil des Serratus anticus major; zur Drehung nach innen dagegen der Levator anguli Scapulae mit dem Pectoralis minor. — Das Verständniss der Muskelwirkungen zur Bewegung des Oberarmes ist leicht, wenn man als normale Lage des Armes die wählt, wo er unter 45° gegen den Horizont geneigt, seitlich vom Körper absteht, die Beuge-seite des Ellenbogengelenkes gerade nach vorn gekehrt. Es ist dies in jeder Beziehung die mittlere Lage für seine Bewegungen im Schultergelenk. Als Drehungsaxen wähle man 1) eine horizontal von vorn nach hinten, 2) eine parallel der Länge des Oberarmbeins, 3) eine senkrecht gegen die beiden vorigen von oben und aussen nach unten und innen gehende. Die Bewegungen um die erste Axe sind Hebung (Supraspinatus, mittlerer Theil des Deltoideus) und Senkung (Teres major); um die zweite Axe: Rotation nach aussen (Infraspinatus und Teres minor) und Rotation nach innen (Subcapularis); um die dritte Axe Vorwärtswendung (Coracobrachialis) und Rückwärtswendung (hintere Abtheilung des Deltoideus, welche am Lebenden ganz unabhängig von dem Rest des Muskels wirkt).

Am Vorderarm sind die Wirkungen der Flexoren, Extensoren und Pronatoren keinem Zweifel unterworfen. Dagegen hat der sogenannte Supinator longus keinerlei Beziehung zur Supination, sondern ist ein reiner Beuger, der sogar bei Beugung mit Pronationsanstrengung gebraucht wird. Da der Supinator brevis sehr schwach ist, dient er wohl mehr zum Schutz des Kapselbandes, an das er angeheftet ist, als zur Bewegung des Armes. Der eigentliche Supinator ist der Biceps brachii. Um kräftige Supination bei gestrecktem Arme hervorzubringen, spannt der Lebende gleichzeitig Biceps und Triceps, deren beugende und streckende Wirkungen sich gegenseitig aufheben, während die supinirende Wirkung der um den Radius aufgerollten Sehne des Biceps bestehen bleibt. Bei

gebeugtem Arme supinirt der Biceps allein. Bei gleichzeitiger Pronationsanstrengung wird der Biceps zur Beugung des Armes nicht gebraucht, sondern nur der Brachialis internus und Supinator longus.

Der Palmaris longus wird gespannt, so oft die Hand hohl gemacht wird, und scheint die Beugeschnen vor dem Druck der zusammengefalteten Haut zu schützen.

Der Flexor brevis des Daumens wird nur in der opponirten Stellung gebraucht, der Extensor brevis nur in der reducirten, sodass der Daumen in der Opposition zwei Flexoren und einen Strecker, in der Reduction einen Beuger und zwei Strecker hat. Der Abductor brevis wirkt ebenfalls nur in der Opposition, und abducirt dann die erste Phalanx.

Endlich zeigte der Vortragende noch, dass in gebogener Stellung die ersten Phalangen um ihre eigene Axe durch die M. Interossei rotirt werden können, eine Bewegung, die man bisher noch nicht beachtet zu haben scheint.



Nachtrag neuester Abhandlungen.

XCVII.

Die Thermodynamik chemischer Vorgänge.

Aus den Sitzungsberichten der Akademie der Wissenschaften zu Berlin
vom 2. Februar 1882.

³ Die bisherigen Untersuchungen über die Arbeitswerthe chemischer Vorgänge beziehen sich fast ausschliesslich auf die bei Herstellung und Lösung der Verbindungen auftretenden oder verschwindenden Wärmemengen. Nun sind aber mit den meisten chemischen Veränderungen Aenderungen des Aggregatzustandes und der Dichtigkeit der betreffenden Körper unlöslich verbunden. Von diesen letzteren aber wissen wir schon, dass sie Arbeit in zweierlei Form zu erzeugen oder zu verbrauchen fähig sind, nämlich erstens in der Form von Wärme, zweitens in Form anderer, unbeschränkt verwandelbarer Arbeit. Ein Wärmeverrath ist bekanntlich nach dem von Hrn. Clausius präciser gefassten Carnot'schen Gesetze nicht unbeschränkt in andere Arbeitsäquivalente verwandelbar; wir können das immer nur dadurch und auch dann nur theilweise erreichen, dass wir den nicht verwandelten Rest der Wärme in einen Körper niederer Temperatur übergehen lassen. Wir wissen, dass beim Schmelzen, Verdampfen, bei Ausdehnung von Gasen u. s. w. auch Wärme aus den umgebenden gleich temperirten Körpern herbeigezogen werden kann, um in Arbeit anderer Form überzugehen. Da solche Veränderungen, wie

gesagt, unlöslich mit den meisten chemischen Vorgängen verbunden sind, so zeigt schon dieser Umstand, dass man auch bei den letzteren nach der Entstehung dieser zwei Formen von Arbeitsäquivalenten fragen, und sie unter die Gesichtspunkte des Carnot'schen Gesetzes stellen muss. Bekannt ist längst, dass es von selbst eintretende und ohne äussere Triebkraft weitergehende chemische Processe gibt, bei denen Kälte erzeugt wird. Von diesen Vorgängen wissen die bisherigen theoretischen Betrachtungen, welche nur die zu entwickelnde Wärme als das Maass für den Arbeitswerth der chemischen Verwandtschaftskräfte betrachten, keine genügende Rechenschaft zu geben.¹⁾ Sie erscheinen vielmehr als Vorgänge, welche gegen die Verwandtschaftskräfte zu Stande kommen. Der Hauptsache nach ist die ältere Ansicht, die ich selbst in meinen früheren Schriften vertreten habe, allerdings gerechtfertigt. Es ist keine Frage, dass namentlich in den Fällen, wo die mächtigeren Verwandtschaftskräfte wirken, die stärkere Wärmeentwicklung mit der grösseren Verwandtschaft zusammenfällt, soweit letztere durch die Entstehung und Lösung der chemischen Verbindungen zu erkennen ist. Aber beide fallen doch nicht in allen Fällen zusammen. Wenn wir nun bedenken, dass die chemischen Kräfte nicht blos Wärme, sondern auch andere Formen der Energie hervorbringen können, letzteres sogar ohne dass irgend eine der Grösse der Leistung entsprechende Aenderung der Temperatur in den zusammenwirkenden Körpern eintreten braucht, wie z. B. bei den Arbeitsleistungen der galvanischen Batterien: so scheint es mir nicht fraglich, dass auch bei den chemischen Vorgängen die Scheidung zwischen dem freier Verwandlung in andere Arbeitsformen fähigen Theile ihrer Verwandtschaftskräfte und dem nur als Wärme erzeugbaren Theile vorgenommen werden muss. Ich werde mir erlauben diese beiden Theile der Energie im Folgenden kurzweg als die freie und die gebundene Energie zu bezeichnen. Wir werden später sehen, dass die aus dem Ruhezustande und bei constant gehaltener gleichmässiger Temperatur

¹⁾ B. Rathke, Ueber die Principien der Thermochemie in Abhandl. d. Naturforsch.-Ges. zu Halle, Bd. XV.



des Systems von selbst eintretenden und ohne Hülfe einer äusseren Arbeitskraft fortgehenden Processe nur in solcher Richtung vor sich gehen können, dass die freie Energie abnimmt. In diese Kategorie werden auch die bei constant erhaltener Temperatur von selbst eintretenden und fortschreitenden chemischen Processe zu rechnen sein. Unter Voraussetzung unbeschränkter Gültigkeit des Clausius'schen Gesetzes würden es also die Werthe der freien Energie, nicht die der durch Wärmeentwicklung sich kundgebenden gesammten Energie sein, die darüber entscheiden, in welchem Sinne die chemische Verwandtschaft thätig werden kann.

Die Berechnung der freien Energie lässt sich der Regel nach nur bei solchen Veränderungen ausführen, die im Sinne der thermodynamischen Betrachtungen vollkommen reversibel sind. Dies ist der Fall bei vielen Lösungen und Mischungen, die innerhalb gewisser Grenzen nach beliebigen Verhältnissen hergestellt werden können. Auf solche beziehen sich z. B. die von G. Kirchhoff¹⁾ über Lösungen von Salzen und Gasen angestellten Untersuchungen. Für die nach festen Aequivalenten geschlossenen chemischen Verbindungen im engeren Sinne dagegen bilden die elektrolytischen Processe zwischen unpolarisirten Elektroden einen wichtigen Fall reversibler Vorgänge. In der That bin ich selbst durch die Frage nach dem Zusammenhange zwischen der elektromotorischen Kraft solcher Ketten und den chemischen Veränderungen, die in ihnen vorgehen, zu dem hier zu entwickelnden Begriffe der freien chemischen Energie geführt worden. Denn auch hier drängen sich Fragen auf wie die, ob und wann die latente Wärme der bei der Wasserzersetzung sich entwickelnden Gase, oder die durch Auskrystallisiren eines bei der Elektrolyse erzeugten Salzes frei gewordene Wärme auf die elektromotorische Kraft Einfluss habe, oder nicht. Die von mir am 26. November 1877 gemachte Mittheilung „Ueber galvanische Ströme verursacht durch Concentrationsunterschiede“ (Bd. I. No. XLIV) fällt schon in dieses Gebiet hinein.

1) Poggendorff's Annalen, Bd. 103. S. 177 u. 206. Bd. 104. S. 612.

Die Vorgänge in einem constanten galvanischen Elemente, welche bei verschwindend kleiner Stromintensität vor sich gehen, wobei man die dem Widerstand und dem Quadrat dieser Intensität proportionale Wärmeentwicklung im Schliessungsdrabte als verschwindende Grössen zweiter Ordnung vernachlässigen kann, sind vollkommen reversible Processe und müssen den thermodynamischen Gesetzen der reversiblen Processe unterliegen. Wenn wir ein galvanisches Element von gleichmässiger absoluter Temperatur ϑ (d. h. Temperatur gerechnet von -273°C . als Nullpunkt der Scala) haben, so wird dessen Zustand, wenn das elektrische Quantum $d\varepsilon$ hindurchgeht, dadurch verändert, dass eine dieser Grösse $d\varepsilon$ proportionale chemische Veränderung eintritt, und wir können den Zustand des Elementes betrachten als definirt durch die Menge von Elektrizität ε , die in einer bestimmten, als positiv angenommenen Richtung durch dasselbe hindurchgegangen ist. Wenn die Enden der constanten Batterie mit den beiden Platten eines Condensators von sehr grosser Capacität verbunden sind, der zur Potentialdifferenz p geladen ist, so würde der Uebergang der Menge $d\varepsilon$ von der negativen zur positiven Platte des Condensators der Zunahme $p \cdot d\varepsilon$ im Vorrathe vorhandener elektrostatischer Energie entsprechen. Bezeichnen wir gleichzeitig mit dQ die Wärmemenge, welche wir dem galvanischen Elemente zuführen (beziehlich, wenn negativ, entziehen) müssen, um bei der genannten Ueberleitung von $d\varepsilon$ seine Temperatur constant zu halten, mit $\mathfrak{J}$ das mechanische Aequivalent der Wärmeeinheit und mit U den Gesamtvorath der in ihm enthaltenen Energie, welche wir als Function von ϑ und ε ansehen können, so ist nach dem Satze von der Constanz der Energie:

$$\mathfrak{J} \cdot dQ = \frac{\partial U}{\partial \vartheta} \cdot d\vartheta + \left(\frac{\partial U}{\partial \varepsilon} + p \right) \cdot d\varepsilon. \quad (1)$$

Andererseits wird es nach dem Carnot-Clausius'schen Princip eine Function der Variablen ϑ und ε geben, von Hrn. Clausius die Entropie des Systems genannt, deren Aenderung dS ist:

$$dS = \frac{1}{\vartheta} \cdot \mathfrak{J} \cdot dQ = \frac{1}{\vartheta} \cdot \frac{\partial U}{\partial \vartheta} \cdot d\vartheta + \frac{1}{\vartheta} \left[\frac{\partial U}{\partial \varepsilon} + p \right] d\varepsilon, \quad (1a)$$



wobei:

$$\frac{\partial S}{\partial \vartheta} = \frac{1}{\vartheta} \cdot \frac{\partial U}{\partial \vartheta}, \quad \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} = \frac{1}{\vartheta} \left[\frac{\partial U}{\partial \varepsilon} + p \right].$$

Daraus folgt, dass:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial \vartheta \cdot \partial \varepsilon} = \frac{1}{\vartheta} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial \vartheta \cdot \partial \varepsilon} = \frac{1}{\vartheta} \left[\frac{\partial^2 U}{\partial \varepsilon \cdot \partial \vartheta} + \frac{\partial p}{\partial \vartheta} \right] - \frac{1}{\vartheta^2} \left[\frac{\partial U}{\partial \varepsilon} + p \right],$$

oder:

$$\vartheta \cdot \frac{\partial p}{\partial \vartheta} = \frac{\partial U}{\partial \varepsilon} + p.$$

Wir können also die Gleichung (1) nun schreiben:

$$\Im \cdot dQ = \frac{\partial U}{\partial \vartheta} d\vartheta + \vartheta \cdot \frac{\partial p}{\partial \vartheta} d\varepsilon, \quad (1^*)$$

d. h. der letzte Summandus giebt das mechanische Aequivalent derjenigen Wärmemenge an, welche wir während des Ueberganges von $d\varepsilon$ dem galvanischen Elemente zuführen müssen, um seine Temperatur constant zu halten. In der That, wenn wir in (1*) die Aenderung der Temperatur $d\vartheta$ gleich Null setzen, wird:

$$\vartheta \cdot \frac{\partial p}{\partial \vartheta} \cdot d\varepsilon = \Im \cdot dQ,$$

Die in dieser Weise entwickelte Wärmemenge ist meistens verhältnissmässig klein, und bei kräftig arbeitenden Zellen würde sie schwer durch calorimetrische Versuche zwischen den weit grösseren Wärmemengen zu entdecken sein, die dem Widerstande der Leitung und dem Quadrat der Stromintensität proportional sind. Dazu kommen noch Unterschiede der Erwärmung an beiden Elektroden, die dem Peltier'schen Phänomen bei den thermo-elektrischen Strömen in der Erscheinungsweise ähnlich sehen, wenn sie auch vielleicht in den Ursachen verschieden sind. Dagegen lässt sich viel leichter und mit grosser Schärfe ermitteln, ob die elektromotorische Kraft eines constanten galvanischen Elementes mit steigender Temperatur ab- oder zunimmt.

Versuche letzterer Art sind angestellt worden von Lindig¹⁾; leider beziehen sie sich hauptsächlich auf einen nicht streng reversiblen Fall, nämlich Daniell'sche Zellen, bei denen das

1) Poggendorff's Annalen, Bd. 123, S. 1–30. 1864.

Zink in verdünnte Schwefelsäure tauchte, die beim rückwärts gerichteten Strome also H am Zink entwickeln mussten. Wirklich reversible Daniells, bei denen das Zink in Zinkvitriollösung taucht, zeigen nach neuerlich von mir selbst angestellten Versuchen bei steigender Temperatur Abnahme der Kraft, wenn die Zinklösung mässig oder sehr concentrirt ist, dagegen Zunahme bei sehr verdünnten Zinklösungen. Zwischen diesen beiden Alternativen giebt es eine Grenze, wo die elektromotorische Kraft von der Temperatur nicht merklich abhängig ist. Bei concentrirter Kupferlösung ist dies mit einer Zinklösung der Fall, deren spezifisches Gewicht etwa 1,04 beträgt.

Die Ketten von Hrn. Latimer Clark, wo in concentrirter Zinklösung eine Schicht von Mercurosulfat auf Quecksilber als der Anode liegt, und die Kathode durch amalgamirtes Zink gebildet wird, sind zu scharfen Messungen besonders geeignet, weil man nicht mit der Diffusion zweier Flüssigkeiten zu kämpfen hat, und das Ganze selbst vollständig in Glas einschmelzen kann. Ihre elektromotorische Kraft ist in besonders auffallender Weise von der Temperatur abhängig. Hr. L. Clark¹⁾ selbst hat angegeben, dass die Kraft bei Steigerung um 1° C. um 0,06 Procent abnimmt. Das Maximum dieser Veränderlichkeit tritt ein, wenn man Pulver des Zinksalzes sowohl auf dem Quecksilber zwischen dessen Sulfat, wie auf dem flüssigen Zinkamalgam ruhen lässt. Ich fand jene Grösse dann 0,08 Procent; sie nahm bei starker Verdünnung der Zinklösung bis auf 0,03 ab, wobei andererseits die elektromotorische Kraft erheblich anwuchs. Die obige Formel lässt erkennen, dass bei jener concentrirtesten Lösung die als Wärme abgegebene Arbeit zu der in der elektromotorischen Kraft wiedererscheinenden sich verhält, wie:

$$\vartheta \cdot \frac{\partial p}{\partial \vartheta} : p = 1 : 4,2.$$

In diesem Falle kann das vom Strome neugebildete Zinksulfat sich nicht mehr auflösen und es wird die latente Wärme seiner Lösung gespart, daher stärkere Wärmeentwicklung in der Zelle trotz der schwächeren elektromotorischen Kraft. Die Discussion

1) Proc. Roy. Soc. XX. 444.



der thermo-dynamischen Verhältnisse der Lösungen krystallisirbarer Salze, welche ich mir später zu geben vorbehalte, zeigt übrigens ganz allgemein, dass in Ketten von diesem Typus Verdünnung der Lösung die elektromotorische Kraft um einen bei zunehmender Temperatur zunehmenden Betrag steigern müsse.

Ketten von ähnlichem Typus, die ich wegen ihrer Reinlichkeit und Constanz für ganz schwache Stromintensitäten in den letzten Jahren vielfach gebraucht habe, in denen das Mercurosulfat der Clark'schen durch Mercurchlorid (Calomel) und die Lösung von Zinkvitriol durch eine solche von Zinkchlorid ersetzt ist, zeigen bei starker Verdünnung der letzteren Lösung im Gegentheil eine, wenn auch kleine, Zunahme der Kraft bei steigender Temperatur.

Ich führe diese Thatsachen an, weil sie erkennen lassen, dass hier sehr mannigfache Verhältnisse vorkommen. Die thermoelektrischen Versuche von Lindig, Bleekrode¹⁾, Bouty²⁾, Gore³⁾ zeigen die Häufigkeit solcher Unterschiede an. Wenn man nämlich ein mit vier Seitengefässen durch Heberöhren communicirendes Centralgefäss sich vorstellt, alle mit derselben Flüssigkeit gefüllt, aber zwei von den Seitengefässen erwärmt, zwei andere kalt, und wenn A und a die Potentialunterschiede zweier unpolarisirbarer metallischer Elektroden einer Art gegen die Flüssigkeit des centralen Gefässes sind, B und b die zweier Elektroden von anderer Art bedeuten, A und B aber für erwärmte Flüssigkeit gelten, a und b dagegen für kalte: so geben die Electroden A mit a verbunden eine Thermokette, ebenso B mit b verbunden. Dagegen A mit B eine Hydrokette von höherer, a mit b dieselbe von niederer Temperatur. Wenn nun die elektromotorische Kraft:

$$A - a > B - b,$$

so ist auch:

$$A - B > a - b,$$

und

$$(A - B) - (a - b) = (A - a) - (B - b).$$

1) Poggendorff's Annalen, Bd. 138. S. 571–604.

2) Almeida Journal de Physique, Bd. 9. S. 229.

3) Proc. Roy. Soc. 1871. Febr. 23.

Beziehen sich z. A. A und a auf Zinkamalgam, B und b auf Quecksilber mit Mercurosulfat überschüttet, alle in derselben Zinkvitriollösung, so konnte ich die letzte Gleichung durch den Versuch in der That bewahrheiten.

Um aber diese und andere Thatsachen sicher verwenden zu können, schien mir zunächst die Discussion einer etwas verallgemeinerten Form der allgemeinen Principien der Thermodynamik nothwendig, und eine dem Gegenstande mehr angepasste Ausdrucksweise derselben wünschenswerth. Dies führte zu einer vereinfachten analytischen Ausdrucksweise derselben Gesetze.

Ich will mich heute darauf beschränken, diese theoretischen Erörterungen hier vorzulegen.

§ 1.

Begriff der freien Energie.

Die Dynamik hat eine grosse Vereinfachung und Verallgemeinerung ihrer analytischen Entwicklungen dadurch erreicht, dass sie den Begriff der potentiellen Energie (negativ genommene Kräftefunction nach C. G. J. Jacobi, Ergal nach Clausius, Quantität der Spannkraft nach Helmholtz) eingeführt hat. In den bisherigen Anwendungen dieses Begriffes sind aber Aenderungen der Temperatur der Regel nach nicht berücksichtigt, entweder weil die Kräfte, deren Arbeitswerth man berechnete, überhaupt nicht von der Temperatur abhängen, wie z. B. die Gravitation, oder weil die Temperatur während der untersuchten Vorgänge als constant, beziehlich als Function bestimmter mechanischer Aenderungen (z. B. bei der Schallbewegung als Function der Dichtigkeit des Gases) angesehen werden konnte. Allerdings konnten die im Werthe des Ergals vorkommenden physikalischen Constanten, wie die Dichtigkeit, die Elasticitätscoefficienten u. a. m. mit der Temperatur variiren, und in diesem Sinne war jene Grösse allerdings schon eine Function der Temperatur. Dabei blieb aber die im Werthe jedes Ergals vorkommende Integrationsconstante vollkommen willkürlich für jede neue Temperatur zu bestimmen, und man konnte die Uebergänge von einer zur



anderen Temperatur nicht machen. Wie dies zu thun sei, ergibt sich indessen leicht aus den von Hrn. Clausius aufgestellten beiden Grundgleichungen der Thermodynamik.

Derselbe hat sich zunächst in den von ihm veröffentlichten Abhandlungen auf die Fälle beschränkt, wo der Zustand des Körpers durch die Temperatur und nur einen anderen Parameter bedingt ist. Der Ausdruck des Gesetzes für den Fall, wo verschiedenartige Aenderungen eintreten können, indem der Zustand des Körpers von mehreren anderen Parametern neben der Temperatur bedingt ist, ist leicht nach denselben Principien zu bilden, wie der für einen einzigen. Ich werde die absolute Temperatur im Folgenden mit θ , die den Zustand des Körpers definirenden, von einander und von der Temperatur unabhängigen Parameter aber mit p_a bezeichnen. Ihre Anzahl muss endlich, kann übrigens beliebig gross sein.

Hr. Clausius braucht zur Darstellung seiner allgemeinen Gesetze zwei Functionen der Temperatur und des einen von ihm beibehaltenen Parameters, welche er die Energie U und die Entropie S nennt. Beide sind aber nicht von einander unabhängig, sondern durch die Differentialgleichung:

$$\frac{\partial S}{\partial \theta} = \frac{1}{\theta} \cdot \frac{\partial U}{\partial \theta},$$

10 miteinander verbunden. Es wird sich zeigen, dass diese beiden durch Differentialquotienten des als Function der Temperatur vollständig bestimmten Ergals dargestellt werden können, sodass die thermodynamischen Gleichungen nicht mehr zwei Functionen der Variablen, sondern nur noch eine, nämlich das Ergal erfordern.

Die von Hrn. Clausius in seinen Gleichungen mit W bezeichnete Function fällt mit dem Ergal zusammen, so lange die Temperatur sich nicht ändert; bei veränderlicher Temperatur aber ist sie überhaupt keine eindeutige Function der Temperatur und der Parameter mehr. Was Hr. G. Kirchhoff (l. c.) „Wirkungsgrösse“ genannt hat, ist die Function U .

Ich nehme zunächst ein beliebig zusammengesetztes System von Massen an, welche alle dieselbe Temperatur θ haben und alle auch immer die gleichen Temperaturänderungen erleiden.

Der Zustand des Systems sei durch θ und eine Anzahl von passend gewählten Parametern p_a vollständig bestimmt.

Ich bezeichne, wie Hr. Clausius, die bei einer verschwindend kleinen Aenderung im Zustande des Körpers hinzutretende Wärmemenge mit dQ , die innere Energie mit U . Das Gesetz von der Constanz der Energie kann in die Form gebracht werden:

$$\Im \cdot dQ = \frac{\partial U}{\partial \theta} \cdot d\theta + \sum_a \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial p_a} + P_a \right) dp_a \right\}, \quad (1)$$

Hierin bezeichnet $\Im$ das mechanische Aequivalent der Wärmeeinheit und $P_a \cdot dp_a$ die ganze bei der Aenderung dp_a zu erzeugende, frei verwandelbare Arbeit, welche theils auf die Körper der Umgebung übertragen, theils in lebendige Kraft der Massen des Systems verwandelt werden kann. Diese letztere ist eben auch als eine den inneren Veränderungen des Systems gegenüberstehende äussere Arbeit zu betrachten.

Der zweite Satz der mechanischen Wärmetheorie sagt aus, dass:

$$\int_{\theta}^{\theta} dQ \cdot d\theta = 0,$$

wenn der Endzustand des Körpers wieder derselbe ist, wie der Anfangszustand war, und die Reihe der Veränderungen, die der Körper durchgemacht hat, vollkommen reversibel ist. Letztere Bedingung fordert für ein Körpersystem, dessen Theile unter einander immer gleiche Temperatur haben, nur, dass keine neue Wärme auf Kosten anderer Energieformen erzeugt werden dürfe. Obige Forderung kann nicht erfüllt werden, wenn nicht unter den genannten Bedingungen dQ/θ das Differential einer eindeutigen, nur von der Temperatur und dem Zustande des Körpers, d. h. von den Parametern p_a abhängigen¹¹ Function ist, welche Hr. Clausius für einen Parameter „Entropie“ genannt und mit S bezeichnet hat.

Also:

$$\frac{1}{\theta} \cdot dQ = dS = \frac{\partial S}{\partial \theta} \cdot d\theta + \sum_a \left\{ \frac{\partial S}{\partial p_a} \cdot dp_a \right\}. \quad (1a)$$

Aus (1) und (1a) folgt:

$$\Im \cdot \frac{\partial S}{\partial \theta} = \frac{1}{\theta} \cdot \frac{\partial U}{\partial \theta}, \quad \Im \cdot \frac{\partial S}{\partial p_a} = \frac{1}{\theta} \left[\frac{\partial U}{\partial p_a} + P_a \right].$$



Daraus folgt:

$$P_a = \frac{\partial}{\partial p_a} [\mathfrak{F} \cdot \vartheta \cdot S - U]. \quad (1b)$$

Ferner:

$$\mathfrak{F} \cdot \frac{\partial^2 S}{\partial \vartheta \cdot \partial p_a} = \frac{1}{\vartheta} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial \vartheta \cdot \partial p_a} = \frac{1}{\vartheta} \left[\frac{\partial^2 U}{\partial \vartheta \cdot \partial p_a} + \frac{\partial P_a}{\partial \vartheta} \right] - \frac{1}{\vartheta^2} \left[\frac{\partial U}{\partial p_a} + P_a \right]. \quad (1c)$$

Aus der letzten Gleichung folgt wiederum:

$$\vartheta \cdot \frac{\partial P_a}{\partial \vartheta} = \frac{\partial U}{\partial p_a} + P_a. \quad (1d)$$

Wenn wir nun setzen:

$$\mathfrak{F} = U - \mathfrak{F} \cdot \vartheta \cdot S, \quad (1e)$$

so ist $\mathfrak{F}$, wie U und S es sind, eine eindeutige Function der Grössen p_a und ϑ . Die Functionen U und S , welche nur durch die Grössen ihrer Differentialquotienten definit sind, enthalten jede eine willkürliche additive Constante. Wenn wir diese mit α und β bezeichnen, folgt, dass in der Function $\mathfrak{F}$ ein additives Glied von der Form:

$$[\alpha - \beta \cdot \mathfrak{F} \cdot \vartheta],$$

willkürlich bleibt; sonst ist diese Function $\mathfrak{F}$ durch die Gleichung (1e) vollständig definit.

Die Gleichungen (1b) gehen dadurch in die Form über:

$$P_a = - \frac{\partial \mathfrak{F}}{\partial p_a}. \quad (1f)$$

d. h. bei allen in constant bleibender Temperatur vorgehenden Uebergängen stellt die Function $\mathfrak{F}$ den Werth der potentiellen Energie oder des Ergals dar.

Durch Differentiation der Gleichung (1e) nach ϑ erhält man:

$$\frac{\partial \mathfrak{F}}{\partial \vartheta} = \frac{\partial U}{\partial \vartheta} - \mathfrak{F} \cdot S - \mathfrak{F} \cdot \vartheta \cdot \frac{\partial S}{\partial \vartheta}.$$

¹² Da aber, wie bei (1a) schon bemerkt:

$$\mathfrak{F} \cdot \frac{\partial S}{\partial \vartheta} = \frac{1}{\vartheta} \cdot \frac{\partial U}{\partial \vartheta},$$

so reducirt sich unsere Gleichung auf:

$$\frac{\partial \mathfrak{F}}{\partial \vartheta} = - \mathfrak{F} \cdot S, \quad (1g)$$

woraus durch Berücksichtigung von (1e) sogleich folgt:

$$U = \mathfrak{F} - \vartheta \cdot \frac{\partial \mathfrak{F}}{\partial \vartheta}. \quad (1h)$$

Diese beiden Gleichungen ergeben also die Werthe der beiden Functionen U und S (Energie und Entropie nach Clausius) ausgedrückt durch Differentialquotienten von $\mathfrak{F}$.

Aus der letzteren folgt:

$$\frac{\partial U}{\partial \vartheta} = - \vartheta \cdot \frac{\partial^2 \mathfrak{F}}{\partial \vartheta^2} = \mathfrak{F} \cdot \vartheta \cdot \frac{\partial S}{\partial \vartheta}.$$

Dies ist die oben schon besprochene Verbindung durch eine Differentialgleichung zwischen den Functionen S und U , die also durch unsere Darstellung derselben mittels der Function $\mathfrak{F}$ unmittelbar erfüllt ist.

Bei constant erhaltenen Parametern p_a ergiebt Gleichung (1):

$$\mathfrak{F} \cdot dQ = \frac{\partial U}{\partial \vartheta} \cdot d\vartheta.$$

Die Grösse $\partial U / \partial \vartheta$ stellt also auch in unserem verallgemeinerten Falle die Wärmecapacität des Systems bei constanten Parametern vor (berechnet für die sämtlichen ihm angehörigen Massen zusammengenommen). Wir wollen diese mit Γ bezeichnen. Dann ist also:

$$\mathfrak{F} \cdot \Gamma = - \vartheta \cdot \frac{\partial^2 \mathfrak{F}}{\partial \vartheta^2}. \quad (1i)$$

Da Γ wie ϑ eine nothwendig positive Grösse ist, so folgt hieraus, dass $\partial^2 \mathfrak{F} / \partial \vartheta^2$ nothwendig negativ sei, und dass also die Grössen $(-\partial \mathfrak{F} / \partial \vartheta)$ und $(\mathfrak{F} - \vartheta \cdot \partial \mathfrak{F} / \partial \vartheta)$ bei steigender Temperatur und unveränderten Parametern zu positiv steigenden Werthen fortschreiten müssen. Es sind dies die Grössen $(\mathfrak{F} S)$ und U .

Es ergiebt sich weiter zur Berechnung der Werthe von $\mathfrak{F}$ bei steigenden Temperaturen und unveränderten Parametern, dass:

$$\frac{\partial^2 \mathfrak{F}}{\partial \vartheta^2} = - \mathfrak{F} \frac{\partial S}{\partial \vartheta} = - \mathfrak{F} \frac{1}{\vartheta} \cdot \Gamma.$$

Da andererseits:

$$\vartheta \cdot \frac{\partial^2 \mathfrak{F}}{\partial \vartheta^2} = \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left[\vartheta \cdot \frac{\partial \mathfrak{F}}{\partial \vartheta} - \mathfrak{F} \right] = - \mathfrak{F} \Gamma,$$



so ergibt sich durch eine einfache Quadratur für den Unterschied zweier Werthe von $\mathfrak{F}$, die demselben Werthsysteme der Parameter, aber zwei verschiedenen durch die Indices 1 und 0 unterschiedenen Temperaturen angehören, dass:

$$\mathfrak{F}_1 - \mathfrak{F}_0 = \mathfrak{F} \left\{ (\vartheta_0 - \vartheta_1) S_0 + \int_{\vartheta_0}^{\vartheta_1} \Gamma \left(1 - \frac{\vartheta_1}{\vartheta} \right) d\vartheta \right\}. \quad (1k)$$

Die willkürlich zu wählenden Werthe von $\mathfrak{F}_0$ und S_0 bilden die oben erwähnten beiden willkürlichen Constanten.

Innerhalb solcher Temperaturintervalle, in denen Γ als constant angesehen werden kann, wäre:

$$\mathfrak{F}_1 - \mathfrak{F}_0 = \mathfrak{F} (\Gamma - S_0) (\vartheta_1 - \vartheta_0) - \mathfrak{F} \cdot \Gamma \cdot \vartheta_1 \cdot \log \left(\frac{\vartheta_1}{\vartheta_0} \right). \quad (1l)$$

Hieraus geht hervor, dass der Werth von $\mathfrak{F}_1$ auch für den absoluten Nullpunkt der Temperatur, $\vartheta = 0$, endlich bleiben würde, auch wenn die Werthe von Γ bis dahin endlich bleiben, während der Werth von:

$$\frac{\partial \mathfrak{F}}{\partial \vartheta} = -\mathfrak{F} \cdot S,$$

an der Grenze $\vartheta = 0$ unendlich werden würde, wenn nicht Γ bezogen auf absolute Temperatur an dieser Grenze verschwindend klein wird. Dagegen wird das Product $(\vartheta_1 \cdot S_1)$ auch bei endlichem Γ an der Grenze: $\vartheta = 0$, gleich Null.

Für die Berechnung der Arbeit von physikalischen Vorgängen hat die Unbestimmtheit dieser beiden Constanten keinen Nachtheil, da wir immer nur mit den Differenzen der Arbeitswerthe zwischen verschiedenen Zuständen und Temperaturen des Körpers zu thun haben. Da die Grösse S , die ihren Dimensionen nach einer Wärmecapacität entspricht, mit jeder dem Systeme zugeführten Wärmemenge wächst, so wollen wir aber im Folgenden immer eine solche Wahl des Werthes S_0 voraussetzen, dass bei jedem erreichbaren Kältegrad der Werth von S positiv bleibe. Ich werde deshalb auch das Zeichen $\mathfrak{F} \cdot S$, als einer wesentlich positiven Grösse statt des negativ bezeichneten Werthes $(-\partial \mathfrak{F} / \partial \vartheta)$ zu gebrauchen fortfahren.

Nachdem die Werthe $\mathfrak{F}_0$ und S_0 für einen als normalen Anfangspunkt gewählten Zustand des Körpers festgesetzt sind:

sind, wie das Vorige ergibt, alle Werthe von $\mathfrak{F}$ bestimmbar, wenn man für ein Werthsystem der Parameter die Capacität Γ kennt, und für jede constante Temperatur die Arbeit zwischen diesem und jedem anderen Werthsysteme berechnen kann.

Die Function $\mathfrak{F}$ fällt, wie wir gesehen haben, für isotherme Veränderungen mit dem Werthe der potentiellen Energie für die unbeschränkt verwandelbaren Arbeitswerthe zusammen. Ich schlage deshalb vor, diese Grösse die freie Energie des Körpersystems zu nennen.

Die Grösse:

$$U = \mathfrak{F} - \vartheta \cdot \frac{\partial \mathfrak{F}}{\partial \vartheta} = \mathfrak{F} + \mathfrak{F} \cdot \vartheta \cdot S,$$

könnte, wie bisher, als die gesammte (innere) Energie bezeichnet werden; die etwa vorhandene lebendige Kraft der Massen des Systems bleibt von $\mathfrak{F}$ wie von U ausgeschlossen, so weit sie zu den frei verwandelbaren Arbeitsäquivalenten gehört, und nicht zu Wärme geworden ist. Dann könnte man die Grösse:

$$U - \mathfrak{F} = -\vartheta \cdot \frac{\partial \mathfrak{F}}{\partial \vartheta} = \mathfrak{F} \cdot \vartheta \cdot S,$$

als die gebundene Energie bezeichnen.

Vergleicht man den Werth der gebundenen Energie:

$$U - \mathfrak{F} = \mathfrak{F} \cdot \vartheta \cdot S,$$

mit der Gleichung (1a):

$$dQ = \vartheta \cdot dS,$$

so ergibt sich, dass die gebundene Energie das mechanische Aequivalent derjenigen Wärmemenge darstellt, die bei der Temperatur ϑ in den Körper eingeführt werden müsste, um den Werth S seiner Entropie hervorzubringen.

Zu bemerken ist, dass alle diese Werthe von U , $\mathfrak{F}$, S nur die Ueberschüsse derselben über die entsprechenden Werthe des Normalzustandes darstellen, von dem man als Anfangspunkt bei der Berechnung derselben ausgegangen ist, da uns noch die Thatsachen mangeln, um bis auf den absoluten Nullpunkt der Temperatur zurückgehen zu können.

Wir bedürfen schliesslich in diesem Gebiete noch eines Ausdrucks, um das, was die theoretische Mechanik bisher als lebendige Kraft oder actuelle Energie bezeichnet hat, deutlich



zu unterscheiden von den Arbeitsäquivalenten der Wärme, die doch auch grösstentheils als lebendige Kraft unsichtbarer Molecularbewegungen aufzufassen sind. Ich möchte vorschlagen, erstere als „die lebendige Kraft geordneter Bewegung“ zu bezeichnen. Geordnete Bewegung nenne ich eine solche, bei welcher die Geschwindigkeitscomponenten der bewegten Massen als differenzirbare Functionen der Raumcoordinaten angesehen werden können. Ungeordnete Bewegung dagegen wäre eine solche, bei welcher die Bewegung jedes einzelnen Theilchens keinerlei Art von Aehnlichkeit mit der seiner Nachbarn zu haben brauchte. Wir haben allen Grund zu glauben, dass die Wärmebewegung von letzterer Art ist, und man dürfte in diesem Sinne die Grösse der Entropie als das Maass der Unordnung bezeichnen. Für unsere, dem Molecularbau gegenüber verhältnissmässig groben Hilfsmittel ist nur die geordnete Bewegung wieder in andere Arbeitsformen frei verwandelbar.¹⁾

§. 2.

Die Arbeitsleistungen ausgedrückt durch die freie Energie.

Nachdem somit festgestellt ist, wie die Function $\mathfrak{F}$ zu bilden, und wie aus ihr die beiden Functionen U und S abzuleiten sind, ist es leicht auch die beiden andern in den Clausius'schen Gleichungen vorkommenden, nicht mehr allgemein integrirbaren Grössen dW und dQ auszudrücken.

Zur Abkürzung der Bezeichnung wollen wir die Aenderungen, die eine beliebige Function der Coordinaten erleidet, wenn die Parameter p_a , aber nicht die Temperatur variiren, mit dem Zeichen δ anzeigen, die vollständige Variation aber, wo auch die Temperatur variirt, mit d . Für eine beliebige Function φ der p_a und des ϑ , wäre also:

$$\delta\varphi = \sum_a \left[\frac{\partial\varphi}{\partial p_a} \delta p_a \right], \quad d\varphi = \delta\varphi + \frac{\partial\varphi}{\partial\vartheta} d\vartheta,$$

1) Ob eine solche Verwandlung den feinen Structuren der lebenden organischen Gewebe gegenüber auch unmöglich sei, scheint mir immer noch eine offene Frage zu sein, deren Wichtigkeit für die Oekonomie der Natur in die Augen springt.

Demnach ist die frei verwandelbare äussere Arbeit:

$$dW = \sum (P_a \cdot dp_a) = -\delta\mathfrak{F} \\ = -d\mathfrak{F} + \frac{\partial\mathfrak{F}}{\partial\vartheta} d\vartheta = -d\mathfrak{F} - \mathfrak{F} \cdot S \cdot d\vartheta. \quad (1m)$$

Die gleichzeitig einströmende Wärme wäre nach Gleichung (1):

$$\mathfrak{F} \cdot dQ = dU - \delta\mathfrak{F},$$

oder mit Benutzung des in (1h) gefundenen Werthes von U :

$$\mathfrak{F} \cdot dQ = d\mathfrak{F} - d \left[\vartheta \cdot \frac{\partial\mathfrak{F}}{\partial\vartheta} \right] - \delta\mathfrak{F}, \\ = -\vartheta \cdot d \left[\frac{\partial\mathfrak{F}}{\partial\vartheta} \right] = \vartheta \mathfrak{F} \cdot dS, \quad (1n)$$

wie es (1a) und (1g) fordern.

Durch diese Festsetzungen für dQ und dW sind die in (1) und (1a) aufgestellten Grundgleichungen des Systems auch für den Fall mehrerer Parameter identisch erfüllt und damit auch alle aus diesen von Hrn. Clausius und andern Physikern abgeleiteten Folgerungen.

Was die Kreisprocesse betrifft, so können wir die Arbeit derselben berechnen unter der aus (1m) genommenen Form:

$$dW = -d\mathfrak{F} - \mathfrak{F} \cdot S \cdot d\vartheta \quad (1m)$$

Wenn die Reihe der eingeschlagenen Veränderungen von der besonderen Art ist, dass während derselben S als eine eindeutige Function von ϑ dargestellt werden kann, etwa in der Form:

$$S = \frac{\partial\sigma}{\partial\vartheta}, \quad (2)$$

wo σ eine Function nur von ϑ , so ist:

$$dW = d\mathfrak{F} - \mathfrak{F} \cdot d\sigma;$$

und da die rechte Seite ein vollständiges Differential ist, ist es auch die linke, folglich für eine in sich zurücklaufende Reihe von Aenderungen:

$$\int dW = 0.$$

Hierbei ist also nicht nöthig, dass beim Rückweg genau dieselben Werthsysteme der Parameter p_a für jeden Werth von ϑ eintreten, wie beim Hinweg, sondern nur, dass für jeden Werth von ϑ auch immer wieder derselbe Werth von S ein-



tritt. Insofern hat der Kreisprocess ohne Arbeit hier eine grössere Freiheit, als im Fall des einzigen Parameters.

Andererseits zeigt sich hier, dass:

$$\int_1^2 dW = \mathfrak{F}_1 - \mathfrak{F}_2,$$

auch dann, wenn während der Veränderung die Gleichung (2) bestehen bleibt, und

$$\vartheta_2 = \vartheta_1,$$

aber die Parameter p_a am Ende andere Werthe als am Anfang haben.

Der einfachste Fall der Gleichung (2) ist der der adiabatischen Aenderung:

$$S = \text{Const.}$$

Dann ist:

$$\int_1^2 dW = \mathfrak{F}_1 - \mathfrak{F}_2 + \mathfrak{F} \cdot S(\vartheta_1 - \vartheta_2).$$

Wenn man die im Werthe von $\mathfrak{F}$ und S enthaltene Constante S_0 so wählt, dass der hierin enthaltene Werth $S = 0$ wird, so ist ebenfalls einfach die äussere Arbeit durch die Differenz der Werthe von $\mathfrak{F}$ zu Anfang und Ende der Aenderung gegeben. Nur muss dann aus dem Werthe von $\mathfrak{F}$ noch die Temperatur eliminirt werden mittels der Gleichung:

$$\frac{\partial \mathfrak{F}}{\partial \vartheta} = 0.$$

Arbeit kann also, wie Gleichung (1m) zeigt, auch im Falle mehrerer Parameter durch einen vollständigen Kreisprocess nur geleistet werden, wenn das Integral:

$$\int S \cdot d\vartheta < 0,$$

oder:

$$\int \vartheta \cdot dS > 0,$$

d. h. das Steigen von ϑ muss überwiegend bei kleineren Werthen von S , dagegen das Steigen von S , oder die positiven Werthe von dQ , müssen auf höhere Werthe von ϑ fallen. Die Werthe

der Parameter können dabei aber jede Art der Aenderung erleiden, welche mit dem für jeden Werth von ϑ bestimmten Werthe von S verträglich ist.

Uebergang freier Arbeit in gebundene.

Der Werth der gebundenen Arbeit, den ich mit $\mathfrak{G}$ bezeichnen will, ist:

$$\mathfrak{G} = \mathfrak{F} \cdot \vartheta \cdot S,$$

ihre Aenderung also:

$$\begin{aligned} d\mathfrak{G} &= \mathfrak{F} \cdot \vartheta \cdot dS + \mathfrak{F} \cdot S \cdot d\vartheta \\ &= \mathfrak{F} \cdot dQ + \mathfrak{F} \cdot S \cdot d\vartheta. \end{aligned}$$

Dagegen

$$\begin{aligned} d\mathfrak{F} &= \delta \mathfrak{F} + \frac{\partial \mathfrak{F}}{\partial \vartheta} \cdot d\vartheta \\ &= -dW - \mathfrak{F} \cdot S \cdot d\vartheta. \end{aligned}$$

Das heisst also, $\mathfrak{G}$ wächst erstens regelmässig auf Kosten der hinzugeleiteten Wärme dQ , zweitens bei Temperatursteigerungen auf Kosten der freien Energie um die Grösse $\mathfrak{F} \cdot S \cdot d\vartheta$. Die freie Energie vermindert sich um diesen letzteren Betrag und um den Betrag der nach aussen geleisteten Arbeit, wie es unmittelbar die Gleichung:

$$-\frac{\partial \mathfrak{F}}{\partial \vartheta} d\vartheta = \mathfrak{F} \cdot S \cdot d\vartheta,$$

zeigt. Dadurch erhält die Variation von $\mathfrak{F}$, die der Variation von ϑ entspricht, auch ihre Bedeutung als Arbeitsleistung, und die „Entropie“ S erscheint als die Wärmecapacität für die auf Kosten der freien Energie bei adiabatischem Uebergange erzeugten Wärme.

Bei allen isothermen Veränderungen, wo $d\vartheta = 0$, wird Arbeit nur auf Kosten der freien Energie geleistet. Die gebundene ändert sich dabei auf Kosten der ein- oder austretenden Wärme.

Bei allen adiabatischen Veränderungen, wo $dQ = 0$, wird Arbeit erzeugt auf Kosten der freien, wie der gebundenen Energie.

In allen andern Fällen kann man die Sache so ansehen, dass alle äussere Arbeit auf Kosten der freien Energie ge-



liefert wird, alle Wärmeabgabe auf Kosten der gebundenen und endlich bei jeder Temperatursteigerung im System freie Energie in dem angegebenen Betrage in gebundene übergeht.

Das letztere kann nun auch bei den irreversiblen Processen dadurch geschehen, dass freie Energie in lebendige Kraft, und letztere durch reibungsähnliche Vorgänge theilweise oder ganz in Wärme verwandelt wird. Wenn das letztere der Fall ist, wird einfach

$$dQ = dU,$$

also die beim Uebergange von dem durch den Index (1) bezeichneten Anfangszustande zu dem durch (2) bezeichneten Endzustande abgegebene Wärme:

$$\mathfrak{S}Q = U_1 - U_2.$$

Dies ist die bisher bei den Untersuchungen über Wärmebindung chemischer Processe bestimmte Grösse, wobei man dem Anfangs- und Endzustand gleiche Temperatur gab. Die freie Arbeit beim isothermen Uebergang ist davon wesentlich verschieden, nämlich:

$$W = \mathfrak{F}_1 - \mathfrak{F}_2,$$

und kann also auch nicht, wie ich schon in der Einleitung bemerkt durch blosse Bestimmung der gesammten Wärmeentwicklung gefunden werden.

Bedingung des Gleichgewichts und Richtung der von selbst eintretenden Aenderungen.

Da bei verschwindend kleinen Aenderungen nur die durch die Variation der Parameter bedingte Grösse $\delta\mathfrak{F}$ für alle Leistungen von frei verwandelbarer Arbeit in Betracht kommt, ganz unabhängig von dem Werthe der gleichzeitig stattfindenden Temperaturänderung $d\theta$, so ergibt sich zunächst, dass ohne Zutritt reversibler äusserer Arbeitsäquivalente, zu denen auch die lebendige Kraft geordneter Bewegung gehören würde, ein mit der Zeit dt wachsender positiver Werth von $\delta\mathfrak{F}$ nicht eintreten kann. Es kann unter solchen Bedingungen das Verhältniss $\delta\mathfrak{F}/dt$ nur Null oder negativ sein. Das Beharren in dem gegebenen Zustande würde also gesichert sein, wenn für

alle möglicherweise eintretenden Veränderungen der Parameter bei der zeitweiligen Temperatur:

$$\delta\mathfrak{F} \geq 0.$$

Wenn durch Steigerung der Temperatur ein Punkt erreicht werden kann, wo $\delta\mathfrak{F}$ durch Null in negative Werthe überzugehen anfinge, so würde bei chemischen Verbindungen hier das Phänomen der Dissociation eintreten. Unterhalb dieses Punktes aber würde mit sinkender Temperatur $\delta\mathfrak{F}$ steigen müssen, d. h. der Differentialquotient:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} [\delta\mathfrak{F}] = \delta \left[\frac{\partial \mathfrak{F}}{\partial \theta} \right] = -\mathfrak{S} \cdot \delta S,$$

würde negative Werthe, δS also positive haben müssen. Da nun, für $d\theta = 0$,

$$dQ = \theta \cdot dS,$$

so ergibt sich, dass alle chemischen Verbindungen, die bei höherer Temperatur sich dissociiren, wenigstens in den zunächst unter der Dissociationstemperatur gelegenen Theilen der thermometrischen Scala Wärme abgeben müssen, wenn sie sich auf reversiblen Wege bilden, dagegen Wärme binden müssen, wenn sie zerlegt werden.

Umgekehrt wird es bei solchen sein, die in der Kälte in ihre Bestandtheile zerfallen, wie z. B. die Lösungen krystallisirbarer Salze.

Mit diesen allgemeinen Folgerungen stimmen in der That die oben erwähnten Beobachtungen an galvanischen Elementen.

Um schliesslich noch einmal die wesentlichen Beziehungen der Function $\mathfrak{F}$, aus denen ihre physikalische Bedeutung und ihre Eigenschaften sich herleiten, zusammenzustellen, so sind dies folgende:

1. Alle äussere reversible Arbeit entspricht der durch die Aenderung der Parameter bedingten Aenderung der Function $\mathfrak{F}$:

$$dW = -\delta\mathfrak{F}.$$

2. Der Differentialquotient $\partial\mathfrak{F}/\partial\theta$ kann sich nur verändern durch Zuleitung von neuer Wärme dQ . Unter „neuer



Wärme“ verstehe ich solche, die entweder aus den Körpern der Umgebung zugeleitet oder durch Ueberführung frei veränderbarer Arbeitsäquivalente in Wärme neu erzeugt ist:

$$d\left[\frac{\partial \mathfrak{F}}{\partial \vartheta}\right] = -\frac{1}{\vartheta} \cdot \mathfrak{S} \cdot dQ.$$

Hierbei ist zu bemerken, dass bei Verwandlung von dW in Wärme dQ :

$$dW = \mathfrak{S} \cdot dQ.$$

19 3. Der Differentialquotient:

$$\frac{\partial^2 \mathfrak{F}}{\partial \vartheta^2} = -\mathfrak{S} \cdot \frac{1}{\vartheta} \cdot \Gamma,$$

ist nothwendig stets negativ.

Dass Γ nothwendig positiv sei, wird in allen thermodynamischen Untersuchungen stillschweigend vorausgesetzt, ist aber wesentliche Bedingung dafür, dass nur der Uebergang von Wärme aus höherer in niedere Temperatur Arbeit erzeugen könne.

Was die Beziehungen mehrerer verschieden temperirter Körper oder Körpersysteme zu einander betrifft, so ist die Function $\mathfrak{F}$ eines jeden einzelnen gänzlich unabhängig von denen der anderen. Ihre Beziehungen zu einander sind nur dadurch gegeben, dass sie sich freie Energie und Wärme gegenseitig mittheilen können, und dass bei reversiblen Processen beide Quanta in unveränderter Grösse übergehen; bei irreversiblen kann, wie schon bemerkt, Arbeit in Wärme übergehen. Für solche Uebergänge kommt noch die neue Bedingung der Reversibilität hinzu, dass der Uebergang von Wärme nur zwischen gleich temperirten Körpern erfolgen darf. In allen diesen Beziehungen ändert sich nichts durch die hier ausgeführte Verallgemeinerung und veränderte Ausdrucksweise der Principien.

Nachträglicher Zusatz. Es ist oben vielleicht nicht deutlich genug hervorgehoben, dass die entwickelten Sätze nur gelten, wenn die Parameter so gewählt sind, dass bei ihrer Constanz Aenderung der Temperatur mit keiner Arbeitsleistung verbunden ist.

XCVIII.

Zur Thermodynamik chemischer Vorgänge.

Aus den Sitzungsberichten der Akademie der Wissenschaften zu Berlin vom 27. Juli 1882.

Es lag mir daran für die thermodynamischen Theoreme, die ich in meiner unter dem 2. Februar d. J. der Classe gemachten Mittheilung aus dem zweiten Axiom der mechanischen Wärmetheorie hergeleitet hatte, genauer quantitativ durchgeführte experimentelle Prüfungen an geeigneten Beispielen anzustellen. Die Zahl der dafür passenden Fälle ist bisher nicht gerade gross. Um die Anwendbarkeit der Theoreme zu prüfen, muss die betreffende chemische Veränderung in mindestens zwei verschiedenen Weisen zu genau messbarer und reversibler Arbeitsleistung verwendet werden können. Dies ist zunächst möglich für die Aenderung der Concentration von Lösungen. Eine solche kann durch Verdunstung, beziehlich Niederschlag von Dämpfen, aber auch durch Elektrolyse herbeigeführt werden.

Dass die Unterschiede der elektromotorischen Kraft galvanischer Elemente, welche durch Unterschiede in der Concentration der als Elektrolyte angewendeten Salzlösungen hervorgebracht werden, aus den Dampfspannungen dieser Lösungen thermodynamisch berechnet werden können, zeigen schon die Versuche von Hrn. James Moser, welche derselbe zur Prüfung meiner unter dem 26. November 1877 der Akademie



mitgetheilten Theoreme angestellt hat.¹⁾ Aber in jenen Beispielen hängt der Erfolg wesentlich von der Geschwindigkeit ab, mit der die elektrolytische Fortführung verschiedener Bestandtheile in der Flüssigkeit vor sich geht. Dadurch wird eine weitere Verwickelung der Vorgänge eingeführt, die in² Rechnung gezogen werden muss, und über deren Grösse, namentlich in concentrirteren Lösungen bisher nur wenige, für unseren Zweck hinreichend vollständige Messungsreihen vorliegen. Von der Einnischung dieses Processes aber können wir uns frei machen, wenn wir galvanische Elemente mit einer Flüssigkeit und einer unlöslichen depolarisirenden Substanz anwenden, wie solche von Leclanché, Pincus, Warren de la Rue, Latimer Clark u. A. m. gebaut worden sind. Diese Ketten, zu denen auch die in meiner letzten Mittheilung erwähnten Kalomelketten gehören, sind allerdings nicht im Stande starke dauernde Ströme zu geben, aber zur Messung elektromotorischer Kräfte nach Poggendorff's Methode der Compensation sind sie zum Theil sehr geeignet, da sie dabei nur stromlos angewendet werden. Bei diesen Versuchen kann man auch die von mir vorgeschlagenen Kalomelketten recht wohl anwenden, um den compensirenden Strom zu erzeugen. Die Bestandtheile einer solchen Kette sind:

Zink,

Chlorzinklösung (fünf bis zehn Procent Salz enthaltend),

Kalomel, fein gepulvert,

Quecksilber.

Zwei solche Elemente neben einander verbunden, geben in einem Kreise von 10,000 Siemens'schen Widerstandseinheiten einen Strom, der Monate lang ohne merkliche Polarisation der Elektroden andauern kann, und bei Anwendung eines sehr empfindlichen Galvanometers ausreichend ist, um Unterschiede von einem Milliontel der elektromotorischen Kraft eines Daniell'schen Elements noch erkennen zu lassen. Die elektromotorische Kraft dieser Ketten wird durch Temperaturschwankungen sehr wenig beeinflusst (sie steigt um etwa 0,0002 ihres

1) Wiedemann's Annalen d. Physik u. Chemie. Bd. III, S. 216—219; — Bd. XIV, S. 62—85.

Betrages für 1° C.) und ihr Widerstand ist verschwindend gegen den von 10,000 Siemens' Einheiten. Nach Durchgang stärkerer Ströme ist allerdings Polarisation vorhanden, ebenso stört mechanische Erschütterung, wobei die Quecksilberfläche theils gedehnt, theils zusammengezogen wird, und die von Hrn. G. Lippmann beobachteten elektromotorischen Kräfte auftreten. Aber in den Elementen, welche über fünf Procent ZnCl_2 in der Lösung enthalten, verschwinden diese Störungen der Regel nach in fünf bis zehn Minuten. Bei noch stärker verdünnter Lösung werden die Elemente aber so empfindlich gegen Erschütterungen, dass der Magnet des Galvanometers hier in Berlin wenigstens unter dem Einflusse der von der Strasse kommenden Vibrationen fortdauernd unruhig hin- und hergeht.

Da Chlorzink unter den für galvanische Elemente geeigneten Salzen dasjenige ist, für dessen Lösungen die ausführlichste Reihe von Beobachtungen der Dampfspannung vorliegt, so habe ich zunächst die beschriebenen Kalomelemente den Messungen unterworfen. Im Verlaufe der Versuche stellten sich freilich dabei einige Schwierigkeiten heraus, die zu ihrer vollständigen Lösung die Hülfe eines in chemischen Arbeiten gewandteren Beobachters verlangen würden.

Berechnung der freien Energien in Salzlösungen.

Ein Strom, der in der Richtung vor sich geht, wie ihn die elektromotorische Kraft dieser Elemente zu erregen strebt, löst Zink auf, während eine äquivalente Menge des Kalomels reducirt wird und ihr Chlor abgibt. Es entsteht also neugebildetes Zinkchlorid ZnCl_2 , was in die Lösung übergeht. Andererseits zerfällt ungelöstes festes Quecksilbersalz Hg_2Cl_2 in Hg_2 , welches sich dem übrigen Quecksilber zumischt, und Cl_2 , welches an das Zink tritt. Bei umgekehrter Stromrichtung wird im Gegentheil Zink aus der Lösung reducirt und neues Mercurchlorid gebildet. Bei verschiedener Concentration der Flüssigkeit ändert sich in diesen Vorgängen nur, dass das neugebildete Zinkchlorid in eine anders concentrirte Lösung desselben Salzes eintritt, beziehlich das ausgeschiedene



aus einer solchen austritt. Ausser den chemischen Kräften, welche die Bildung des Chlorzinks auf Kosten des Kalomels begünstigen, kommen also noch in Betracht diejenigen, welche das gebildete Chlorzink in wässrige Lösung überzuführen suchen; diese werden in verdünnten Lösungen, wie gleich von vorn herein zu vermuthen ist, wirksamer sein, als in concentrirteren. In der That zeigen die Versuche sogleich, dass die verdünnten Lösungen den Elementen grössere elektromotorische Kraft geben.

Wenn man, wie es bei den Versuchen geschah, zwei Elemente mit verschiedenen concentrirten Lösungen einander entgegengesetzt, so wird ein Strom, der durch beide geht, im einen so viel ZnCl_2 bilden, als im anderen zerlegt wird, und im ersten so viel Hg_2Cl_2 zerlegen, als im zweiten gebildet wird. Aber wenn in eine verdünntere Lösung Chlorzink eintritt, und dieselbe Quantität aus einer concentrirteren austritt, so wird dies ein Vorgang sein, der Arbeit leisten, also auch als elektromotorische Kraft einen Strom erregen kann. Dieser Process ist übrigens bei geringer Stromintensität, bei welcher die dem Quadrate derselben proportionale Wärmeentwicklung im Schliessungsbogen verschwindet, und nur die der Intensität direct proportionalen Grössen zu beachten sind, vollkommen reversibel.

Nun können wir aber die Concentration von solchen Lösungen auch auf einem zweiten, vollkommen reversiblen Wege, nämlich durch Verdunstung ändern.

Es sei w die Menge Wasser in der Lösung eines Salzes und s die Menge Salz. Um die beiden Bestandtheile von einander zu trennen, wird ein Arbeitsaufwand nöthig sein, und zwar für jedes Milligramm der Lösung ein Aufwand von gleicher Grösse, der aber je nach der Concentration verschieden sein kann. Setzen wir:

$$\frac{w}{s} = h, \quad (1)$$

so wird der Arbeitsaufwand für jede Masseneinheit eine Function von h sein müssen, die wir mit F_h bezeichnen wollen, also für die gesammte vorhandene Lösung wird die ihrer Bildung entsprechende freie Energie sein:

$$\mathfrak{F} = (w + s) F_h, \quad (1a)$$

oder mit Berücksichtigung von Gleichung (1):

$$\mathfrak{F} = s(1 + h) F_h. \quad (1b)$$

Wenn wir die Wassermenge sich ändern lassen durch Verdampfung oder Niederschlag von Wasser, während s constant bleibt, wird:

$$\frac{\partial \mathfrak{F}}{\partial w} = s \frac{\partial}{\partial h} [(1 + h) F_h] \frac{\partial h}{\partial w},$$

oder mit Berücksichtigung des Werthes von h :

$$\frac{\partial \mathfrak{F}}{\partial w} = \frac{\partial}{\partial h} [(1 + h) F_h]. \quad (1c)$$

Diese Grösse, multiplicirt mit dw , giebt die Arbeit an, welche für jede reversible Ueberführung der Wassermenge dw bei constant gehaltener Temperatur aus reinem Wasser an die Lösung zu verwenden ist. Bezeichnen wir mit p den Druck des Dampfes, mit v das Volumen seiner Masseneinheit, so wird zu setzen sein:

$$\frac{\partial \mathfrak{F}}{\partial w} = - \int_{h=\infty}^{h=h} p \cdot dv. \quad (2)$$

Vernachlässigt sind dabei die kleinen Aenderungen im Volumen der tropfbaren Flüssigkeiten, da diese in den hier zunächst berücksichtigten Fällen gegen das Dampfvolumen verschwinden. Uebrigens hat es keine Schwierigkeit, die Formeln in dieser Beziehung zu vervollständigen.

Bezeichnen wir in Gleichung (2) die Werthe von p und v , die dem gesättigten Dampfe des reinen Wassers, d. h. dem Werthe $h = \infty$, entsprechen mit P und V , so haben wir bei Berechnung des Integrals in Gleichung (2) drei Perioden zu unterscheiden. Erstens müssen wir die Wassermenge dW aus reinem Wasser verdampfen lassen, dies giebt als entsprechenden Betrag des obigen Integrals die Arbeit:

$$P \cdot V \cdot dw.$$

Dann müssen wir den Dampf ausser Berührung mit Wasser sich weiter dehnen lassen, bis er das spezifische Volumen v_h des über der Salzlösung stehenden gesättigten Dampfes hat; dies giebt zum Integrale den Betrag:



$$dw = \int_v^{v_h} p \cdot dv.$$

Endlich ist der Dampf in Berührung mit der Salzlösung unter dem constant bleibenden Drucke p_h zu comprimiren. Dies giebt den letzten Betrag:

$$-p_h \cdot v_h \cdot dw.$$

Folglich ist:

$$\frac{\partial \tilde{S}}{\partial w} = -P \cdot V - \int_v^{v_h} p \cdot dv + p_h \cdot v_h,$$

oder nach partieller Integration:

$$\frac{\partial \tilde{S}}{\partial w} = \int_p^P v \cdot dp = - \int_h^{\infty} v \cdot \frac{\partial p}{\partial h} \cdot dh. \quad (2a)$$

Da nach Gleichung (1c) das $\partial \tilde{S} / \partial w$ eine Function von h allein ist, ebenso rechts v und p nur Functionen von h sind, kann die Gleichung (2a) nach h differenzirt werden, und ergibt:

$$\frac{\partial^2 \tilde{S}}{\partial h^2} [(1+h) F_h] = v_h \cdot \frac{\partial p}{\partial h}. \quad (2b)$$

Nach den Auseinandersetzungen in § 1 meines ersten Beitrags ist die Grösse $-\partial \tilde{S} / \partial w$, als die Kraft zu bezeichnen, mit der Wasser von der Lösung angezogen wird. Gleichung (2a) lehrt deren Betrag aus dem Dampfdruck berechnen.

Andererseits erhalten wir aus Gleichung (1b), wenn wir nach s partiell differenziren:

$$\frac{\partial \tilde{S}}{\partial s} = (1+h) F_h - h \frac{\partial}{\partial h} [(1+h) F_h]. \quad (1d)$$

Wenn ein galvanischer Strom von der Intensität J durch eines unserer Elemente geht, und q diejenige Menge des Salzes bezeichnet, welche durch die Stromeinheit in der Zeiteinheit aufgelöst wird, so wird in t Sekunden durch die Auflösung des Salzes der vorhandene Energievorrath vermehrt um:

$$\frac{\partial \tilde{S}}{\partial s} \cdot J \cdot q \cdot t = J \cdot q \cdot t \left\{ (1+h) F_h - h \cdot \frac{\partial}{\partial h} [(1+h) F_h] \right\}.$$

Nun ist die Arbeit, welche eine elektromotorische Kraft A verrichtet, wenn ein Strom J während der Zeit t in der

Richtung, nach der A wirkt, durch den Leiter fliesst, gleich $A J t$, vorausgesetzt, dass die Einheit von A dieser Bestimmung entsprechend gewählt ist.

Ich werde im Folgenden nach Ampères und Volts rechnen: dabei muss aber dann auch die Arbeit der Dämpfe in den entsprechenden Einheiten, nämlich cg. 10^{-9} für Masse, cm. 10^9 für Längen und Sekunden für die Zeit, berechnet werden. Die in C. G. S. Maass berechnete Arbeit der Dämpfe ist also mit 10^{-7} zu multipliciren, um sie in jenes Maass zu übertragen.

Aus Gleichung (2b) folgt also:

$$A = -q \left\{ (1+h) F_h - h \frac{\partial}{\partial h} [(1+h) F_h] \right\} \quad (2c)$$

und mit Berücksichtigung von Gleichung (2):

$$\frac{\partial A}{\partial h} = q h \cdot \frac{\partial^2}{\partial h^2} [(1+h) F_h] = q \cdot h \cdot v \cdot \frac{\partial p}{\partial h}. \quad (2d)$$

Das Zeichen ist hier so gewählt, dass ein die metallische Basis des Salzes auflösender Strom und die in seiner Richtung wirkende elektromotorische Kraft gleichzeitig als positiv gelten.

Haben wir Ausscheidung des Salzes in einer Zelle mit dem Verdünnungswerthe h_0 und Auflösung in einer anderen vom Werthe h_1 , so wird durch Integration nach h aus der Gleichung (2d) gefunden:

$$A_1 - A_0 = q \int_{h_0}^{h_1} h \cdot v \cdot \frac{\partial p}{\partial h} \cdot dh. \quad (2e)$$

Diese Gleichung lässt die den Unterschieden des Wassergehalts der Lösung entsprechenden elektromotorischen Kräfte aus den Dampfspannungen berechnen.

Da bei den Temperaturen unter 40° die Dichtigkeit auch der gesättigten Dämpfe reinen Wassers sehr klein ist, so können wir die Grösse v durch die Gesetze der vollkommenen Gase bestimmen, und indem wir mit V_0 und P_0 die Grössen von v und p für reines Wasser bei der absoluten Temperatur Θ bezeichnen, können wir setzen:

$$\frac{P_0 \cdot V_0}{\Theta} = \frac{p \cdot v}{g}. \quad (3)$$



$$\text{und} \quad A_1 - A_0 = \frac{\vartheta q \cdot P_0 \cdot V_0}{\Theta} \int_0^1 h \cdot \frac{\partial \log p}{\partial h} \cdot dh. \quad (3a)$$

Da für das Chlorzink noch keine Beobachtungen über Dampfspannung bei verschiedenen Temperaturen vorliegen, ist es nützlich, noch folgende Beziehungen zu bemerken.

Wenn wir die Gleichung (2d) nach der absoluten Temperatur ϑ differenzieren, so erhalten wir:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial h \cdot \partial \vartheta} = q \cdot h \cdot \frac{\partial^2}{\partial h^2} \left[(1+h) \frac{\partial F}{\partial \vartheta} \right] \quad (4)$$

und wenn wir (4) mit ϑ multipliciren und von (2d) abziehen, giebt es:

$$\frac{\partial}{\partial h} \left\{ A - \vartheta \cdot \frac{\partial A}{\partial \vartheta} \right\} = q \cdot h \cdot \frac{\partial}{\partial h} \left[\frac{\partial \mathfrak{F}}{\partial w} - \vartheta \cdot \frac{\partial^2 \mathfrak{F}}{\partial \vartheta \cdot \partial w} \right], \quad (4a)$$

wobei zu berücksichtigen ist, dass $\partial \mathfrak{F} / \partial w$, also auch dessen Differentialquotient nach ϑ die Grössen w und s nur implicite in h enthalten. Nun ist aber, wie in dem früheren Aufsatze gezeigt wurde,

$$\mathfrak{F} - \vartheta \cdot \frac{\partial \mathfrak{F}}{\partial \vartheta} = U$$

und U die gesammte innere Energie, freie und gebundene zusammengekommen. Daher ist $\partial U / \partial w$ auch nur Function von h und $\partial U / \partial w \cdot dw$ bezeichnet das mechanische Aequivalent der Wärmemenge, welche bei dem Zusatz der Wassermenge dw zur Salzlösung zugeführt werden muss, um die Temperatur der Lösung constant zu halten, wenn das Wasser entweder direct und ohne Leistung äusserer Arbeit oder unter Rückverwandlung von letzterer in Wärme zugesetzt wurde.

Setzen wir also $-\partial U / \partial w = W$, so ist W die durch Verdünnung mit der Gewichtseinheit Wasser zu entwickelnde Wärmemenge, ebenfalls nur eine Function von h und ϑ , und Gleichung (4a) wird:

$$\frac{\partial}{\partial h} \left\{ A - \vartheta \cdot \frac{\partial A}{\partial \vartheta} \right\} = -q \cdot h \cdot \frac{\partial W}{\partial h}. \quad (4b)$$

Daraus folgt, dass bei Lösungen, welche bei weiterer Verdünnung keine Wärme entwickeln oder latent machen, die von der Concentration der Lösung abhängigen Theile der

elektromotorischen Kraft proportional der absoluten Temperatur wachsen müssen, da dann:

$$\frac{\partial A}{\partial h} = \vartheta \cdot \frac{\partial^2 A}{\partial \vartheta \cdot \partial h}$$

wird, oder:

$$d(\log \vartheta) = d \left(\log \frac{\partial A}{\partial h} \right) \\ \frac{\partial A}{\partial h} = C \cdot \vartheta$$

sein muss. Da für reines Wasser ($h = \infty$), $W = 0$ wird, ist bei negativem Werthe von $\partial W / \partial h$ die Grösse W selbst nothwendig positiv und umgekehrt. Also wenn Verdünnung Wärme erzeugt, wird $\partial A / \partial h$ langsamer wachsen müssen, als die absolute Temperatur, im gegentheiligen Falle schneller.

Führen wir die Annahme (3) in (2d) ein, so wird:

$$\frac{\partial A}{\partial h} - \vartheta \cdot \frac{\partial^2 A}{\partial h \cdot \partial \vartheta} = q \cdot h \cdot \frac{V_0 \cdot P_0}{\Theta} \cdot \vartheta^2 \cdot \frac{\partial^2}{\partial h \cdot \partial \vartheta} [\log p] = -q h \cdot \frac{\partial W}{\partial h}.$$

Also:

$$-\frac{\partial W}{\partial h} = \frac{V_0 \cdot P_0}{\Theta} \cdot \vartheta^2 \cdot \frac{\partial^2}{\partial h \cdot \partial \vartheta} (\log p).$$

Dies integrirt nach h bis $h = \infty$, wo $W = 0$ sein muss, giebt:

$$W = \frac{V_0 \cdot P_0}{\Theta} \cdot \vartheta^2 \cdot \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left[\log \frac{P}{p} \right], \quad (4c)^1$$

welche Gleichung die Verdünnungswärme aus den Temperaturänderungen der Dampfspannungen zu berechnen erlaubt, oder letztere aus ersterer.

Zur Berechnung der Versuche.

Bei Salzlösungen von geringem Salzgehalt hat Hr. Wüllner gefunden, dass naehin:

$$P - p = \frac{b}{h} \cdot P, \quad (5)$$

wo b eine von der Natur des Salzes abhängende Constante bezeichnet, welche bei einigen Salzen auch von der Temperatur unabhängig erscheint. Dies in Gleichung (3a) gesetzt würde ergeben:

¹⁾ In (4c) und den zwei vorausgehenden Gleichungen steht im Original irrtümlich ϑ an Stelle von ϑ^2 .



$$A_1 - A_0 = \frac{q \cdot P_0 \cdot V_0}{\Theta} \cdot q \cdot b \log \left(\frac{h_1 - b}{h_0 - b} \right). \quad (5a)$$

Beim Chlorzink sind verhältnissmässig hohe Concentrationen anwendbar, für welche die einfache Willner'sche Formel der Gleichung (4) nicht mehr zureicht. Ziemlich gut passt auf die Beobachtungsreihe von Hrn. James Moser über die Dampfspannung von Chlorzinklösungen eine Formel zweiten Grades:

$$P - p = \frac{\mathfrak{A}}{h} + \frac{\mathfrak{B}}{h^2}. \quad (6)$$

Aus dieser lässt sich der Werth von p auf die Form bringen:

$$p = \mathfrak{B} \left[\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{h} \right] \left[\frac{1}{\beta} - \frac{1}{h} \right],$$

worin $-\alpha$ und β die Werthe von h sind, die in Gleichung (6) den Werth $p = 0$ ergeben würden. Daraus ergibt sich:

$$A_1 - A_0 = \frac{q \cdot P_0 \cdot V_0 \cdot \mathfrak{B}}{\Theta} \left\{ \beta \cdot \log \left(\frac{h_1 - \beta}{h_0 - \beta} \right) - \alpha \cdot \log \left(\frac{h_1 + \alpha}{h_0 + \alpha} \right) \right\}. \quad (6a)$$

Die Coefficienten $\mathfrak{A}$ und $\mathfrak{B}$ habe ich aus den Moser'schen Beobachtungen nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt und die Werthe gefunden:

$$\mathfrak{A} = 4.17,1608,$$

$$\mathfrak{B} = 16.1,9559.$$

Die Vergleichung der darauf gegründeten Rechnung mit den Beobachtungen ergibt für 20,2° C. in Millimetern Wasserdruck:

$4 \cdot \frac{1}{h}$	$P - p$		Differenz
	berechnet	beobachtet	
1	19,127	19,50	+ 0,373
2	42,145	39,83	- 2,315
3	69,085	69,87	+ 0,785
4	99,938	101,9	+ 1,961
5	134,701	133,6	- 1,101

Der Werth von P ist nach der Dampfspannungstabelle von Magnus gesetzt gleich 239,79 mm Wasser von 20,2° C.

Daraus, und aus den Werthen von $\mathfrak{A}$ und $\mathfrak{B}$ ergeben sich die Werthe von:

$$\alpha = 0,24545,$$

$$\beta = 0,53171.$$

Für ein Ampère ist q nach den neueren Bestimmungen von F. Kohlrausch auf Silber bezogen 0,0011363 gr per Secunde, also bezogen auf ZnCl_2 gleich 136/216 Mal dieses Betrages, nämlich:

$$q = 0,00071545.$$

Für $P_0 V_0$ ist für 0° der für sehr kleine Dichtigkeiten des Wasserdampfes geltende theoretische Werth genommen in C. G. S. Maass:

$$P_0 \cdot V_0 = 1,25985 \cdot 10^9.$$

Ich werde die nach der oben stehenden Interpolationsformel (6) mit den angegebenen Werthen $\mathfrak{A}$ und $\mathfrak{B}$ berechneten Werthe der elektromotorischen Kraft als „berechnet nach a “ aufführen. Da bei der Vergleichung der berechneten und beobachteten Dampfspannungen, wie sie oben gegeben ist, einige Differenzen vorkommen (z. B. bei (2) und (4)), welche grösser sind als die der Einzelbeobachtungen des Hrn. Moser unter einander, und da möglicher Weise Bildung von Hydraten des Salzes verschiedenen Gang der Function für verschiedene Concentrationen bedingen könnte, so habe ich noch eine zweite Rechnung angestellt, wobei ich eine wie (6) gebildete Formel auf je drei auf einander folgende beobachtete Werthe anwende, zwischen denen die betreffenden Concentrationen der betreffenden Elemente lagen. Die davon herrührenden Werthe, werde ich als „berechnet nach b “ bezeichnen. Die beiden 10 Rechnungen differirten für die kleineren Intervalle ziemlich erheblich von einander. Die Summe aber für die elektromotorische Kraft der grösseren Intervalle stimmte ziemlich gut.

Ein Hinderniss für exacte Ausführung der Messungen bildet die grosse Neigung des Chlorzinks, basische Salze zu bilden. Die Normallösung, durch deren Verdünnung die anderen Concentrationen gebildet wurden, musste so gewählt werden, dass sie in den Elementen bei Zimmertemperatur kein Zink mehr unter Wasserstoffentwicklung lösen konnte, dazu musste



sie ein wenig basisches Chlorzink enthalten. Und andererseits durfte sie nicht so viel von dem letzteren enthalten, dass sie beim Verdünnen mit reichlichen Quantitäten Wasser Niederschläge von stärker basischem Salz gab. Diese beiden Bedingungen geben eine ziemlich schmale Grenze für die Zusammensetzung der Flüssigkeit. Meine Lösung enthielt nach der Bestimmung ihres Zink- und ihres Chlorgehaltes auf 100 gr:

63,736 gr ZnCl_2 ,
0,881 gr ZnO ,
35,383 gr H_2O .

Ich glaube annehmen zu dürfen, dass Hrn. Moser's Lösungen ähnlicher Art waren, kalt mit Zink gesättigte Chloridlösungen, da er bei seinen Versuchen dieselben beiden Bedingungen einhalten musste, wie ich. Leider hat er über diesen Punkt, sowie über die Art, wie er die Concentration der Lösungen bestimmt hat, in seinen Publicationen nichts angegeben.

Der Werth der Kalomelemente in Volts wurde durch Ermittlung ihres elektrolytischen Aequivalents bestimmt, bei einem in Siemens-Einheiten gemessenen Widerstande. Da ich den Werth des elektrolytischen Aequivalents des Silbers aus den Messungen von F. Kohlrausch entnommen hatte, schien es mir am sichersten, den dazu gehörigen, von demselben Beobachter bestimmten Werth der Siemens'schen Widerstandseinheit zu nehmen, nämlich 0,9717 des theoretischen Ohm. Darnach ergab sich die elektromotorische Kraft meiner compensirenden Kalomelemente, die durch die 10,000 Widerstandseinheiten wirkten, gleich 1,043 Volt. Da aber die bisherigen Bestimmungen der besten Beobachter für den absoluten Werth der Siemens-Einheit noch um 3 Procent auseinander gehen, und also der Werth meiner Elemente in Volts doch nur unsicher auszudrücken sein würde, habe ich schliesslich vorgezogen, die berechneten Werthe auf die elektromotorische Kraft meiner Kalomelemente zu reduciren.

Da ausser diesen Unsicherheiten auch noch, wenn auch kleine, Ungleichheiten der verschiedenen Zinkstäbe sich geltend zu machen schienen, welche auf die Werthe der kleineren Intervalle verhältnissmässig merklichen Einfluss hatten, wird

es genügen, hier die Resultate für das grösste Concentrations-Intervall anzugeben, welches sich anwenden liess zwischen $h = 0,8$ und $h = 9,1992$, zwischen $17,7^\circ$ und 21° C.

Elektromotorische Kraft.

Beobachtet	Maximum	0,11648
	Minimum	0,11428
Mittel aus 13 Tagen		0,11541.
Berechnet	a.	0,11579
	b.	0,11455.

Ausserdem habe ich einen Thermostaten construiren lassen, in den die sechs verschiedenen zu compensirenden Elemente gleichzeitig eingesetzt werden konnten. Es wurde zwischen $35,1^\circ$ und $36,1^\circ$ C. beobachtet:

Maximum	0,11609
Minimum	0,11524
Mittel von 8 Tagen	0,11569.

Daraus ergibt sich, dass der von den Concentrations-Unterschieden abhängige Theil der elektromotorischen Kraft fast gar nicht mit der Temperatur sich ändert.

Also ist das $\partial^2 A / \partial \theta \cdot \partial h$ der Gleichung (4b) nahehin gleich Null, woraus folgt, dass $\partial W / \partial h$ negativ sein muss. Da $\partial A / \partial h$ positiv ist, und da W für $h = \infty$ (d. h. reines Wasser zu reinem Wasser gesetzt) nothwendig gleich Null wird, so muss W für alle Lösungen von Chlorzink positiv sein. Wasserzusatz muss Wärme entwickeln. Dass dies der Fall ist, und auch ungefähr in dem zu erwartenden Grade, haben mir vorläufige Versuche schon gezeigt. Aber genaue Berechnungen und Messungen werden dafür erst nach genauer Bestimmung des Ganges der Dampfspannungen und elektromotorischen Kräfte möglich sein.

Die elektromotorische Kraft zwischen den Metallen aber nimmt bei der Erwärmung in dem schon oben angegebenen Grade zu, d. h. die Kalomelkette gehört, wie ich schon in der Einleitung meines ersten Berichtes erwähnt habe, zu den Wärme bindenden Ketten, die zum Theil auf Kosten der thermometrischen Wärme der umgebenden Körper arbeiten.



¹² Ein bemerkenswerther Zug in diesen Vorgängen scheint mir darin zu liegen, dass die Anziehung des Wassers zu dem zu lösenden Salze einen so grossen Theil der wirksamen chemischen Kräfte zwischen den sich gegenseitig verdrängenden Elementen (Zink und Quecksilber) ausmachen kann. In den vorliegenden Messungen beträgt die elektromotorische Kraft der Lösung allein etwa nur ein Achtel von der ganzen Kraft der concentrirteren Lösungen. Aber die Kraft der Lösung kann sich bei den weiteren Verdünnungen, welche nicht mehr hinreichende Constanz für genauere Messungen hatten, noch erheblich vermehren, und nach der in Gleichung (5a) gegebenen Formel könnte sich diese Kraft bei immer weiter wachsenden Werthen von δ , bis zu jedem beliebigen Grade steigern. Daraus würde folgen, dass in sehr verdünnten Lösungen oder in ganz salzfreien Säuren Metalle, die wir sonst als unoxydirbar in der betreffenden Säure betrachten, sich spurweise bis zu einer gewissen Grenze unter Wasserstoffentwicklung würden lösen können. Ich bemerke, dass ganz ähnliche Verhältnisse auch bei der Lösung der Gase nach der mechanischen Wärmetheorie stattfinden müssen, woraus sich zum Theil ganz veränderte Ansichten über das Wesen der galvanischen Polarisation ergeben möchten.

IC.

Ueber absolute Maasssysteme für electrische und magnetische Grössen.

(Wiedemann's Annalen Bd. XVII. S. 42–54. 1882.)

Die Physiker haben bisher zwei verschiedene Systeme ⁴² electrischer absoluter Maasse brauchen müssen, das electrostatische und electromagnetische, während für magnetische Grössen bisher immer nur eins, nämlich das von Gauss eingeführte gedient hat, an welchem nur die als Einheiten der Länge und Masse gebrauchten Theile des Meter und Gramm gewechselt haben. Die Anwendung jener zwei electrischen Maasssysteme war schon aus dem praktischen Grunde bisher nicht zu umgehen, weil die Bestimmung des Factors, der zur Reduction der electrostatischen auf electromagnetische Maasse zu dienen hat, nämlich der kritischen Geschwindigkeit Weber's, noch nicht mit dem gleichen Grade der Genauigkeit ausgeführt werden konnte, der innerhalb des Kreises der electromagnetischen Messungen einerseits und der electrostatischen Messungen andererseits zu erreichen war. Es war deshalb vorthellhafter, wenn bei jeder Experimentaluntersuchung dasjenige Maasssystem angewendet wurde, auf welches die gemessenen Grössen mit der grösseren Genauigkeit zu beziehen sind.

Dazu kommt dann noch die Rücksicht auf die Vermeidung allzu langer Zahlen, welche vielleicht bewirken wird, dass wir fortfahren werden, für electrostatische und galvanische Phänomene zweierlei, wenn auch aufeinander zurückführbare



Maasse anzuwenden. Zur Zeit sind die electromagnetischen Messungsmethoden am meisten ausgebildet, sie sind unverkennbar die praktisch wichtigsten für eine in riesigen Schritten wachsende Technik, und ich habe es deshalb ganz zweckentsprechend gefunden, dass der im vorigen Jahre in Paris tagende internationale Congress ein electromagnetisches System von absoluten Maassen festzustellen gesucht hat. Hätte es sich um rein wissenschaftliche Zwecke gehandelt, so würde ich das bisher gebräuchliche electrostatische System vorgezogen haben, da dieses, wie mir scheint, die wesentlichen Analogien der Erscheinungen durch analoge Formeln am besten darstellt, und ihnen den übersichtlichsten und fasslichsten Ausdruck giebt. Es war dieses auf Principien von Gauss gestützte System, welches bisher den meisten physikalisch mathematischen Abhandlungen dieses Gebietes zu Grunde gelegen hat.

Eben deshalb würde es mir sehr wenig wünschenswerth erscheinen, wenn dieses System nun gänzlich fallen und sogar seinen Namen an ein neues abgeben sollte, wie es Hr. Clausius¹⁾ in seinem kürzlich veröffentlichten Aufsätze vorgeschlagen hat. Vervielfältigung der Maasssysteme ohne ganz dringende Gründe würde ich überhaupt nicht empfehlen. Uebertragung aber eines bisher schon gebrauchten und vielfach benutzten Namens auf ein neues System würde unausbleiblich wieder unnöthige und verdrüssliche Verwirrung in der physikalischen Literatur hervorbringen, auch abgesehen von jeder Werthschätzung des aufgegebenen im Verhältniss zu dem neuen System.

Jede Feststellung eines neuen absoluten Maasses muss auf die messende Beobachtung eines natürlichen Vorganges oder Verhaltens basirt werden, wie schon unter den drei Grundeinheiten das Gramm mittels der Dichtigkeit des reinen Wassers von 4° C. auf die beiden anderen reducirt worden ist. Das Maass der magnetischen Quanta, welches bisher ausschliesslich angewendet wurde, ist auf die von Gauss aufgestellte Definition gegründet, wonach die abstossende Kraft zwischen zwei magnetischen Quantis, m_1 und m_2 , die in der

1) Clausius, Verhandl. des naturh. Vereins d. preuss. Rheinl. u. Westfal. 39. 6. März. 1882. — Wied. Ann. 16. p. 529. 1882.

Entfernung r voneinander sich befinden, nicht blos proportional, sondern gleich dem Werthe $(m_1 \cdot m_2 / r^2)$ gesetzt wird. Da die Kraft und die Länge r nach bekannten Methoden zu messen sind, ist dadurch der Werth des Productes $(m_1 \cdot m_2)$ in absoluten Maassen bestimmt, und wenn also aus anderen That-sachen das Verhältniss (m_1 / m_2) bestimmt werden kann, sind m_1 und m_2 einzeln zu bestimmen.

Genau dasselbe Princip wendet Gauss im Anfang seiner Abhandlung: „Allgemeine Lehrsätze in Beziehung auf die im verkehrten Verhältnisse des Quadrats der Entfernung wirkenden Anziehungs- und Abstossungskräfte“¹⁾ auch auf die electrischen Quanta und die gravitirenden Massen an. Wenn er in den beiden letzteren Fällen das Princip auch nicht in praktische Ausführung gesetzt hat, so würde es doch gerechtfertigt sein, alle drei Methoden mit seinem Namen, als dem ihres geistigen Autors, zu bezeichnen. Die, welche sich auf die Electricität bezieht, giebt das electrostatische System, wie es bisher angewendet worden ist. Die dritte, welche sich auf die gravitirenden Massen bezieht, wird vielleicht in Zukunft eine wichtige Rolle spielen, wenn es gelungen sein wird genauere Bestimmungen der Gravitationskraft auszuführen. Bezeichnen wir, wie Maxwell, durch eckige Klammern die Dimensionen des von denselben eingefassten Ausdrucks, mit M eine Masse, mit L eine Länge, mit T eine Zeit, so ist nach Gauss die Anziehung zwischen zwei schweren Massen m in der Entfernung r :

$$\left[\frac{m^2}{r^2} \right] = \left[\frac{M \cdot L}{T \cdot T} \right] \quad \text{oder} \quad \left[\frac{M}{L^3} \right] = \left[\frac{1}{T^2} \right].$$

Links steht eine Dichtigkeit, rechts eine Function der Zeit. Setzen wir also, wie bisher, die absolute Dichtigkeit des Wassers gleich eins, während die Einheit der Masse nach Gravitationsmaass bestimmt ist, so ist dadurch ein von der wahrscheinlich veränderlichen Rotation der Erde unabhängiges Zeitmaass gegeben, und es bliebe nur die Ueberlieferung eines einzigen Maasses, des Meter, der Tradition überlassen. Aber

1) Resultate aus den Beobachtungen des magnet. Vereins 1839.



auch dieses liesse sich absolut definiren, wenn man eine unveränderliche Geschwindigkeit, z. B. die Lichtgeschwindigkeit im freien Aether zu Hülfe nähme.

So würde z. B. die Umlaufzeit T eines kleinen Trabanten, der dicht an der Oberfläche einer Kugel aus reinem Wasser von normaler Dichtigkeit D umliefe, sich unabhängig von dem Radius der Kugel in Gravitationsmaass finden:

$$T^2 = \frac{3\pi}{D},$$

und die Lichtgeschwindigkeit:

$$v = \frac{L}{T} = L\sqrt{\frac{D}{3\pi}},$$

durch welche letztere Gleichung die Länge L gegeben wäre. Dieses System würde uns also von der Ueberlieferung jedes traditionellen Maasses frei machen.

Im Gauss'schen magnetischen und electrostatischen Maasse sind die Dimensionen des magnetischen Quantums m und des electrostatischen Quantums e bestimmt durch die Gleichungen:

$$[m] = [e] = [M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}],$$

beide basirt auf das Phänomen der Abstossung zwischen ruhenden magnetischen, beziehlich ruhenden electrischen Quantis.

Für die electromagnetischen Bestimmungen wurde dagegen die ponderomotorische Wirkung eines geschlossenen electrischen Stromes auf einen Magnetpol benutzt, deren Gesetze hauptsächlich und vollständig von Ampère formulirt worden sind.

Die Componenten der magnetischen Kräfte, die ein electrischer Strom in seiner Nachbarschaft hervorbringt, lassen sich ebenso wie die eines Magneten als Differentialquotienten einer Potentialfunction darstellen, welche dieselben Differentialgleichungen erfüllt, wie die der Magnete, und sich von denen der letzteren nur dadurch unterscheidet, dass sie periodisch um die gleiche Grösse in ihrem Werthe wächst, so oft man mit nur einem Pole einen ganzen Umlauf um den Stromleiter macht. Da die electromagnetischen Kräfte der Stromintensität des Leiters proportional sind, so ist auch die Periode des Potentials dieser Intensität proportional und unabhängig

von der Form des Leiters. Maxwell benutzt deshalb den Werth der Periode des Potentials Ω als Maass für die Intensität des Stromes C und setzt deshalb in § 623 seines Treatise on Electricity and Magnetism die Dimensionen beider gleich:

$$[\Omega] = [C].$$

Die feste Zahlenbeziehung zwischen beiden ergibt sich aus einer früheren Stelle des genannten Buches § 479, wo T die magnetische Kraft eines sehr langen geraden Stromleiters in der kleinen Entfernung r von seiner Axe bezeichnet, und J für C gesetzt ist:

$$Tr = 2J.$$

Da:

$$\Omega = T \cdot 2\pi r,$$

so ist:

$$\Omega = 4\pi J,$$

wodurch Maxwell's Bestimmung bei Benutzung des Gauss'schen magnetischen Maasses gleich dem von W. Weber vorgeschlagenen electromagnetischen Maasse wird.

Zu Ampère's Zeiten lag eine ausgeführte Theorie der Potentialfunctionen noch nicht vor. Er hat aber, was wir jetzt in der angegebenen Weise naturgemäss ausdrücken können, durch eine geschickt gewählte Fiction durchaus genau dargestellt, indem er sich eine vom Stromleiter begrenzte Trennungsfläche des in diesem Falle doppelt zusammenhängenden Raumes mit einer magnetischen Doppelschicht belegt construiert dachte. Wenn das magnetische Moment jeder Flächeneinheit der Doppelschicht mit μ bezeichnet wird, so muss nach bekannten Sätzen der Potentialsprung zwischen den beiden Seiten sein:

$$\Omega = 4\pi\mu, \text{ also: } \mu = J.$$

Bei dieser Ausdrucksform des Ampère'schen Gesetzes ist Hr. Clausius stehen geblieben.

Beide Ausdrucksformen sind vollkommen gleichbedeutend und vollkommen gleichberechtigt, solange wir die magnetischen Quanta nach Gauss'scher Vorschrift messen. Das erkennt auch Hr. Clausius an; aber er glaubt eine erweiterte Anwendung des Maxwell'schen Ausdrucks auf andere Maasssysteme verwerfen zu dürfen; er erklärt dies für ein Versehen von Maxwell und die daraus hergeleiteten Gleichungen und Dimensionsbestimmungen für falsch.



Der einzige Grund, den er in dieser Beziehung gegen Maxwell's Definition anführt, ist der folgende in § 3 der oben citirten Abhandlung: „Nun ist aber die Kraft, welche ein Strom auf einen Magnetpol ausübt, eine electrodynamische, und daraus folgt, dass eine Gleichung, deren Ableitung sich auf diese Kraft stützt, nur in dem auf die electrodynamischen Kräfte gegründeten Maassysteme als gültig betrachtet werden darf, aber nicht im statischen Maassysteme, welches auf die electrostatischen Kräfte gegründet ist.“

Aber selbst, wenn man als Anhänger von Ampère's Hypothese gegen den ersten Theil dieses Satzes keine Zweifel hegte, sehe ich nicht ein, warum der Schluss nur gegen Maxwell und nicht gegen die von Hrn. Clausius selbst adoptirte Fassung des Ampère'schen Gesetzes angewendet werden soll, da letztere doch nichts als eine andere Ausdrucksweise derselben Thatsachen ist. Beide Grössen, sowohl Maxwell's Potentialperiode Ω , wie Ampère's magnetisches Moment der Flächeneinheit sind im Gauss'schen Maasssystem von der Dimension $[m/L]$; beide haben eine physikalische Bedeutung nur in „der Darstellung der Kraft, welche ein Strom auf einen Magnetpol ausübt.“

Auch scheint mir der eigentliche Grund der Differenz in einem ganz anderen Umstande zu stecken, nämlich in Maxwell's Definition des magnetischen Potentials Ω . Dies ist bei ihm nicht die Rechnungsform $\Sigma[m/r]$, sondern er definirt es in diesem Falle, wie auch in den entsprechenden Anwendungen auf Electrostatik und Electrodynamik dadurch, dass $\Omega \cdot m$ eine Arbeit ist, welche Bestimmung auch der Gauss'schen Bestimmung von m zu Grunde liegt.

Der Differentialquotient $-d\Omega/dx$ ist dem entsprechend die Kraft, welche auf die Einheit des Magnetismus wirkt, und $(-\Omega)$ also Jacobi's Kräftefunction. Wenn wir für m eine andere Maasseinheit einführen und mit dieser messend m_1 , Ω_1 , J_1 statt m , Ω , J erhalten, so muss nach Maxwell's Definition:

$$m\Omega = m_1\Omega_1$$

also auch:

$$mJ = m_1J_1$$

sein. Die Einheit des Stromes wächst also umgekehrt wie

die neugewählte Einheit des Magnetismus im Verhältniss zur alten; die Kraft, welche die Stromeinheit auf die Einheit des Magnetismus ausübt, bleibt aber constant. Bei Hrn. Clausius wachsen dagegen m und J beide in demselben, nicht im umgekehrten Verhältnisse, und die Kraft, wie m^2 oder J^2 . Nach seinen Festsetzungen bringt die fingirte Ampère'sche Fläche immer noch einen dem Momente der Flächeneinheit gleichen Sprung in der Function $\Sigma(m/r)$ hervor; aber diese Function ⁴⁸ hat dann nicht mehr die Bedeutung der Kräftefunction für die neugewählten magnetischen Einheiten.

Ein Versehen von Maxwell kann ich in allem diesen nicht erkennen, und seine aus der von ihm gewählten Formulirung des Grundphänomens abgeleiteten Gleichungen sind durchaus in sich ebenso folgerichtig und richtig, wenn sie im Sinne ihres Autors verstanden werden, wie die von Hrn. Clausius. Vielmehr zeigt dieser Fall, dass wenn wir die Gauss'sche Bestimmung der magnetischen Einheit verlassen, wir wieder in mindestens zwei verschiedene und gleichberechtigte Systeme von Maasseinheiten verfallen, und ich für meinen Theil würde daraus den beiden Autoren Maxwell und Clausius gegenüber die praktische Folgerung ziehen, dass wir die genannte Methode von Gauss überhaupt nicht verlassen sollten, ehe nicht ganz besonders wichtige Gründe und ein ganz bestimmter Zweck zu solchem Verfahren vorliegen, wobei dann auch wahrscheinlich die Wahl zwischen Maxwell's und Clausius' System durch sachliche Gründe sich entscheiden würde.

Wenn ich nun auch Maxwell gegen die Beschuldigung, dass er in Folge eines Versehens unrichtige Gleichungen aufgestellt habe, in Schutz nehmen muss: so ist doch zu erwähnen, dass in der Redaction des Textes von § 623 seines angeführten Werkes, wo er die Dimensionen sämtlicher übrigen electricchen und magnetischen Grössen auf die Dimensionen einer beliebig gewählten unter ihnen zurückführt, eine Lücke vorkommt, welche den Leser leicht in die Irre führen könnte, wenn er den Zusammenhang der etwas verwickelten Gleichungssysteme des § 622 und 623 nicht genau untersucht, und welche den Sätzen des § 623 eine grössere Tragweite zu geben scheint, als Maxwell selbst wahrscheinlich ihnen hat geben wollen. Er spricht



nämlich im Anfang seines Capitels X, in § 620, zwar von elektrostatischen und electromagnetischen Einheiten, aber nicht von magnetischen, giebt übrigens Definitionen, wonach die electrokinetischen Einheiten ganz ohne Berücksichtigung des Magnetismus bestimmt werden. Dann aber kommen in § 621 auch ⁴⁰ magnetische Grössen hinein, welche er einführt, ohne irgendwie ausdrücklich zu sagen, dass in allen seinen Bestimmungen des Verhältnisses zwischen electrischen und magnetischen Grössen durchaus die in den vorliegenden Capiteln von ihm besprochene electromagnetische Bestimmung:

$$4\pi J = \Omega$$

festgehalten werden solle.

In dieser Beziehung ist Maxwell's Absicht in der Entwerfung verschiedener Systeme genau dieselbe und ebenso beschränkt gewesen, wie die neuerlich von Hrn. Clausius durchgeführte, wenn auch die Ausführung dieser Absicht bei beiden aus dem besprochenen Grunde verschieden ausgefallen ist.

Bei der Wichtigkeit der Sache erlaube ich mir, hier eine Uebersicht von dem Zusammenhang der Gleichungen der entsprechenden Paragraphen (621 bis 623) von Maxwell's Treatise on Electricity and Magnetism zu geben. In § 621 dieses Buches stellt Maxwell die Grössen zusammen, für welche die Dimensionen der Einheit zu bestimmen sind. Ich lasse dieselben hier in etwas anderer Ordnung und mit den in Deutschland gebräuchlicheren Bezeichnungen ihres Sinnes folgen. Es sind dies vier electrostatische, nämlich:

e) electrisches Quantum,

E) electrostatische Potentialfunction,

Ⓓ) dielectriche Polarisations (gemessen durch die electrische Dichtigkeit an der Oberfläche des Dielectricums),

Ⓔ) electrische Kraft in einem Punkte (wirkend auf die Einheit von e).

Die vier entsprechenden magnetischen Grössen bezeichnet er in derselben Reihenfolge mit m, Ω, Ⓕ, Ⓗ.

Dazu kommen noch vier entsprechende Grössen, die sich auf electrische Ströme beziehen, nämlich:

C) Intensität eines Stromes,

Ⓔ) Stromdichtigkeit,

p) electrokinetisches Moment eines Stromes,

Ⓐ) Vectorpotential electrischer Ströme.

Was den Sinn der beiden letzten Grössen betrifft, so ist p das Neumann'sche electrodynamische Potential der vorhandenen anderen Ströme bezogen auf den von der Stromeinheit durchzogenen ganzen Leiter, für den es berechnet wird, und $\mathcal{A}.ds$ ist dasselbe Potential bezogen auf ein an einem bestimmten Orte liegendes Leiterelement ds.

Ich bemerke noch, dass die mit grossen deutschen Buchstaben bezeichneten Grössen „Vectoren“ sind, d. h. gerichtete, und nach dem Gesetz des Parallelogramms der Kräfte in Componenten zerlegbare Grössen, und dass die Auswahl derselben durch Maxwell's Streben, nur möglichst direct beobachtbare Grössen in die Rechnung einzuführen und Hypothesen fern zu halten, bedingt ist.

In § 622 stellt Maxwell Dimensionsbestimmungen auf für Producte und Quotienten dieser zwölf Grössen, wie sie unmittelbar durch den Sinn derselben gegeben sind. Es sind dies fünfzehn Bestimmungen, in denen die einerseits auf Electricität und andererseits auf Magnetismus bezüglichen Grössen vollständig getrennt bleiben, sodass, was wohl zu bemerken ist, aus diesen fünfzehn Bestimmungen keine Beziehung zwischen Electricität und Magnetismus hervorgeht. Ich stelle sie tabellarisch zusammen, indem ich Maxwell's schon oben angewendete Bezeichnung der Dimension beibehalte.

Nr.	Dimension	Electrische Grössen		Magnetische Grössen
1	$L^2 M / T^2$	[e . E],	[p . C]	[m . Ω]
2	$M / (L T^2)$	[Ⓓ . Ⓔ],	[C . Ⓐ]	[Ⓕ . Ⓗ]
3	T	[e / C],	[p / E], [Ⓐ / Ⓔ]	—
4	L	[E / Ⓔ],	[p / Ⓐ]	[Ω / Ⓗ]
5	L ²	[e / Ⓓ],	[C / Ⓔ]	[m / Ⓕ]

Die Bestimmungen der letzten Reihe folgen aus der ersten, wenn man sie durch das Product der betreffenden Grössen der zweiten und vierten Reihe dividirt.



Die fünfte Reihe kann also als überflüssig weggelassen werden; dann bleiben noch folgende identische Gleichungen zwischen den in den vier ersten Zeilen vorkommenden Grössen:

$$\begin{aligned} \left[\frac{p}{E} \right] &= \left[\frac{p \cdot C}{e \cdot E} \right] \cdot \left[\frac{e}{C} \right], \\ \left[\frac{\mathfrak{H}}{\mathfrak{G}} \right] &= \left[\frac{p \cdot C}{e \cdot E} \right] \cdot \left[\frac{e}{C} \right] \cdot \left[\frac{E}{\mathfrak{G}} \right] \end{aligned}$$

Dann sind schliesslich also noch drei unabhängige Bestimmungen für die vier magnetischen Grössen m , Ω , $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{H}$ übrig, und sieben solche für die acht electrischen Grössen s , E , p , C , $\mathfrak{D}$, $\mathfrak{E}$, $\mathfrak{H}$. Wenn also je eine Grösse dieser beiden Gruppen durch andere Feststellungen bestimmt wird, z. B. m und e , das Quantum des Magnetismus und der Electricität, so sind die anderen alle vollständig bestimmt, nämlich:

	Electrisch	Elektrokinetisch	Magnetisch
Potentiale . . .	$[E] = \left[\frac{L^2 M}{e T^2} \right]$	$[p] = \left[\frac{L^2 M}{C T^2} \right]$	$[\Omega] = \left[\frac{L^2 M}{m T^2} \right]$
Kräfte	$[\mathfrak{E}] = \left[\frac{L M}{e T^2} \right]$	$[\mathfrak{H}] = \left[\frac{L M}{C T^2} \right]$	$[\mathfrak{D}] = \left[\frac{L M}{m T^2} \right]$
Dichtheiten . .	$[\mathfrak{D}] = \left[\frac{e}{L^3} \right]$	$[\mathfrak{G}] = \left[\frac{C}{L^3} \right]$	$[\mathfrak{B}] = \left[\frac{m}{L^3} \right]$
	$[e] = [C T]$		

Dies sind die Bestimmungen, die ohne weitere beschränkende Gleichungen aus den obigen fünfzehn herfolgen. Diese lassen sich auf jede beliebige Festsetzung der Einheiten von m und e , also auch auf das electrostatisch-magnetische System von Gauss anwenden.

Nun folgt bei Maxwell in § 623 der Passus: „Diese fünfzehn Gleichungen sind nicht von einander unabhängig, und um aus ihnen die Dimensionen aller darin enthaltenen zwölf Einheiten abzuleiten, brauchen wir noch eine Gleichung.“ In der That brauchen wir zwei, da e und m einzeln bestimmt werden müssen, dadurch, dass man auf zwei als Fundamentalphänomene

betrachtete Beobachtungsthatfachen zurückgeht. Die eine hier fehlende, von Maxwell nicht ausdrücklich angeführte, sondern aus dem Zusammenhange als selbstverständlich vorausgesetzte Gleichung können wir wie oben schreiben:

$$[\Omega] = [C].$$

Hr. Clausius hat dafür die andere minder durchsichtige:

$$[p] = [m]$$

gewählt. Aber da eine der fünfzehn Bestimmungen des § 622 lautet:

$$[m \cdot \Omega] = [p \cdot C],$$

so folgt jede von beiden aus der anderen.

Eben deshalb müssen nun aber die Schlussworte des § 623: „Alle die oben gegebenen Bestimmungen sind richtig für jedes beliebige System von Einheiten, welches wir wählen mögen“, geändert und auf electromagnetische Systeme beschränkt werden, und zwar auch nur auf solche, welche aus der von Maxwell definirten Bedeutung des electromagnetischen Grundgesetzes hergeleitet sind. Denn jener Schlusssatz passt weder auf das electrostatische System, noch auf die Systeme, welche Hr. Clausius aufgestellt hat. An die Möglichkeit, dass eine andere Fassung des electromagnetischen Grundgesetzes hier zu anderen Consequenzen führen könne, hat Maxwell wohl nicht gedacht, und in dieser Beziehung giebt die neueste Arbeit des Hrn. Clausius in der That eine dankenswerthe Bereicherung unserer Einsichten.

Schliesslich wäre noch zu reden von dem Grunde, weshalb Hr. Clausius das bisherige, nach den Principien von Gauss entworfene electrostatische System fallen lassen will. Das einzige, was er darüber sagt, ist in § 1 seiner Abhandlung enthalten. Nachdem er erwähnt hat, dass die von geschlossenen electrischen Strömen aufeinander ausgeübten Kräfte als unzweifelhaft bekannt angesehen werden können, fährt er fort: „Da ferner die kleinen, nach Ampère im Inneren eines Magnets anzunehmenden electrischen Ströme ebenfalls geschlossen sind, so hat man es beim Magnetismus mit Kräften derselben Art zu thun.“ Darauf folgt eine Auseinandersetzung, wonach die Kräfte zweier magnetischer Quanta als dynamische zu betrachten seien.



Dieser Grund würde aber doch nur dann entscheidend sein, wenn sicher constatirt wäre, dass die Ampère'sche Annahme der Wirklichkeit entspräche, während man bisher kaum sagen kann, dass dieselbe klar und consequent für alle Arten diamagnetischer und ferromagnetischer Körper durchgeführt sei. Namentlich würde diese Hypothese auch erfordern, dass die hypothetischen Molecularströme der magnetisirten Körper die durch electrodynamische Induction zu erzeugenden Veränderungen zeigten, wie dies Hr. W. Weber in seiner bekannten Erklärung der diamagnetischen Polarisation in der That folgerichtig angenommen hat. Wie dies mit den Eigenschaften der ferromagnetischen Körper vereinigt werden könne, überlasse ich den Anhängern dieser Theorie auseinanderzusetzen. Vorläufig können wir diese Theorie, so interessant sie auch ist, weder als bewiesen noch auch nur als vollständig durchgeführt ansehen.

Neben den electrodynamischen Theorien, welche directe Fernwirkung annehmen, deren Grösse und Richtung von den absoluten oder relativen Bewegungen je zweier electricischer Quanta abhängen soll, steht die von Faraday-Maxwell. Sie hat vor jenen ersten mindestens den Vorzug, dass sie weder das Princip der Endlichkeit und Constanz von der Energie, noch das von der Gleichheit der Action und Reaction verletzt, und ausserdem noch eine von manchen Schwierigkeiten der bisherigen Undulationstheorie freie Theorie des Lichts auf dieselben Annahmen begründet, die der Electrodynamik zu Grunde liegen. Um den wesentlichen Character der Kräfte der Electricität und des Magnetismus zu finden, schliesst Maxwell diejenigen Processe aus, bei denen nach Art der Reibung Wärme erzeugt und electriche oder magnetische Energie verloren wird, und legt seiner Theorie nur die conservativen Vorgänge zu Grunde. Namentlich schliesst er die Leitung der Electricität in Leitern und die Coërcitivkraft in Magneten aus. Dann bleibt aber in seinen Grundgleichungen die vollkommenste Analogie nicht zwischen Magneten und bewegter Electricität, sondern zwischen ruhender dielectrichester und ruhender magnetischer Polarisation stehen. Gerade dieser Analogie passt sich Gauss' electrostatisches Maasssystem vollkommen an.

Ich will noch bemerken, dass wenn man nach Analogie des Hamilton'schen Princip's dasjenige nach der Zeit genommene Integral zu bilden sucht, dessen Variation die Bewegungsgleichungen nach Maxwell giebt, an Stelle des electrodynamischen Potentials von Clausius (electrokinetischer Energie Maxwell's), eine bilineare Function der Componenten der electriche Strömung einerseits und der Componenten der magnetischen Momente andererseits auftritt, in welcher die letzteren aber nicht als Geschwindigkeiten zu behandeln sind. Diesen letzteren Punkt behalte ich mir vor nächstens an einem anderen Orte zu behandeln.

Vorläufig kommt es mir nur darauf an daran zu erinnern, dass der Grund, auf den hin Hr. Clausius das bisherige electrostatische System verwerfen will, eine zwischen verschiedenen Theorien streitige hypothetische Annahme ist, und ich möchte die Physiker bitten, den Namen des von Gauss ausgehenden, in mathematischen Arbeiten bisher vorzugsweise gebrauchten electrostatischen Systems nicht auf ein anderes zu übertragen. In diesem System sind die Potentiale (m^2/r) und (e^2/r) Arbeitsgrössen, ihre ganze physikalische Wichtigkeit beruht darauf, dass sie das sind. Die Theorie der Potentialfunctionen bildet eines der entwickeltsten und interessantesten Capitel der mathematischen Physik, welches gut und vollständig gekannten physikalischen Vorgängen entspricht. Ändert man die Gauss'schen Einheiten, so muss man sich gewöhnen, allen Potentialfunctionen Factoren hinzuzufügen, damit sie Arbeitsgrössen bleiben und ihre Differentialquotienten die Kräfte geben. Ob dagegen J^2 eine Kraft ist, und mJ eine Arbeit, oder ob wir dafür zu schreiben haben A^2J^2 und AmJ , scheint mir viel unerheblicher zu sein, namentlich da wir von dem Gebiete der electromagnetischen Wirkungen doch erst einen Theil, nämlich den der geschlossenen Ströme gut und genau kennen, im Gebiete der ungeschlossenen Ströme aber noch die üppigste Flora von Hypothesen wuchert.



Personen-Register.

Die römischen Ziffern beziehen sich auf den Band, die arabischen auf die Seite.

Abbe, E., II. 211. 212.
Abdul Kadir, I. 425.
Aguilonius, II. 448.
Airy, I. 233—254. II. 26. 44.
Amici, II. 185.
Ampère, I. 61. 547. 559. 563. 688—701. 702—762. 775—790. II. 996—999.
Andral, II. 702. 720.
Appel, II. 458.
Arago, II. 869.

Banks, II. 684.
Bast, N., II. 932—938. 939—946. 947—951.
Bequerel, E., I. 7. 56. II. 688—695. 714—718. 745—748.
Beltrami, II. 617. 643. 647. 652.
Berger, II. 686. 687. 691. 693.
Bergmann, II. 721.
Bernoulli, D., I. 247. 303.
Bernstein, J., I. 631.
Berthold, II. 692. 693.
Berthollet, I. 33.
Bertrand, J., I. 135—145. 646. 647. 672. 679—683. 690. 699—700. 706. 708. 720. 721. 726—728.
Bessel, I. 207. II. 116. 292.
Biot, I. 234.
Blagden, II. 684. 725.
Blake, E. W., I. 233. 242.
Blaserna, P., I. 630—631.
Bleekrode, II. 964.
du Bois-Reymond, E., I. 457. 463. 476. 513—519. 892. II. 714. 747. 758. 760. 765. 781. 784. 802. 812. 813. 874. 891—923. 926. 931.

Bouty, II. 964.
Braun, II. 693.
Breguet, II. 867.
Breschet, II. 688—695. 714—718. 745—748.
Brewster, D., I. 250. II. 5. 7. 24—44. 302. 305. 598—600.
Brodie, I. 4—8. II. 715. 717. 719.
Brücke, E., II. 38. 231. 293—295. 255. 258. 264—265. 303. 337. 338. 343. 604.
Bunsen, I. 852. 873.
Buntzen, II. 746.
Buys-Ballot, I. 250.

Carion, s. Stellwag von Carion.
Carnot, I. 6. 7. 17. 33.
Castell, P., II. 4.
Cauchy, A., I. 142. 437. II. 80—81. 214.
Cazin, I. 631.
Challis, J., I. 233—254.
Chaussat, I. 5. II. 715. 716.
Chevreul, II. 350.
Chisholm, II. 694.
Chladni, I. 257. 264. 265. 270. 271. 286.
Christiansen, II. 221. 225.
Chapeyron, I. 6. 7. 17. 33. 38. 41.
Clark, J. W., I. 893. 894.
Clark, L., II. 969.
Clausius, R., I. 39. 71. 76—93. 157. 350. 488. 677. II. 965—973. 994—1005.
Colding, I. 72.
Colladon, I. 244.
Cotes, II. 116.
Coulomb, I. 799. 816.

Crahay, I. 250.
Cramer, II. 283. 284. 316. 325. 337. 339—344.
Cumming, II. 233.
Currie, II. 694. 695.
Cuvier, II. 762.

Davy, H., I. 34.
Davy, J., I. 3. 4. II. 682—691. 714. 718. 745. 746.
Delaroche, II. 684. 723.
Despretz, I. 5. 8—11. 66. 385. II. 693. 703—713.
Didymus, I. 425.
Dippel, L., II. 203.
Donders, F. C., I. 402. II. 283. 284. 338—341. 345. 352. 354. 361. 376. 333.
Doppler, I. 250. 255.
Dove, H., I. 262. 284. 431. II. 51. 62. 457.
Draper, II. 26—29.
Dugès, A., II. 762.
Duhamel, I. 234—249. 273. 307.
Dulong, I. 5. 8—11. 39. 66. II. 703—713.
Dumas, II. 691.
Dupuy de Lome, I. 169—171.
Dutrochet, II. 689. 692. 693. 748.

Earle, II. 695. 717.
Edlund, I. 895—897.
Edwards, II. 685.
Ehrenberg, II. 688. 679. 728.
Elster, J., I. 866.
Encke, II. 116.
v. Erlach, II. 234. 264.
Esselbach, E., II. 78—82.
Euklides, II. 611. 615. 638. 642—643. 649. 658—659.
Euler, I. 101. 159. 247. 303. 304. 311. II. 116.
Exner, F., I. 929.
Exner, S., II. 948. 949.

Faraday, M., I. 48. 52. 94. 95. 459. 556. 629. 777. 779. 788. 798—800. 824. 827. 911.
Favre, I. 9. 824. II. 703—710.
Fechner, II. 458. 604.
Fermat, II. 148.
Fick, A., II. 354. 365. 375. 389. 412. 940.

Fick, L., II. 342. 344.
Fizeau, I. 462. II. 869.
Forbes, J. D., II. 4. 5. 7. 22.
Fordyce, II. 684. 725.
Foucault, II. 46. 604. 869.
Fraunhofer, II. 73. 78—81.
Fricke, II. 687.
Frölich, II. 694. 695.

Galvani, II. 890—891. 914.
Gassiot, I. 526.
Gauss, I. 105. 130. 176. 190. 489. 492. 497. 563. 702. 712. 777. 879. II. 116. 611. 612. 777. 786. 993—1005.
Gavarret, II. 702. 720.
Gay-Lussac, II. 726. 731.
Gerlach, II. 532.
Gierse, I. 3. II. 682—695. 714. 745.
Girard, I. 218—220.
Göthe, II. 601.
Gore, II. 964.
Gounelle, I. 462.
v. Graefe, Albr., II. 344. 345.
Graham, I. 827. 828. 835. 918.
Grassi, I. 245.
Grassmann, I. 61. 547. 691—696. 719—722. 777. II. 45. 50. 54. 65—69.
Green, I. 90. 105. 309. 327. 496.
Gruber, J., II. 531—533. 550.
Guillaume, II. 933.
Gundlach, II. 204.

Hallström, I. 256. 258. 265—266. 277—278. 286. 292.
Haga, I. 893. 894.
Hales, I. 5. II. 715.
Hallmann, I. 3. II. 682. 687. 695.
Hankel, II. 748.
Harrison, II. 203.
Harting, II. 184. 201—203.
Hartnack, II. 185. 203.
Hasse, C., II. 583.
Hassenfratz, II. 54. 65.
Haughton, II. 513. 925. 930.
Hauptmann, I. 425.
Hausen, A., II. 890.
Hay, D. R., II. 4. 5.
Henke, II. 555.
Henle, II. 362. 527. 541.
Henrici, I. 271.
Henry, J., II. 784.
Henry, W., I. 33.



- Hensen, V., II. 583. 585.
Hering, E., II. 365. 478—481. 482—483. 492—496.
Hermann, L., I. 463. 471.
Herschel, J., II. 41. 44.
Herwig, I. 763. 767—771.
Hess, I. 10. 56. II. 703. 710.
Hirsch, A., II. 933. 938.
Hirschmann, II. 419.
Hittorf, I. 840. 848—850.
Holtzmann, I. 7. 37—41. 71. 90.
Home, II. 695. 717.
Hopkins, I. 305—307. 311.
Huber, II. 694.
v. Humboldt, A., II. 693. 891. 914. 916.
Hunter, II. 687. 691. 695.
Huschke, II. 280.

Jacobi, C. G. J., I. 74. II. 163. 965. 998.
v. Jacobi, M. H., I. 573.
Jochmann, I. 538. 552.
Joule, J. P., I. 33—40. 50. 55. 71—74. 775.

Kant, E., I. 68. II. 640—660.
Ketteler, II. 213.
Kiesewetter, I. 425.
Kirchhoff, G., I. 71. 139. 141. 158. 432. 435. 475. 476. 485. 488. 538—544. 545. 550—551. 554—555. 573. 610—611. 647. 650. 652. 667. 670. 672. 680. 681. 683. 687. 689. 690. 878. 892. II. 193. 519—521. 895. 960. 966.
Knapp, II. 385.
Knochenhauer, I. 46.
Köllicker, II. 338. 340.
König, A., I. 925—938.
Kohlrausch, F., I. 858. 873. 887. 888. II. 933. 989. 990.
Kohlrausch, R., I. 563. 633. II. 285.
Krause, A., II. 647. 650.
Krause, W., II. 118. 282. 303. 330.
Kundt, II. 222. 226.

Lagrange, I. 101. 286. 303. II. 96. 116. 183. 187. 194. 197.
Lambert, J. H., II. 4. 22.
Land, II. 640—660.
Langenbeck, M., II. 283.
Laplace, II. 703. 704. 710.

Lavoisier, I. 4. 8. 10. II. 703. 704. 710. 713.
Lecanu, II. 703.
Lecat, II. 890.
Lefebvre, I. 234.
Legallois, I. 5. II. 709. 716. 719.
Lehmann, II. 736. 741.
Lenz, I. 7. 49. 53. 54. 55. 775.
Liebig, G., II. 919.
Liebig, J., I. 4—10. II. 702. 704. 708—710. 726. 728. 731. 735.
Lindig, II. 962. 964.
Liouville, I. 523.
Lippmann, I. 931—938. II. 981.
Lipschitz, R., I. 70.
Liscovius, I. 243.
Listing, II. 116. 185. 195. 306. 329—336. 357—359. 360. 374—396. 407. 411. 417—419. 440—441. 466. 493.
Lobatschewsky, II. 617. 639. 646.
Lorberg, I. 538. 552. 586. 650. 672.
Lucas, II. 555. 556.
Lucas, I. 631.
Ludwig, II. 767.

Magnus, G., I. 895. II. 988.
Marchand, II. 718.
Marey, II. 933.
Marianini, I. 437.
Martine, II. 691.
Masson, I. 307.
Matteucci, I. 66—67. II. 747. 891—923.
Matthiessen, I. 874.
Maxwell, C., I. 538—544. 548—549. 556—558. 561. 564. 578. 626. 629. 637—639. 674. 703. 777. 779. 788. 795—797. 799—800. 816—820. 826. II. 347. 348. 995—1005.
v. Mayer, J. R., I. 41. 71—74.
Mayer, J. T., II. 4. 5. 7.
Meckel, II. 762.
Meissner, II. 352. 357. 361—365. 374. 389—391. 412. 422. 429.
Melloni, II. 26. 27.
Meyer, O. E., II. 214.
Mitchel, I. 462.
Möbius, II. 116.
v. Mohl, H., II. 201.
Moigno, II. 46.
Moleschott, II. 389.
Montigny, I. 250.
Moon, R., I. 233—254.
Moser, J., I. 847. 849. 853. 919. II. 979. 988—990.

- Moser, L. F., II. 41. 116.
Müller, J., II. 353. 364. 424. 441—446. 479—480. 593. 605. 679. 718.
Mulder, II. 706.
Munk, II. 938.

Navier, I. 172. 196.
Neumann, C., I. 537—544. 548. 629. 642. 645. 647—652. 659—661. 667—678. 687. 690. 691. 703—706. 710—711. 742. 759—760. 763. 767. 772. 777.
Neumann, F., I. 6. 61—65. 90—93. 182. 537—544. 546—549. 555. 558—564. 602. 636—639. 679—682. 688—701. 702—762. 763. 773. 774—790.
Newport, II. 671—679. 694.
Newton, J., I. 68—70. II. 4—7. 15. 20. 25. 27. 45. 50. 54. 64—68. 347. 591—592. 598—601. 659.
Nobert, II. 201—205.
Nobili, II. 891. 902.

Oertling, II. 71.
Ohm, G. S., I. 52. 256. 258. 267. 287—292. 398—400.

Pallas, II. 691.
Peltier, I. 57.
Pfäfer, II. 936.
Philip, I. 5. II. 716.
Piola, II. 116.
v. Piotrowski, G., I. 172—222. 874. 892. 898.
Playfair, II. 703.
Plinius, II. 4.
Poggendorff, I. 51. 53. 54. 256. 266. II. 751.
Poiseuille, J. L. M., I. 173—175. 215—222. 866. 874. 890—897.
Poisson, I. 90. 172. 196. 245. 247. 304—307. 311. 350. 556. 615. 798—803. 816. 925.
Poltzer, II. 549—556. 569.
Pouillet, I. 429. 455. II. 701. 767. 771. 778.
Prévost, II. 365. 442. 691.
Provençal, II. 693.
Prussack, II. 536.
Ptolemäus, I. 425.

Quet, I. 305—306.
Quincke, I. 799. 819. 865—898. 929. 934. 935.

Rathke, B., II. 959.
Recklinghausen, II. 354. 390. 427. 433. 452.
Recoss, E., II. 279. 851. 876.
Remak, II. 678.
Reuss, II. 694. 695.
Riccatti, I. 247.
Riecke, E., I. 690. 698. 706. 741. 766.
Riemann, B., I. 103. 777. 860. II. 503. 515. 611—617. 618—621. 637. 638.
Riess, P., I. 46. 77—80. 857.
Ritter, II. 812.
Rivini, II. 527.
Robert-Lefebvre, s. Lefebvre.
Roerber, I. 256. 258. 266. 270. 278. 282. 286. 292.
Roger, II. 685. 694.
Romberg, II. 717.
Root, E., I. 835—839. 918.
Rowland, H. A., I. 791—797.
Rudberg, II. 80.
Ruebe, II. 261—279. 357. 374. 376.
Ruhmkorff, II. 747.
Russel, Sc., I. 233. 250.

Saissy, II. 692.
Sanson, II. 308.
Savart, I. 248. 291.
Saweljew, I. 55.
Schafieddin, I. 425.
Scharling, II. 702. 713.
Scheibler, I. 256. 258. 266. 278—282. 299.
Schelske, II. 933.
Schiller, N., I. 780. 791.
Schklarewsky, A., I. 223—225.
Schlemm, II. 341.
Schopenhauer, II. 641. 657.
Schwann, Th., II. 727.
Seebeck, I. 234—249. 271. 287—292. 389. 398. 399. II. 348.
Séguin, I. 72.
Sellmeier, W., II. 213. 214. 223.
Senff, II. 282. 285. 296. 300.
Siemens, W., II. 778. 865. 867.
Silbermann, J. T., I. 9. 824. II. 703—710.
Silbermann (Orgelbauer), I. 887.
Silow, I. 819.



Simon, II. 736.
Smaasen, I. 475. 476. 491. II. 895.
Solliit, II. 203.
Sondhauss, I. 316. 379. 382.
Sorge, I. 264.
Spengler, II. 296.
Stefan, I. 691—692.
Stellwag von Carion, II. 340.
Stinde, J., II. 204.
Stokes, G. G., I. 141. 159. 172. 196.
207. 210—211. 233—254. 384.
II. 49. 55—57. 71—75.
Strehlke, I. 247.
Sturm, I. 244.

Tait, P. G., I. 71. 141.
Talbot, II. 78—80.
Tartini, I. 264. 277.
Thomson, J., I. 94. 95.
Thomson, W., I. 72. 141. 223. 523.
561. 795. 799—800. 856. 857. 861.
912.
Tiedemann, II. 691.
Toynbee, II. 541.
Trölsch, II. 528—529.
Turner, II. 691.
Tyndall, I. 97. 152.

Valenciennes, II. 693.
Valentin, II. 663—664. 668—669.
672—679. 713. 720.
Valli, II. 812.
Varley, I. 826.
da Vinci, L., II. 4.
Volkmann, II. 246. 300. 428. 431.
458. 460. 884.

Volta, II. 890.
Vorssellmann de Heer, I. 46. 77. 78.

Walker, I. 461.
Waller, II. 4.
Weber, Ed., II. 516—517. 764. 766.
794. 796. 807. 884.
Weber, F., I. 852.
Weber, W., I. 61. 64. 65. 93. 256.
258. 264—265. 292. 388. 503. 537—
544. 545—554. 563—564. 567. 573.
586. 628. 629. 637—645. 647—687.
711. 772. 777. 791. 796—797. 852.
II. 777. 786. 993. 997. 1004.

Wernicke, II. 225.
Wertheim, G., I. 233—246. 314—
316. 379.
Wheatstone, II. 778. 867. 869.
Wiedemann, G., I. 866. 872—877.
Williams, I. 5. II. 716.
Wollaston, I. 46. II. 6. 513. 925.
930.
Wüllner, I. 847—849. 853. 865.
II. 987.
Wundt, II. 354—359. 365. 375. 376.
386—389. 412. 494.

Yelloly, II. 695. 717.
Young, Th., I. 265. 286—289. 292.
—293. 410. 415. II. 6. 7. 21. 26.
346. 349.

Zamminer, I. 305. 314. 315. 383.
385. 394.
Zenker, J. C., II. 762.
Zöllner, I. 652. 763. 767. 773. 864.

Sach-Register.

Die römischen Ziffern beziehen sich auf den Band, die arabischen auf die Seite.
Mit einem * sind diejenigen Stellen ausgezeichnet, an welchen sich über den betreffenden Gegenstand eine eingehendere Darlegung findet.

Abbildung, conforme I. 153. *520.
Absolute Einheiten für physikalische Grössen II. 995.

— Maassysteme für elektrische und magnetische Grössen II. *993.
Accommodation des Auges II. *280. *283.

Action und Reaction I. 69.
Aequator eines Muskelbündels II. 900.

Aether, Maxwell's Hypothese über die Constitution desselben I. 638.
Akustik, Bericht über theoretische Arbeiten I. *233.

— physikalische I. *231.
— physiologische II. *501.
Amboss II. 543.

Analogie zwischen den Bewegungen der Elektrizität in einem Leiter und denen eines Gases I. 550. 577.

— zwischen den Bewegungen der Elektrizität in einem Dielectricum und denen des Lichtäthers (resp. eines festen elastischen Körpers) I. 557. 625.

— zwischen Farben und Tönen II. 81.
Anschaubarkeit II. 644.
Armmuskeln, Wirkung derselben II. *955.

Arbeitsäquivalent chemischer Vorgänge II. *958. *979.
Athembewegungen II. *953.

Atrope Linie des Auges II. 356. 371.
Aufgabe der Physik I. 13.

Auge, Farbenzerstreuung in demselben II. 51.

— Gang der Lichtstrahlen in demselben II. 231. 262.

Augenaxe, s. Accommodation.

Augenbewegungen II. *352. *360.

— Listing's Gesetz über dieselben II. 374.

Augenmedien, Brechung der Lichtstrahlen in denselben II. *116.

Augenspiegel II. *229. *261.

— Ruete'scher II. 270.

Augenstellung, s. Augenbewegungen.
Axiome der Geometrie II. *610. *618. *640.

— von Newton I. 68.

Begreiflichkeit der Natur I. 13.

Beugungsercheinungen im Mikroskop II. 198.

— in der Pupille II. 32.

Bewegung, geordnete und ungeordnete II. 972.

Bewegungsgleichungen der Elektrizität I. *537. *545. 572.

Bewegungsströme I. *899.

Bilder, welche durch Prismen entworfen sind II. *147.

Bildgrösse in einem optischen System in Beziehung zur Divergenz der Strahlen II. 95. 188.

Bildschärfe, abhängig vom Zerstreuungskreis II. *126.



Binocular Projection II. *492.
Blickpunkt II. 432.
Blinder Fleck, benutzt zur Bestimmung der Augenstellung II. 389.
Brandung der Schallwellen I. 239. 253.
Brechung des Lichtes an Kugelflächen II. *83.
— des Lichtes im Auge II. *116.
— des Lichtes im Prisma II. *164.
— des Lichtes, nicht homocentrische II. 174.
— der Schallstrahlen I. 255.
Breitenwinkel eines Punktes im Sehfeld II. 437.
Brennebenen II. 92.
Brennpunkte II. 92. 98. 104. 162.
Brustkasten, Bewegung desselben II. *953.

Calomel-Elemente II. 964. 980.
Capillar-elektrische Vorgänge I. *855. *925.
Capillarelektrometer I. 936.
Capillarrohren, Bewegung der Flüssigkeit in denselben I. 173. 215. 223.
Causalität I. 13. 68.
Centralkräfte I. 19. 68. 81.
Centrirtes System von Kugelflächen, Lichtbrechung in denselben II. *83.
Centrum, optisches, einer Linse II. 110.
Ciliarkörper II. 337.
Circularhoropter II. 421.
Combinationstöne I. *256. *263.
— objective Existenz derselben I. 262. 301.
Complementärfarben, s. Farbmischungen.
Complex Functionen I. 153.
Concentrationsunterschiede als Ursache galvanischer Ströme I. *840.
Condensatorische Ladung polarisirter Elektroden I. 913.
Condensatorwirkung einer Spirale I. 535.
Conforme Abbildung I. 153. *520.
Conjugirte Vereinigungspunkte (Bild.) bei der Lichtbrechung II. 87.
Constitutionswärme, s. Kraftäquivalent der Wärme.
Contacttheorie, elektrische I. 47. 910.
Contrast, simultaner und successiver II. 350.

Contrasterscheinungen II. 38. *350.
Convection, elektrische I. 779. 917.
— elektrolytische I. 828.
Convergenz, optische II. 89.
Convergenzstellung der Augen II. *497.
Correspondirende Punkte in den beiden Sehfeldern II. *427. 435.
Corti'sches Organ II. *582.

Dampfspannung von Salzlösungen, s. Wärmetheorie, mechanische.
Dehnung durch dielektrische Kräfte I. 814. 819.
Diamagnetismus I. 556. 615.
Diaphragmenströme I. 865.
Dielektrium I. 556. 611. *798.
Differenzton I. 282.
Diffraction im Mikroskope II. 198.
— in der Pupille II. 32.
Dimensionen physikalischer Grössen II. 995.
Dipolar elektromotorische Molekeln II. 910.
Discontinuirliche Flüssigkeitsbewegung I. *146.
Dispersive Linsen, s. Zerstreuungslinsen II. 115.
Dispersion, anomale II. *213.
Divergenz, optische II. 89.
Divergenzwinkel, Gesetz derselben II. 188. 193.
Doppelbilder, binoculare, benutzt zur Bestimmung der Augenstellung II. 390.
Doppelschicht, elektrische I. 489. *855. *925.
Doppelspalt, Beschreibung desselben II. 47.
Draht, elektrische Bewegung in denselben I. 603.
Drahtspirale, Condensatorwirkung derselben I. 535.
Drehungsmoment, Bestimmung desselben I. 182.
Drehungswinkel des Auges um die Gesichtslinie II. 421.

Egel, Nervensystem derselben II. 664. 668. 676.
Einfache Töne I. 257. 267.
— Wellenbewegung I. 267.
Einfach zusammenhängender Raum I. 103.

Einheit des elektrischen Widerstandes I. 573.
Elastische Körper, Bewegungen derselben I. 28.
Elektricität, thierische I. 513. II. *886.
Elektrische Convection I. 779. 917.
— elektromagnetische Wirkung derselben I. *791.
— Oscillationen I. *531. 633.
— Schläge, Verbreitung derselben I. *526.
— Vertheilung I. *520.
Elektrochemische Theorie I. 56.
Elektrode, unpolarisierbare I. 900.
Elektrodynamik I. 58. 90. *427.
Elektrodynamisches Grundgesetz I. *537. *545.
— Potential, I. 703.
Elektrodynamische Theorien, Uebersicht über dieselben I. 776.
Elektrolyse, Hypothese über die Vorgänge bei derselben I. 909.
Elektrolytische Convection I. 828.
Elektromagnetismus in Beziehung zum Gesetz von der Erhaltung der Kraft I. 61.
Elektromagnetisches Maasssystem II. *993.
Elektromotor zur Erregung von Muskelcontractionen II. 754.
Elektromotorische Kraft II. 894.
Elektrostatistisches Maasssystem II. *993.
Elektrotonischer Zustand eines Nerven II. 908.
Energie, actuelle oder kinetische, s. lebendige Kraft.
— actuelle, der elektrischen Bewegung I. 703.
— freie II. 959. 965. 972. 981.
— gebundene II. 959. 971.
— potentielle, s. Summe der Spannkraft.
— eines Muskels II. 766.
Entoptische Objecte im Gesichtsfeld des Mikroskopes II. 197.
Entropie, s. Thermodynamik.
Ergal, s. Summe der Spannkraft.
Erhaltung der lebendigen Kraft I. *17. 81.
— der Kraft I. *12. *76.
— bei elektrodynamischen Vorgängen I. 61. 553. 640. 648. 677. 711. 748. 811.
— bei galvan. Vorgängen I. 824.

Erhebungswinkel des Auges II. 361.
Erkenntnistheorie I. 14. 68. 678. II. *589.
Erschütterungsströme, s. Bewegungsströme.
Extrastrom I. 431.

Fähniss II. *726.
Farbenänderung durch Steigerung der Intensität II. 55.
Farbenblindheit II. *346.
Farbengleichungen II. 347.
Farbenkreis, Newton'scher, s. Farbentafel.
Farbenkreisel II. 18. 347.
Farbenmischung II. *3. *45. 592.
Farbensystem, als dreifach ausge dehnte Mannigfaltigkeit II. 612. 616. 623.
Farbentafel II. 64.
Farbentheorie, Brewster'sche II. *24.
— Young'sche II. 6. 21.
Farbenzerstreuung im Auge II. 51. 73.
Fieber II. 694.
Fliegen der Menschen I. 166.
Flüssigkeitsbewegungen, discontinuirliche I. *146.
Flüssigkeitselement, allgemeinste Aenderung desselben I. 106. *135. *140.
Flüssigkeitsreibung I. 159. 163. *172.
Fluorescenz der Netzhaut, der Hornhaut und der Linse II. 74. 77.
Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles I. 233. 251.
— Einfluss der Reibung auf dieselbe I. *383.
— der Elektricität, Fehler in der Messungsmethode I. 461.
— elektrodynamischer Wirkungen I. *629.
— der Reizung in den Nerven II. *764. *844. *932. *939.
Froschschenkel, stromprüfender II. 913.
Froschstrom II. 902.
Functionen eines complexen Arguments I. 153.
Funkendauer I. 630.

Gährung II. *726.
Galvanische Ketten I. 50. II. 894.



Galvanische Ketten, neue Zusammensetzung derselben (Calomel-Elemente) II. 964. 980.
— Kraft, Natur derselben I. 48. 858. 910.
— Werthe (der Metalle) I. 910.
Galvanismus I. *46. *521.
Ganglien II. 663. 675.
Ganglienzellen II. 665.
Gehirnganglien II. 675. 678.
Gehörknöchelchen II. *503. *515.
Gelber Fleck in der Netzhaut II. 53.
— Besichtigung desselben durch den Augenspiegel II. 254.
Geometrie, reeller Sinn derselben II. *640.
— physische und reine II. 648.
— tatsächliche Grundlagen derselben II. *610. *618.
Geometrisch ähnliche Bewegungen flüssiger Körper I. *158.
Geometrischer Ort eines Objects im Sehfeld II. 432.
Geometrische Sätze, Ursprung und Sinn derselben II. *640.
Geschwindigkeitspotential I. 101. 308.
Gesichtseindrücke, Schnelligkeit derselben II. *947.
Gesichtsfeld II. 431.
Gesichtslinien II. 420.
Gleichgewicht der Elektrizität I. 542. 578. 644. 650.
— eines Massensystems I. 26.
Gleichgewichtszustand magnetischer Vertheilung, die zur Herstellung desselben erforderliche Zeit I. 458.
Gleichzeitigkeit des Inducirenden und inducirten Stromes I. 456.
Gleitstellen I. 697. 736.
Gletschertheorie, s. Plasticität des Eises.
Gliakerne II. 663.
Gravitationsconstante als Mittel zur Festsetzung der Zeiteinheit II. 995.
Green'scher Satz, Erweiterung desselben I. 327.
Grenzschichten, elektrische I. *855.
Grün, aus Blau und Gelb nicht mischbar II. 19.
Grünblindheit II. 348.
Grundfarben, s. Farbenmischung und Farbenblindheit.

Hammer (im menschlichen Ohre) II. 533.

Hauptebenen II. 92. 99.
Hauptpunkte II. 92. 99. 104.
Hefe, Natur derselben II. 727.
Helligkeit optischer Bilder II. 143. 192.
— reciproker Bilder II. *134.
— der Zerstreuungskreise II. *126.
Höhenwinkel eines Punktes im Sehfeld II. 436.
Homocentricität eines Strahlenbündels beim Passiren eines Prismas II. 168.
Horizontalhoropter II. 438. 456.
Hornhaut des menschlichen Auges II. 77. 117. 282. 294.
Horopter II. *420. *427. *478. 492.
— seine Bedeutung für das Sehen II. *448.
— seine Form mathematisch dargestellt II. *460.
Horopterkreis II. 424.
Hydrodynamik I. *99. *868.
Hydrodynamische Gleichungen, grosse Annäherung derselben an die Wirklichkeit I. 158.
Hylogene Momente II. 657.

Inducirte Farbe II. 38.

— Zuckung II. 915.
Inductionsapparat zur Erregung von Muskelcontractionen II. 754.
Inductionsgesetz I. *537. *545. *688. *702.
— allgemeiner Form desselben I. 549. *558.
— experimentelle Prüfung desselben I. 554. 599. 700. 711. 762. *774. *791.
— von Weber, Widerspruch desselben mit dem Gesetz von der Erhaltung der Kraft I. 553.
Inductionsgesetze, Geschichte ihrer Aufstellung I. 548.
Inductionsströme, s. Inductionsgesetz und I. 61. 92.
— Dauer und Verlauf derselben I. *429.
Innenwendung des Auges II. 362.
Insecten, Nervensystem derselben II. 673.
Intensität der Lichtempfindung, verschiedenes Gesetz für verschiedene Farben II. 62.

Intensitätsänderung des Schalles durch Reibung I. 384.
Ionen, Wanderung derselben I. 840.
Iris des menschlichen Auges II. 337.
— bei der Accommodation II. 280. 313. 340.
— Entfernung von der Hornhaut II. 307.

Kanten, Flüssigkeitsströmungen an denselben I. 149.

Klang I. 289.
Klangfarbe I. 400.
— bei telephonischer Uebertragung I. *463.
Klangzerlegung I. 287.
Kleidung, Einfluss derselben auf die Abkühlung des Körpers II. 722.
Klirröne, s. Obertöne, unharmische.
— im Ohr II. 561.
Knotenebenen (bei Lichtbrechung) II. 103.
Knotenflächen (bei Luftschwingungen) I. 305. 312. 348.
Knotenpunkte (bei Lichtbrechung) II. 92. 102. 104.
Körperliche Leiter, Stromvertheilung in denselben I. *475.
Kraft, Begriff derselben I. 14. 68.
Kraftäquivalent chemischer Prozesse I. 7. 50. II. *958. *979.
— elektrischer Vorgänge I. 34. *41. 76. 562. 856.
— des Elektromagnetismus I. *58.
— des Magnetismus I. *58.
— bei organischen Prozessen I. *65.
— der Wärme I. 6. *31.
Krebs, Nervensystem desselben II. 663. 671. 676.
Kritische Entfernung (bei der Bewegung zweier elektrischer Massenpunkte) I. 654.
Krystalllinse, Aenderung ihrer Dimensionen II. 336.
— Fluorescenz derselben II. 77.
— Krümmungsradien derselben, s. Accommodation.
— Lichtbrechung in derselben II. 119.
Kugel, elektrische Stromvertheilung in derselben I. 494.
Kugelflächen, Lichtbrechung an denselben II. *83.

Längsschnitt, natürlicher und künstlicher eines Muskels II. 900. 901.
Lebendige Kraft, Erhaltung derselben I. 17.
— Quantität derselben I. 18.
— geordneter Bewegung II. 972.
Leuchten des Auges II. 136. 233. 262.
Licht, Wesen desselben II. 594.
— gradlinige Fortpflanzung desselben II. 596.
Lichtäther, Magnetisirbarkeit desselben I. 556.
Lichtempfindung II. 593.
— Intensitätsänderung derselben abhängig von der Farbe II. 62.
Lichtgeschwindigkeit als Normalmaass für die Länge II. 996.
Lichttheorie, magnetische und elektrische I. 556.
Linse des menschlichen Auges, s. Krystalllinse.
Linsen, verschiedene Arten derselben II. 111.
Luftballons, Lenkbarkeit derselben I. *158.
Luftperspektive II. 457.
Luftreibung bei Schallbewegung I. *383.
Luftschwingungen, Bericht über verschiedene dieselben betreffenden Arbeiten I. 233.
— in offenen Röhren I. *303.

Maasssysteme, absolute für elektrische und magnetische Grössen II. *993.

Magnetismus I. 58. 556. 611. *798.
Mannigfaltigkeit, n-fach ausgedehnte II. 611.
Maschinen, einfache, s. mechanische Potenzen.
Materia, Begriff derselben I. 14. 68.
Mechanische Potenzen I. 28.
— Theoreme in Beziehung zur Erhaltung der Kraft I. 27.
Mehrfach zusammenhängender Raum I. 103.
Membran, gespannte II. 578.
— gekrümmte, Mechanik derselben II. 575.
Meridiane im Sehfeld II. 432.
Meridiane des Auges II. 420.
Messung kleiner Zeittheile I. 429. 438. II. *764. *844. *862.



Metamathematische Untersuchungen II. *610. *618. *640.
Mikroskope, Grenze ihrer Leistungsfähigkeit II. *183. *185.
— Beugungserscheinungen in denselben II. 198.
— Normalvergrößerung derselben II. 195.
— Penetration derselben II. 186.
Minimum der Ablenkung im Prisma, sein Einfluss auf die Homocentricität der Strahlen II. 173.
Mittlere Schrägung II. 493.
Molckel, peripolar elektromotorische II. 906.
— dipolar elektromotorische II. 910.
Mollusken, Nervensystem derselben II. 666.
Moment einer elektrischen Doppelschicht I. 490. 856.
Monodromie des Raumes II. 624.
Multiplier, Kräfte, welche seine Ablenkung bewirken II. 750.
Muskelaction, Wärmeentwicklung bei derselben II. 745.
Muskelbündel, Aquator und Pole desselben II. 900.
Muskelgeräusch oder Muskelton II. 513. *924. *928.
Muskelmechanik (des Armes) II. *955.
Muskeln, Structur derselben II. 897.
— Längs- und Querschnitte derselben II. 900.
— Stoffverbrauch in denselben II. *735.
Muskelstrom I. 513. II. 902. 908.
Muskelzuckungen, Verlauf derselben II. *764. *881.
Myographion II. 766. *844.

Nachbilder, positive, Dauer derselben II. 947.
— benutzt zur Bestimmung der Augenbewegungen II. 376.
Naturwissenschaft, Aufgabe und Ziel derselben I. 13.
Nerven, Structur derselben II. *663. 897.
— motorische und sensible II. 887.
— Wärmeentwicklung in denselben II. 758.
Nervenfasern II. 663. 674. 898.
Nervenkittsubstanz II. 663.

Nervenreizung, Fortpflanzungsgeschwindigkeit derselben II. *764. *844. 872. *932. *939.
Nervenstrom, s. Muskelstrom.
Nervensystem II. 887.
— der Wirbellosen II. *663.
Netzhaut, künstliche Beleuchtung derselben II. 230.
— Besichtigung derselben vermittels des Augenspiegels II. 253. 268.
— Bilder auf derselben objectiv sichtbar II. 253.
— Empfindlichkeit derselben für ultraviolette Strahlen II. 55. *71.
— Fluoreszenz derselben II. 74.
— lichtempfindende Theile derselben II. 257.
Netzhauthorizont II. 362.
Netzhautpunkte, identische II. 420.
Neuroglia II. 663.
Newton's Axiome I. 68.
Normalform des mathematischen Ausdrucks für die Energie I. 802.
Normalvergrößerung eines Mikroskopes II. 195.

Oberflächenspannung des Quecksilbers I. *925.
Obertöne der Stimmgabeln I. 257. 270.
— unharmonische I. 257. 270.
„Objectiv“ im Gegensatz zu „reell“ II. 655.
Occlusion der Gase durch Metalle, s. Polarisation, galvanische.
Ohr, Bau desselben II. *503. *515.
Ophthalmometer II. *286.
Optik, physikalische II. *1.
— physiologische II. *227.
Optische Länge eines Lichtstrahles II. 148.
Orgelpfeifen I. 242. *303. 385.
Oscillationen, elektrische I. 527. *531. 633.

Parallelogramm der Kräfte I. 68.
Parelektronische Schicht II. 904.
Peltier'sches Phänomen I. 57.
Pendelmvographion II. 940.
Penetration der Mikroskope II. 186.
Peripolar elektromotorische Molekeln I. 514. II. 906.
Persönliche Gleichung II. 683.

Phasenänderung bei Uebertragung elektrischer sinusoider Schwingungen durch Induction, s. Telefon.
Physik, Aufgabe derselben I. 13.
Physiologie II. *661.
Pigmentfarben im Unterschied von Spectralfarben II. 16.
Plasticität des Eises I. *94.
Polaristanz im Gesichtsfeld II. 421.
Polarisation, dielektrische und magnetische I. 556. 611. *798.
— galvanische I. 49. *823. *835. *899. *925.
Pole eines Muskelbündels II. 900.
Ponderomotorische Kräfte, ausgeübt von Leitern elektrischer Ströme I. *702.
Potential, elektrostatisches und elektrodynamisches I. 642.
— eines Körpers auf sich selbst I. 42. 59. 74. 76. 488.
— zweier Stromelemente aufeinander I. 549. 567. 637.
— zweier elektrischer Massen nach Weber I. 554.
— für continuirlich im Raume verbreitete elektrische Ströme I. 550. 568.
Potentialgesetz, elektrodynamisches, s. Inductionsgesetz.
— elektrodynamisches, die aus ihm sich ergebenden Kräfte I. 695. 707.
Potenzen, mechanische I. 28.
Primärstellung des Auges II. 356. 374.
Prinzip der leichtesten Orientierung im Gesichtsfeld II. 363. 396.
— der schnellsten Ankunft (eines Lichtstrahles) II. 149.
— von den elektromotorischen Oberflächen I. 481.
— der Superposition elektrischer Ströme I. 476.
Prisma, Brechung in demselben II. 164.
Prismatische Bilder I. *147.
— scheinbare Breite derselben II. *176.
Projection, binoculare II. *492.
— des gedrehten Auges II. *482.
Pseudosphärische Geometrie II. 617. 643. 652.
Punkthoropter II. 439. 470.
Punktkräfte, s. Centralkräfte.
Pupille, Beugungserscheinungen in derselben II. 32.

Purpur, Vorkommen im Spectrum II. 54.
Pythagoräischer Lehrsatz, allgemeinste Form desselben II. 612. 620.

Quantität der lebendigen Kraft I. 18.
Querschnitt, natürlicher und künstlicher, eines Muskels II. 900.

Raddrehung des Auges II. *360. *482.
Radialhoropter II. 421.
Radialströmungen der Elektrizität in einer leitenden Kugel I. 585.
Raum, n-fach zusammenhängender I. 103.
Raumanschauung II. 641.
Reciprocität der Wirkung elektromotorischer Flächenelemente I. 496.
Reciprocitätsgesetz bei Luftwellen I. 333.
Reciprocitätsgesetze bei der Brechung der Lichtstrahlen II. 136. 138.
Reciproke Bilder, Helligkeit derselben II. *134.
Reducirte Länge einer Orgelpfeife I. 311. 358.
„Reell“ im Gegensatz zu „objectiv“ II. 655.
Reflexgeschwindigkeit II. *881.
Reflexion des Lichtes an Glasplatten II. 237. *259.
Regelation, s. Plasticität des Eises.
Reibung in Beziehung zur Erhaltung der Kraft I. 32.
— Darstellungsart ihrer Theorie I. 647.
— Einfluss derselben auf die Schallgeschwindigkeit I. *383.
— von Flüssigkeiten I. 159. 163. *172.
Reibungselektrizität I. 41. 860.
Reibungsströme I. 864.
Resonanz bei Orgelpfeifen I. 313. 351.
Resonatoren I. 372. 404.
Rippen, Bewegung derselben II. *933.
Rotation, s. Wirbelbewegung.
— Zusammensetzung derselben II. 370.
Rothblindheit II. 348.



Saite, belastete I. 273.
Saitenschwingungen I. 234. 287.
Sammellinsen II. 114.
Sammelnde Flächen II. 89.
Sanson'sche Bildchen II. 308. 320.
345.
Schallbewegung I. *231.
Schallgeschwindigkeit I. 233. 251.
*383.
Schallstrahlen, Brechung derselben I. 255.
Schallwellen, Brandung derselben I. 239. 253.
Scheinbarer Ort eines Objectes im Sehfeld II. 432.
Schiffahrt I. 164. 167.
Schnecke des Ohres II. *582.
Schnecken, Nervensystem derselben II. 667.
Schnelligkeit der Gesichtseindrücke II. *947.
Schwebungen, Verwendung derselben zum Nachweis von Tönen I. 278.
Schwingungen einer elastischen Flüssigkeit (Bericht über verschiedene Arbeiten) I. 233.
— in offenen Röhren I. *303.
— von Stäben I. 234.
Schwingungsbäume I. 312.
Secundäre Zuckung II. 881. 915.
Sehfeld II. 431.
Sehnerv, Eintritt desselben in die Retina, objectiv sichtbar II. 253.
Sinnesempfindungen II. *591.
Sirene von Dove I. 262. 284.
Spannkraft I. 22.
Spannungsreihe, elektrische I. 47. 858.
Spectralfarben, Zusammensetzung derselben II. *3. *45.
Spectrum, Benennung der einzelnen Theile desselben II. 49.
— Farbe an den Enden desselben II. 54.
— Helligkeit desselben II. 179.
— Reinheit desselben II. 178.
— Sichtbarkeit seiner Enden I. *71.
Sphärischer Raum II. 643.
Spinnen, Nervensystem derselben II. 673.
Spirale, Condensatorwirkung derselben I. 535.
Stationäre reibende Strömung I. *223.
Statische Elektrizität I. 41. 860.
Steigbügel II. 552.

Stereoskopisches Sehen II. 457. *484.
*492. *497.
Stimmungsgabeln I. 257. 268.
Stimmung, reine, praktische Ausführung derselben I. 423.
— temperirte I. 420.
Stoffverbrauch in den Muskeln II. *735.
Stoss unelastischer Körper I. 31.
Strahlenbündel, astigmatisches II. 159.
— unendlich dünnes II. 155.
Ströme, radiale elektrische in einer leitenden Kugel I. 585.
Strömung in Röhren von ringförmigem Querschnitt I. 878.
Strom, polarisirender und depolarisirender I. 823.
Stromprüfer des Froschschenkel II. 913.
Stromvertheilung (elektrische) in einer Kugel I. 494.
— (elektrische) in körperlichen Leitern I. *475.
Summationstöne I. 282.
Summe der Spannkraft I. 22. II. 965.
Superposition elektrischer Ströme I. 476.

Tachistoskop II. 948.
Talbot'sche Linien II. 78.
Tangentenboussole, excentrische Aufhängung der Nadel II. 777.
Tapetenbilder II. 499.
Telephon I. *463.
Telestereoskop II. *484.
Temperatur, musikalische I. *420.
Temperaturerhöhung bei Muskelaction II. *745.
— bei Verdichtung II. 701.
Thatsachen der Geometrie II. *610. *618. *640.
Thermodynamik chemischer Vorgänge II. *958. *979.
Thermoelektrische Ströme I. 57.
Thermoelektrisches Element für physiologische Versuche II. 748.
Thierische Elektrizität I. 513. II. *886.
— Wärme I. 4. 65. II. *680. *745.
— Ursprung derselben II. 695. *745.
Töne ohne Obertöne, s. einfache Töne.
Ton I. 289.

Ton stärkster Resonanz I. 346.
Tonleiter, arabisch-persische I. *424.
Topogene Momente II. 657.
Totalhoropter II. 422.
Transformation (bei elektrischen Vertheilungen) durch eine Kugel I. 520.
Trägheitsmoment, Bestimmung desselben I. 182.
Trennungsfläche, s. Wirbelfläche.
Trommelfell II. 525. 565.
— Schwingungen desselben I. 261. 296. II. 575.
Trommelhöhle II. *503. *515.
Trübung der Augenmedien II. 32.

Ultraviolett, Sichtbarkeit desselben II. 55. *71.
Ultraviolettes Licht, Messung der Wellenlänge desselben II. *78.
Unipolare Strömungen der Elektrizität II. 760.

Verbrennungswärme I. 9. II. 703.
Verticalhoropter II. 439. 467.
Violine, Benutzung zur Erzeugung von Combinationstönen I. 277.
Violasaiten, Schwingungen derselben I. *410.
Visirebene II. 353. 361. 420. 432.
Visirlinie II. 432.
Vocale I. *395. *397. *408.
Vogelflug I. 165. 166.
Vorstellbarkeit II. 644.

Waage, elektrodynamische I. *922.
Wärme, thierische I. 3. 65. II. *680.
— Wesen derselben I. 7. II. 696.
Wärmeäquivalent, s. Kraftäquivalent.

Wärmeentwicklung bei der Muskelaction II. *745.
Wärmethorie, mechanische, Folgerungen aus derselben I. *840. II. *958. *979.
Weiss, Abhängigkeit seines Farbentones von der Intensität II. 63.
Wellen, elektrische I. 554. 599.
— nicht divergirende I. 237.
Wellenbewegung I. 28. 267. II. 518.
Wellenfläche der Lichtstrahlen II. 153.
Wellenlänge der sichtbaren Enden des Spectrums II. *78.
Wippe für schnell aufeinander folgende Schliessung und Oeffnung galvanischer Ströme I. 438.
Wirbelbewegung I. *101.
Wirbelfäden I. 102.
Wirbelfläche I. 121. *146.
Wirbellinien I. 102.
Wirbellose, Nervensystem derselben II. *663.
Wirbelring I. 127.

Zeitmessungsmethode mittels des Galvanometers I. 429. 455. II. 767. 870.
— mittels des Myographions II. 766.
— von W. Siemens II. 865.
Zerstreuende Flächen II. 89.
Zerstreuungskreise II. *126.
Zerstreuungslinsen II. 115.
Zitterraale und Zitterrochen II. 915.
Zuckung, inducirte oder secundäre II. 881. 915.
Zungen, einschlagende und ausschlagende I. 389.
Zungenpfeifen I. *388.
Zusammengesetzte Farben II. *3. *45.



Druckfehlerverzeichnis.

Band I.

- S. V, Z. 8 v. u. ist hinter a/b einzuschalten: anzuwenden.
S. VII, Z. 14—17 v. o. muss stehen J. Bertrand statt S. Bertrand.
S. 5, Z. 15 v. o. muss stehen Williams statt William.
S. 51—54 muss mehrfach stehen Poggendorff statt Poggendorff.
S. 83, Z. 3 v. u. muss stehen $X = \frac{dL}{dx_1}$ statt $X = \frac{dL}{dx_2}$.
S. 108, Z. 13 v. o. muss stehen $\frac{dv}{dz} - \frac{dw}{dy} = 2\xi$ statt $\frac{dv}{dz} - \frac{dw}{dy} = 2\xi$.
S. 135, Z. 3 u. 5 v. o. }
S. 140, Z. 3 v. o. } muss stehen J. Bertrand statt S. Bertrand.
S. 145, Z. 2 v. o. }
S. 256, Z. 12 v. o. muss stehen G. S. Ohm statt M. Ohm.
S. 302, Z. 1 v. u. muss stehen beschreiben statt schreiben.
S. 523, Z. 18 v. o. muss stehen Liouville statt Lionville.
S. 538, Z. 3 v. o. muss stehen Cl. Maxwell statt A. Maxwell.
S. 568 muss in der Gleichung (1a) stehen $d\xi \cdot d\eta \cdot d\zeta$ statt $d\xi \cdot d\eta \cdot d\zeta$. In der folgenden Zeile ist der Punkt vor r^2 auf der linken Seite der Gleichung zu löschen.
S. 570, Gl. (2c) muss heissen
$$\psi = \int r \frac{dE}{dt} \cdot d\xi \cdot d\eta \cdot d\zeta$$
 statt $\psi = \int r \frac{dE}{dt} \cdot d\xi \cdot d\zeta \cdot d\zeta$.
S. 765, Z. 3 v. u. muss stehen $i \cdot j \cdot ds \cdot d\sigma \cdot \frac{\cos s}{r^2}$ statt $i \cdot j \cdot ds \cdot d\sigma \cdot \frac{\cos s}{r_2}$.
S. 766, Z. 6 v. o. muss stehen $i \cdot j \cdot ds \cdot d\sigma \cdot \frac{\sin s}{r}$ statt $i \cdot j \cdot ds \cdot d\sigma \cdot \frac{\sin s}{r}$.
S. 870, Z. 3 v. u. muss stehen $q - \frac{4\pi k^2 Q}{J\sigma} u_1 = C - \frac{J\sigma}{Q} \cdot x + by + cz$
statt $q - \frac{4\pi k^2 Q}{J\sigma} u_1 = C - \frac{\sigma J}{Q} + by + cz$.
S. 932, Z. 11 v. u. muss stehen $dW = T \cdot d\omega + (p_m - p_f - k_m + k_f) \cdot d(\omega \varepsilon)$
statt $dW = T \cdot d\omega + (p_m - p_f - k_m + k_f) \cdot d(\omega \varepsilon)$.

Band II.

- S. 14 in der Anmerkung muss stehen LI statt LII.
S. 46, Z. 14 v. u. muss vor Fig. 2 eingeschaltet werden: Tafel I.
S. 58, Z. 26 v. o. muss stehen Hundertmillionentheile statt Millionentheile.
S. 82 in der zweiten Zeile der Tabelle muss stehen G statt g.
S. 93, Z. 16 v. o. muss stehen $P_2 t$ statt $q P_2$.
S. 97, Z. 20 v. o. muss stehen Ebene statt Linie.

Druckfehlerverzeichnis.

1021

- S. 99, Z. 9 v. o. muss stehen $H_1 = \frac{M_1 L_1}{M_1 + L_2}$ statt $H_1 = \frac{H_1 L_1}{M_1 + L_2}$.
S. 103, Z. 15 v. o. muss stehen $n_1 \gamma_1 = n_{m+1} \cdot \gamma_{m+1}$ statt $n_1 \gamma_1 = n_m \cdot \gamma_m$.
S. 103, Z. 27 v. o. muss stehen $\gamma_{m+1} = \frac{n_1}{n_{m+1}} \cdot \gamma_1$ statt $\gamma_{m+1} = \frac{n_m+1}{n_1} \cdot \gamma_1$.
S. 105 in den letzten drei Formeln und } muss stehen f_2 statt f_2
S. 106 in der ersten Formel } und β_1 statt β' .
S. 243, Z. 8 v. u. }
S. 249, Z. 9 v. o. } muss stehen Tafel IV statt Tafel I.
S. 283, Z. 3 v. o. muss stehen Bd. I. Abth. 2. S. 1—74. 1855 statt Bd. II. S. 1—74. 1856.
S. 337, Z. 14 v. o. muss stehen $n^2 = 1/m$ statt $n_2 = 1/m$.
S. 349, Z. 15 v. o. muss stehen Grünblau statt Grüngelb.
S. 398 Gl. (5a) muss heissen
$$\int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^{2\pi} d\beta \int_0^{2\pi} d\gamma \cdot \rho^2 \sin \alpha = R$$
 statt $\int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^{2\pi} d\beta \int_0^{2\pi} d\gamma \cdot \rho^2 \sin \alpha = R$.
S. 423 Gl. (2) das erste Glied in der zweiten Zeile muss heissen
$$\frac{r_1 - r_2}{2 \cdot \sin \alpha} \cdot y$$
 statt $\frac{r_1 + r_2}{2 \cdot \sin \alpha} \cdot y$.
S. 614, Z. 12 v. u. muss stehen $n(n+1)/2$ statt $n(n-1)/2$.
S. 617, Z. 2 v. o. muss stehen 1869 statt 1868.
S. 637, Z. 1 v. u. muss stehen 617 statt 618.
S. 647 und 650 muss in den Anmerkungen stehen A. Krause („Kant und Helmholtz“, Lahr 1878) statt Krause (l. c.).
S. 727, Z. 13 und 18 v. u. muss stehen Schwann statt Schwan.
S. 749, Z. 5 und 6 v. o. muss stehen Tafel I statt Tafel IV.
Z. 17 v. u. muss stehen Fig. 15 statt Fig. 2.
S. 844, Z. 5 v. o. muss stehen: (Hierzu Tafel II).
S. 862, Z. 6 v. u. muss stehen S. 1—21 statt S. 1—24.
S. 967, Z. 18 v. o. muss stehen $\int \frac{dQ}{\theta} = 0$ statt $\int \frac{dQ}{\theta} \cdot d\theta = 0$.

Bezüglich der in der Bezeichnung der Tafeln vorgekommenen Irrthümer vergleiche man den am Anfang dieses Bandes auf Seite VII befindlichen Nachweis zu den Figurentafeln.



Verlag von JOH. AMBR. BARTH in Leipzig.

H. Helmholtz
Wissenschaftliche Abhandlungen.

Erster Band.

938 Seiten. gr. 8°. Mit Portrait und 3 lith. Tafeln. M. 20.—

Inhalt.

Zur Lehre von der Energie: Bericht über die Theorie der physiologischen Wärmeerscheinungen für 1845. — Ueber die Erhaltung der Kraft. — Erwiderung auf die Bemerkungen von Hrn. Clausius. — Ueber Eigenschaften des Eises. — Hydrodynamik: Ueber Integrale der hydrodynamischen Gleichungen, welche den Wirbelbewegungen entsprechen. — Sur le mouvement le plus général d'un fluide. — Sur le mouvement des fluides. — Réponse à la Note de M. S. Bertrand du octobre. — Ueber discontinuirliche Flüssigkeitsbewegungen. — Ueber ein Theorem, geometrisch ähnliche Bewegungen flüssiger Körper betreffend, nebst Anwendung auf das Problem, Luftballons zu lenken. — Ueber Reibung tropfbarer Flüssigkeiten. — Zur Theorie der stationären Ströme in reibenden Flüssigkeiten. — Schallbewegung: Bericht über die theoretische Akustik betreffenden Arbeiten im Jahre 1848 und 1849. — Ueber Combinationstöne. — Theorie der Luftschwingungen in Röhren mit offenen Enden. — Ueber den Einfluss der Reibung in der Luft auf die Schallbewegung. — Zur Theorie der Zungenpfeifen. — Ueber die Vocale. — Ueber die Klangfarbe der Vocale. — Ueber Klangfarben. — Ueber die Bewegung der Violinsaiten. — Ueber musikalische Temperatur. — Ueber die arabisch-persische Tonleiter. — Elektrodynamik: Ueber die Dauer und den Verlauf der durch Stromesschwankungen inducirten Ströme. — Telephon und Klangfarbe. — Ueber einige Gesetze der Vertheilung elektrischer Ströme in körperlichen Leitern mit Anwendung auf die thierisch-electrischen Versuche. — Ueber eine allgemeine Transformationsmethode der Probleme über elektrische Vertheilung. — Ueber die physiologische Wirkung kurzdauernder elektrischer Schläge im Innern von ausgedehnten leitenden Massen. — Ueber elektrische Oscillationen. — Ueber die Gesetze der inconstanten elektrischen Ströme in körperlich ausgedehnten Leitern. — Ueber die Theorie der Elektrodynamik. Erste Abhandlung. — Ueber die Bewegungsgleichungen der Elektrizität für ruhende leitende Körper. — Ueber die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrodynamischen Wirkungen. — Ueber die Theorie der Elektrodynamik. Zweite Abhandlung. — Vergleich des Ampère'schen und Neumann'schen Gesetzes für die elektrodynamischen Kräfte. — Ueber die Theorie der Elektrodynamik. Dritte Abhandlung. — Kritisches zur Elektrodynamik. — Versuche über die im



Verlag von JOH. AMBR. BARTH in Leipzig.

ungeschlossenen Kreise durch Bewegung inducirten elektromotorischen Kräfte. — Bericht betreffend Versuche über die elektromagnetische Wirkung elektrischer Convection, ausgeführt von Hrn. Henry A. Rowland. — Ueber die auf das Innere magnetisch oder dielektrisch polarisirter Körper wirkenden Kräfte. — **Galvanismus:** Ueber galvanische Polarisation in gasfreien Flüssigkeiten. — Bericht über Versuche des Hrn. Dr. Root aus Boston. — Ueber galvanische Ströme, verursacht durch Concentrationsunterschiede; Folgerungen aus der mechanischen Wärmetheorie. — Studien über elektrische Grenzschichten. — Ueber Bewegungsströme an polarisirten Platina. — Eine elektrodynamische Wage.

W. R. Hamilton Elemente der Quaternionen

Deutsch von
Paul Glan
Docent für Physik an der Universität Berlin.

Erster Band.
XXIV, 746 Seiten. gr. 8°. Mit Figuren. In engl. Leinenband. Preis M 20.—
Complet in zwei Bänden.

Julius Thomsen Professor der Chemie an der Universität Kopenhagen Thermochemische Untersuchungen

Erster Band:
Neutralisation und verwandte Phänomene.

XII, 450 Seiten. gr. 8°. Mit 5 Tafeln. 1882. M 12.—

Zweiter Band:
Metalloide.

XIV, 506 Seiten. Mit 1 Tafel. 1882. M 12.—

Der III. Band wird die Metalle, der IV. die organischen Verbindungen behandeln.

Heirholts ges. Abhandlungen II Bd. N^o LI und N^o LXXXIV

Taf. I

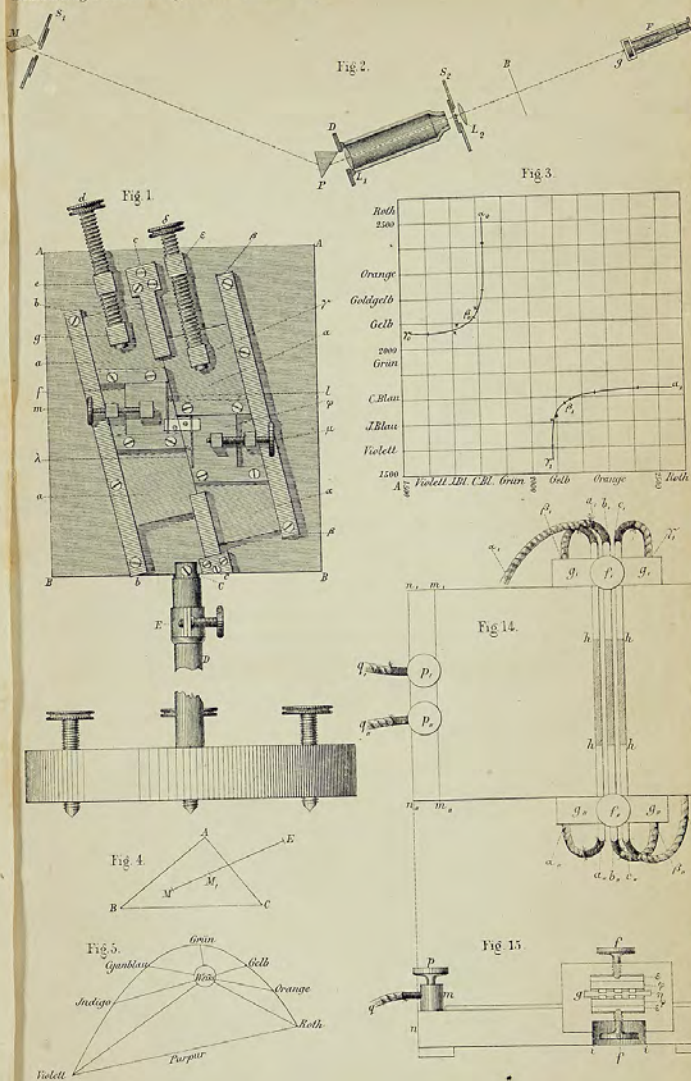




Fig. 2.

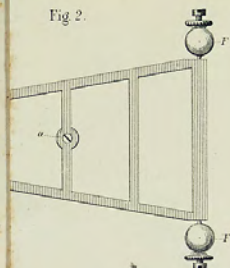


Fig. 4.

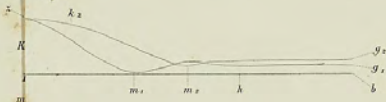


Fig. 5.



Fig. 6.



Fig. 7.



Fig 1.

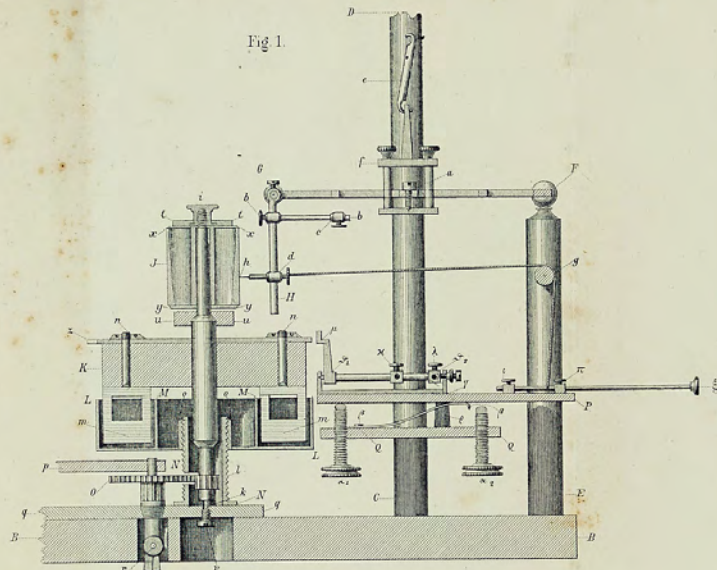


Fig 3.

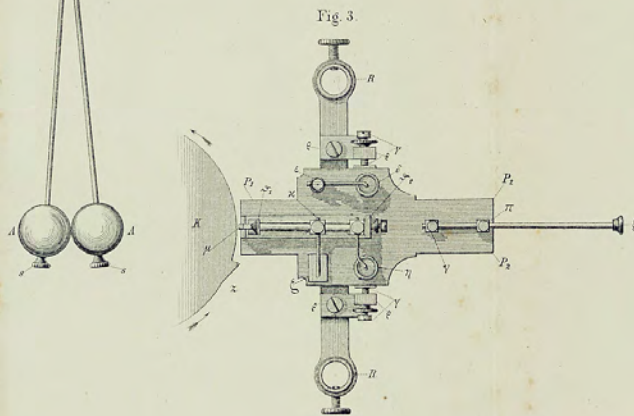


Fig 2.

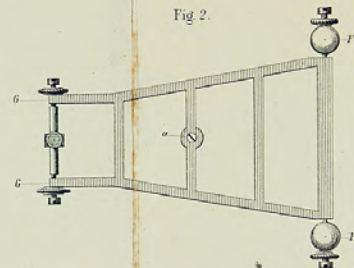


Fig 4.

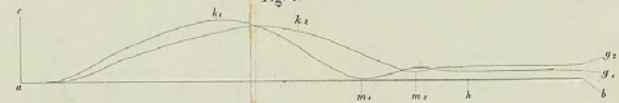


Fig 5.

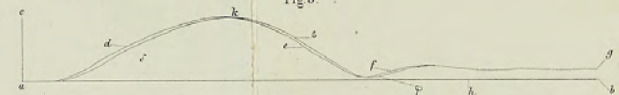


Fig 6.

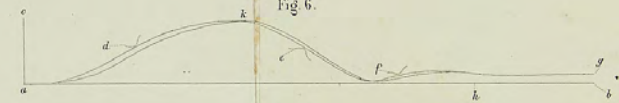
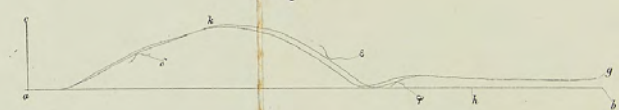


Fig 7.



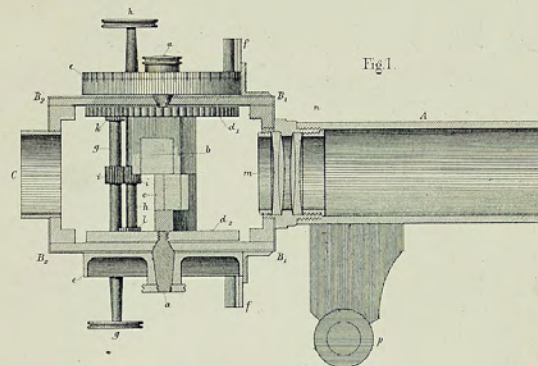


Fig. 1.

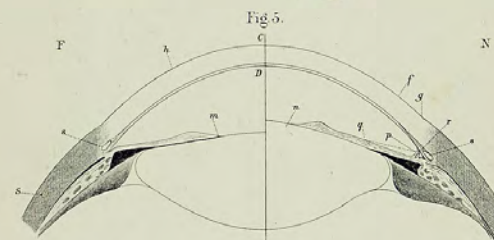


Fig. 5.



Fig. 2.



Fig. 3.

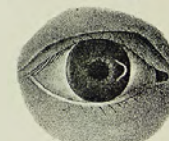
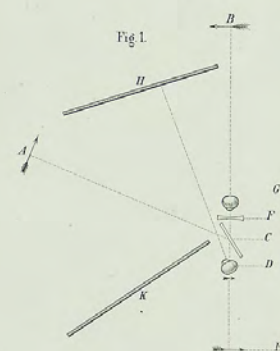
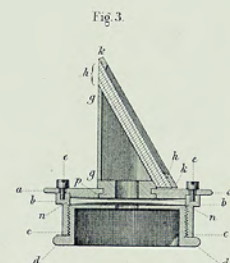
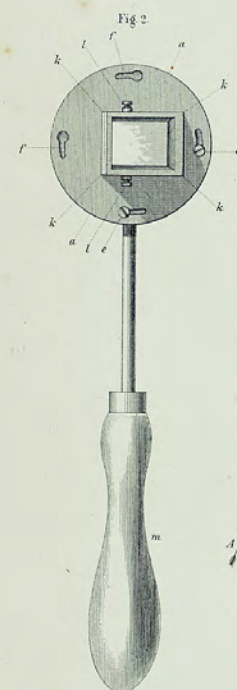
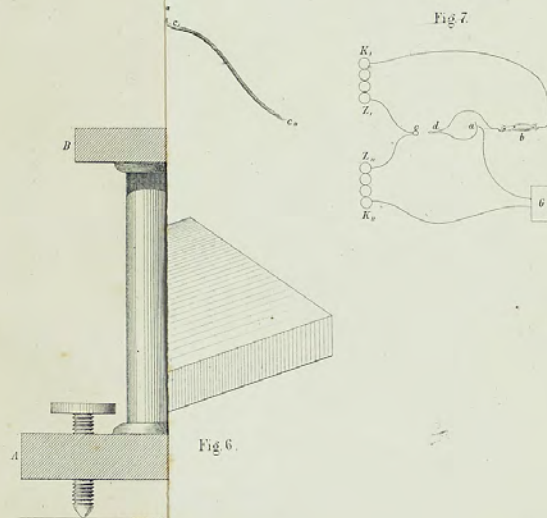
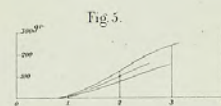
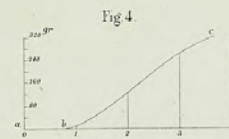
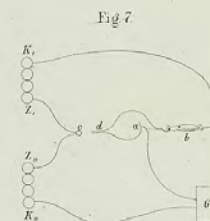
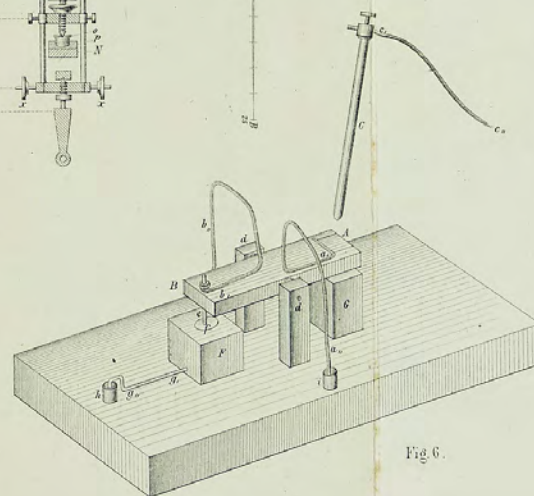
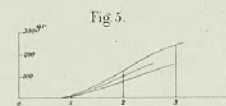
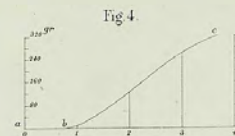
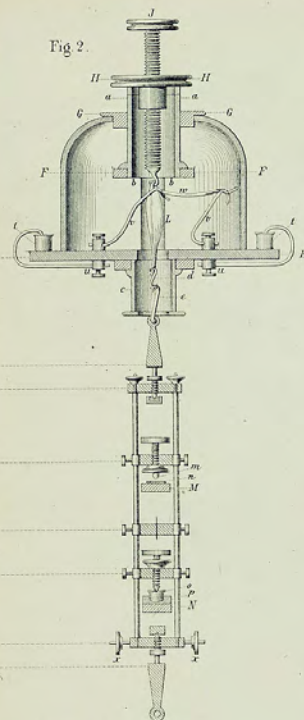
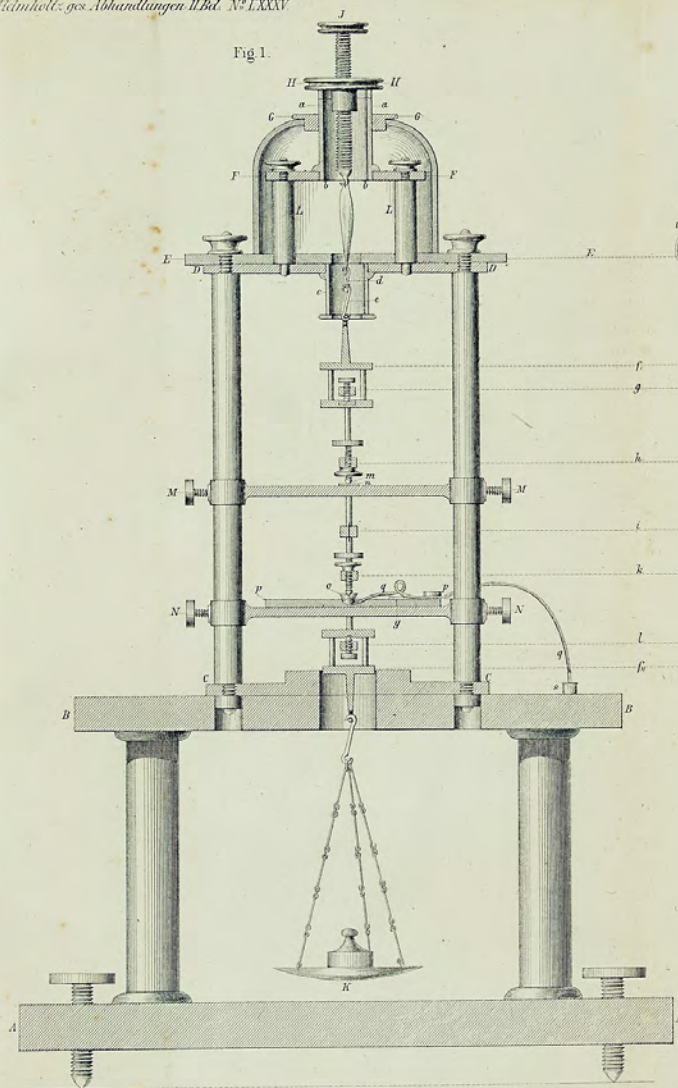


Fig. 4.







貴重書

