

welche Zahl mit der Atomwärme anderer Metalle auf das befriedigendste übereinstimmt. Man wird daher für die Oxyde des Cers die Formeln



annehmen müssen.

Heidelberg, den 8. März.

---

#### **IV. *Versuche über die im ungeschlossenen Kreise durch Bewegung inducirten elektromotorischen Kräfte; von H. Helmholtz.***

(Aus d. Monatsberichten d. Akad. Juni 1875.)

---

Ich habe der Akademie zu wiederholten Malen Bericht erstattet über die Ergebnisse meiner Untersuchungen, die sich auf die Theorie der Elektrodynamik bezogen. Ich hatte bei diesen Untersuchungen das Ziel verfolgt zu ermitteln, in wie weit diejenigen der bekannteren Theorien, welche überhaupt bestimmte und genaue quantitative Rechenschaft von den elektrodynamischen Phänomenen geben, mit dem Gesetz von der Erhaltung der Kraft in Uebereinstimmung sind, und wie weit sie übereinstimmende Folgerungen betreffs der beobachtbaren Erscheinungen geben, beziehlich unter welchen Bedingungen Abweichungen zwischen ihnen auftreten. Es erschien namentlich wünschenswerth solche Fälle der Abweichung herauszufinden, bei denen ausführbare Versuche für oder gegen die Folgerungen aus der einen oder anderen Theorie entscheiden konnten, um so über die Zulässigkeit dieser Theorien selbst eine Entscheidung zu gewinnen.

Genau quantitativ ermittelt waren bisher fast nur die Wirkungen der in geschlossenen leitenden Kreisen ver-

laufenden Ströme und der auf solche wirkenden elektromotorischen und ponderomotorischen Kräfte elektrodynamischen Ursprungs. Die Magnete wirken dabei ebenfalls wie Systeme geschlossener elektrischer Ströme. Die gegenseitigen Einwirkungen solcher Ströme sind verhältnißmäßig stark und dauernd, und deshalb mit den uns zu Gebote stehenden Hilfsmitteln leicht und genau zu beobachten. Auch war schon eine Reihe von solchen Fällen experimentell untersucht worden, wo die Stromleiter zwar unterbrochen waren durch die dünne isolirende Schicht eines Condensators oder einer Leydener Flasche, aber immer nur unter Bedingungen, wo die elektrodynamische Wirkung der Unterbrechungsstelle gegen die der übrigen Theile der Leitung verschwand.

Die Grundlage aller quantitativ bestimmten Formulierungen der elektrodynamischen Gesetze findet sich ursprünglich in Ampère's glücklichen Gedanken die Fernwirkung eines geschlossenen linearen Stromleiters gleichzusetzen den magnetischen Fernwirkungen einer imaginären durch den Stromleiter begränzten Fläche, deren Flächeneinheiten ein der Stromstärke proportionales magnetisches Moment haben. Diese Darstellung des Wirkungsgesetzes faßte in der That nur beobachtete Erscheinungen zusammen, ohne hypothetische Elemente hinzuzufügen. Ihre Uebereinstimmung mit den Thatsachen können wir als vollkommen gewährleistet durch eine große Anzahl der mannigfaltigsten Versuche und Messungen betrachten. Da die magnetischen Anziehungen und Abstößungen auf ein Potential zurückgeführt werden können, so konnte dies auch für die ponderomotorischen Wirkungen geschlossener Ströme auf einander geschehen.

Die Gesetze der inducirten Ströme bei Bewegung der Leiter ergaben sich aus denen der ponderomotorischen Kräfte mittels des von Lenz und Joule aufgestellten Gesetzes, wonach diese Ströme immer der Bewegung, durch welche sie hervorgerufen sind, entgegenwirken, und wonach ihre elektromotorische Kraft andererseits gleich

Null ist bei solchen Bewegungen, wo die Arbeit der ponderomotorischen Kräfte zwischen dem inducirenden und dem von einem constanten Strome durchflossenen inducirten Leiter gleich Null wäre. Für die Induction durch Aenderung der Stromstärke liefs sich der Werth herleiten aus der Beobachtung, dafs der gesammte Inductionsstrom (sein Zeitintegral) bei Oeffnung des inducirenden Stromes ebenso grofs ist, wie bei der Ueberführung seines Leiters in unendliche Entfernung.

Aus diesen Thatsachen, die durch alle Beobachtungen der Folgezeit nur bestätigt worden sind, leitete Hr. F. E. Neumann sein bekanntes Gesetz für die Gröfse der inducirten elektromotorischen Kräfte her; indem er das Ampère'sche Gesetz als den quantitativen Ausdruck für die ponderomotorischen Kräfte zu Grunde legte. So weit also dieses durch Beobachtungen wirklich bestätigt war, so weit galten auch die daraus abgeleiteten Gesetze der inducirten elektromotorischen Kräfte. Dieses durch Beobachtungen gesicherte Gebiet umfafste aber, wie gesagt, nur die gegenseitige Wirkung geschlossener Ströme.

Nun lag es aber in der Natur der Sache, dafs man bei den Wirkungen, die ein so zusammengesetztes und variables Gebilde, wie ein elektrischer Stromkreis hervorbringt, nicht stehen bleiben konnte. Man mußte versuchen, die Wirkungen des Ganzen in die Wirkungen seiner einzelnen Elemente aufzulösen. Ausserdem existiren Bewegungen der Elektrizität bekanntlich auch in nicht zum Kreise geschlossenen Leitern, und solche haben unzweifelhaft elektrodynamische Wirkungen. Festgestellt ist die Existenz solcher Wirkungen wenigstens schon für die beinahe zum Kreise geschlossenen Entladungsdrähte der Leydener Flaschen. Solche geben elektromagnetische Ablenkungen der Magnetnadel und inducirte Ströme, sogenannte Nebenströme. Aber schon an diesen gaben sich die grofsen Schwierigkeiten, mit denen die Beobachtung der Wirkungen so flüchtiger Ströme verknüpft ist, zu erkennen.

Sobald man aber den Versuch macht aus der Wirkung der geschlossenen Stromkreise Rückschlüsse zu ziehen auf die Wirkungen, welche die einzelnen Theile dieser Stromkreise auf einander ausüben, ist man gezwungen Hypothesen zu machen, für welche bisher die experimentelle Prüfung fehlte.

Von den verschiedenen elektrodynamischen Theorien, welche seit Ampère's Arbeiten aufgestellt worden sind, mußte man vor allen Dingen verlangen, daß sie in Bezug auf die gegenseitigen Wirkungen geschlossener Ströme auf einander Folgerungen geben, die mit Ampère's Theorie und den von Neumann senior daraus hergeleiteten Inductionsgesetzen übereinstimmen, weil die Uebereinstimmung der letzteren mit den Thatsachen hinreichend verbürgt erschien. Eine Theorie, welche das nicht leistete, konnte überhaupt nicht gebraucht werden. In der That entsprechen nun aber dieser Forderung Theorien sehr verschiedener Art, von denen ich hier nur 1) Ampère's Annahme anziehender oder abstoßender Kräfte zwischen den Stromelementen, 2) Faraday's und Graßmann's Annahme von Kräften, welche immer senkrecht gegen das Stromelement wirken, 3) Hrn. F. E. Neumann's Potentialgesetz, 4) Hrn. W. Weber's Annahme anziehender oder abstoßender Kräfte zwischen den Elektricitäten selbst, deren Größe nicht bloß von der Entfernung, sondern auch von der Geschwindigkeit und Beschleunigung abhängig ist, 5) eine ähnliche Annahme von Gauß's, die nachher Riemann wieder aufgenommen hat, mit etwas abweichender Form des Gesetzes, ferner 6) Hrn. C. Neumann's Annahme eines sich mit meßbarer Geschwindigkeit im Raum ausbreitenden Potentials, und endlich 7) Hrn. Cl. Maxwell's Zurückführung der elektrodynamischen Wirkungen auf magnetische und dielektrische Polarisation des raumfüllenden Aethers, welche eine mathematische Durcharbeitung Faraday'scher Ansichten giebt, als die bekannteren nennen will.

Diese verschiedenen Theorien unterscheiden sich durch

ihre verschiedenen Annahmen über die Art der Wirkung von Stromelement zu Stromelement, oder auch von elektrischen Massentheilchen zu Massentheilchen, und es fallen deshalb ihre Folgerungen über die Wirkungen ungeschlossener Ströme zum Theil verschieden aus, während Uebereinstimmung herrscht, soweit nur geschlossene in Betracht kommen. Eben deshalb ist aber eine Entscheidung zwischen denselben nur zu gewinnen durch die experimentelle und theoretische Untersuchung ihrer Folgerungen für ungeschlossene Ströme, und alle Versuche, dies durch Untersuchungen an geschlossenen Strömen leisten zu wollen, sind principiell falsch angelegt.

Da die Schwierigkeiten der experimentellen Ausführung hauptsächlich durch die kurze Dauer der zu einem Ende der Leitung führenden Ströme bedingt sind, welche letztere nur so lange andauern bis die zur Ladung der Oberfläche des betreffenden Leiters nöthige Elektrizitätsmenge herbeigeführt ist, so war eher Aussicht über diejenigen Theile der Kräfte Aufschluß zu erhalten, welche der Wirkung von Stromelementen auf Stromenden entsprechen, als über diejenigen Theile, welche von Stromende auf Stromende wirken. Denn im ersteren Falle hat man es doch nur mit einem dieser sehr flüchtigen Stromendtheile zu thun, während die mitwirkenden Stromelemente einem starken dauernden Strome angehören oder auch durch einen starken Magneten vertreten werden können.

In der That besteht in dieser Beziehung eine Differenz zwischen den von Hrn. F. E. Neumann <sup>1)</sup> für geschlossene Ströme aufgestellten Potentialgesetze, dessen unbeschränkter Anwendung auch auf ungeschlossene Ströme aber nach unserer bisherigen Kenntniß der Thatfachen nichts im Wege stand, wie ich mich nachzuweisen bemüht habe, und zwischen dem Ampère'schen Gesetze andererseits, und derjenigen Form des Inductionsgesetzes, welches

1) Ueber ein allgemeines Princip der mathematischen Theorie inducirter elektrischer Ströme (der Akademie vorgetragen am 9. August 1847). Berlin, Reimer 1848.

ebenfalls und schon früher von Hrn. F. E. Neumann<sup>1)</sup> direct aus dem Ampère'schen Gesetze abgeleitet worden war, und welches übrigens mit dem aus der Weber'schen Hypothese über das Grundgesetz der elektrischen Kräfte hergeleiteten übereinstimmt, so wie mit den Gesetzen, welche Hr. C. Neumann, Sohn, nach einander von verschiedenen Hypothesen ausgehend abgeleitet hat.

Wenn man aus dem Potentialgesetze die Kräfte herleitet, die von jedem Punkt des einen Leiters auf jeden Punkt des anderen wirken müßten, um den in den Potential gegebenen Betrag der Arbeit zu leisten, so erhält man außer den ponderomotorischen Kräften, welche von Stromelement zu Stromelement wirken, und die mit den von Ampère angenommenen vollkommen übereinstimmen, noch solche, die zwischen den Stromelementen und Stromenden wirken, deren Intensität der Geschwindigkeit proportional ist, mit der die Dichtigkeit der Elektrizität an dem Stromende wächst, ferner proportional der nach der Verbindungslinie beider gerichteten Stromcomponente in dem Stromelement, und umgekehrt proportional der Entfernung zwischen beiden. Die Kraft ist anziehend, wenn die in dem Stromende sich anhäufende Elektrizität in dem Stromelement von jenem wegfliest.

Hrn. Graßmann's ponderomotorisches Gesetz enthält die Kraft, welche Stromenden auf Stromelemente, nicht aber die, welche die letzteren auf erstere ausüben. Darin ist also die Gleichheit der Action nicht gewahrt. Das Graßmann'sche Gesetz fällt übrigens seinem Resultat nach mit Faraday's Regel zusammen, wonach die ponderomotorische Kraft auf Stromelemente immer senkrecht zu ihnen selbst und zu den Magnetkraftlinien gerichtet ist. Nur sind in Faraday's Vorstellung und in der sich ihm anschließenden von Cl. Maxwell die Stromenden durch die Annahme beseitigt, daß von jedem Stromende

1) Die mathematischen Gesetze der inducirten elektrischen Ströme. Schriften der Berl. Akad. d. W. von 1875. Berlin, Reimer 1846.

aus sich elektrische Bewegungen in das isolirende Medium hinein fortpflanzen, welches die Leiter von einander trennt.

Ich habe in meiner der Akademie im Februar 1873 gemachten Mittheilung schon erwähnt, daß man diese vom Potentialgesetz geforderten ponderomotorischen Wirkungen auf Stromenden von denen, welche die Stromelemente erleiden, würde isoliren können, wenn man als Vertreter der geschlossenen Stromsysteme starke in sich selbst zurücklaufende ringförmige Magnete ohne Pole anwendet. Diese wirken auf andere Magnete und geschlossene Ströme gar nicht ponderomotorisch ein, wohl aber würden sie nach dem Potentialgesetze auf Stromenden einwirken müssen, beziehlich letztere auf die ringförmigen Magnete, und zwar so, daß wenn der Magnet durch ein System von Kreisströmen ersetzt gedacht wird, er diejenige Seite des Ringes dem Stromende zuzuwenden streben wird, in welcher die dem Stromende zufließende Elektrizität von der Axe des Ringes wegfließt.

Es erschien möglich auf einem von mir schon in Borchardt's Journal für Mathematik Bd. 78, S. 281 angedeuteten Wege Stromenden von hinreichender Wirksamkeit zu erhalten mittels elektrischer *Convection*. Ich verstehe hierunter entsprechend dem Gebrauche, der von diesem Worte in der Wärmelehre gemacht wird, die Fortführung der Elektrizität mittelst der Fortbewegung elektrisch geladener Körper. Das Potentialgesetz schreibt elektrodynamische Wirkungen nur der in ponderablen Trägern sich bewegenden Elektrizität zu, nicht aber der convectiv fortgeführten. Es war also zu versuchen, ob eine Elektrizität ausströmende Spitze die Wirkung eines Stromendes zeige, da die durch die Fortbewegung der elektrisch abgestoßenen Luft fortgeführte Elektrizität möglicher Weise nicht als elektrodynamische Fortsetzung der durchströmten Leitung in Betracht kam.

Versuche dieser Art übernahm Hr. N. Schiller während des vorigen Sommers im physikalischen Laboratorium

der hiesigen Universität auszuführen. Ein geschlossener Stahlring wurde mit einem Leitungsdrahte umwickelt und magnetisirt. Die Stärke der entstandenen Magnetisirung des Ringes konnte durch den Inductionsstrom bestimmt werden, den derselbe in einer Anzahl anderer, vom ersten Drahte getrennter Drahtwindungen beim Magnetisiren gab. Der Ring wurde an einem langen Coconfaden aufgehängt in einem Gehäuse, welches äußerlich ganz mit Stanniol überdeckt wurde, um elektrostatische Anziehungskräfte auszuschließen. Auch das Glas, durch welches ein am Magneten befestigter Spiegel beobachtet werden konnte, war durch ein Metallgitter bedeckt. Durch eine von außen genäherte metallene Spitze strömte die gesammte durch eine schnell gedrehte Holtz'sche Maschine entwickelte Elektricität in die Luft aus. Die Spitze wurde derjenigen Seite des Kastens gegenübergestellt, wo sich innen der eine verticale Theil des Ringes befand. Der Ring hätte unter diesen Umständen eine Ablenkung erfahren müssen, wenn die Spitze als Stromende im Sinne der Potentialtheorie wirkte. Das Resultat der so angestellten Versuche war aber durchaus negativ. Hr. N. Schiller hat seitdem diese Versuche in *Moskau* mit vollkommenen Apparaten fortgesetzt, unter Bedingungen, wo die Größe der Magnetisirung des Ringes und die Intensität des von der Elektrisirmaschine gelieferten Stromes genau bestimmt, und nachgewiesen werden konnte, daß die nach dem Potentialgesetz zu erwartende Ablenkung groß genug seyn würde, um sicher beobachtet werden zu können, wenn sie existirte. Die Resultate waren ebenso rein negativ. Ich erlaube mir am Schlusse dieses Aufsatzes die darauf bezüglichen Mittheilungen aus einem an mich gerichteten Briefe des genannten Beobachters beizufügen. Eine ausführlichere Beschreibung dieser Versuche behält sich derselbe selbst zu geben vor<sup>1)</sup>.

Daraus ist also zu schließen, daß entweder die vom

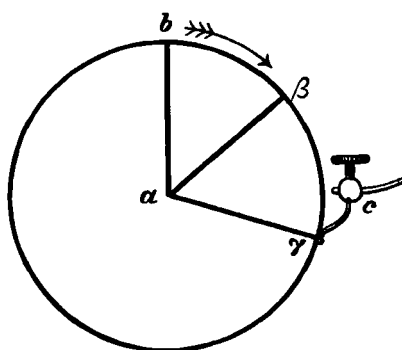
1) Dieselbe ist bereits bei mir angelangt, und wird nächstens in den Annalen abgedruckt werden. P.

Potentialgesetze angezeigten Wirkungen der Stromenden nicht existiren, oder daß außer den von diesem Gesetze angezeigten elektrodynamischen Wirkungen auch noch solche der convectiv fortgeführten Elektricität bestehen, daß das Potentialgesetz also unvollständig sey, wenn man in ihm nur Rücksicht nimmt auf Fernwirkungen der in den Leitern fortströmenden Elektricität.

Andererseits hängt mit dieser Differenz in der Bestimmung der ponderomotorischen Kräfte eine solche in der Bestimmung der inducirten elektromotorischen Kräfte in ungeschlossenen Leitern zusammen. Wenn ein Magnet oder ein System geschlossener Ströme inducirend einwirkt auf einen ungeschlossenen linearen Leiter  $ab$ , welcher in die Lage  $\alpha\beta$  fortgerückt wird, so ist nach dem von Hrn. Neumann senior aus dem Ampère'schen hergeleiteten Inductionsgesetze die gesammte inducirte von  $\alpha$  nach  $\beta$  treibende elektromotorische Kraft gleich dem Potential der inducirenden Ströme (oder Magnete) auf einen Stromkreis in dem die Einheit des Stromes von  $\alpha$  längs der Lage  $\alpha\beta$  nach  $\beta$ , von  $\beta$  längs des vom Endpunkte  $b$  beschriebenen Weges nach der Anfangslage von  $b$ , von da längs der Anfangslage  $ab$  des Leiters nach  $a$  und endlich längs des vom Punkte  $a$  beschriebenen Weges nach  $\alpha$  circulirt. Mit dieser Regel fällt in den Resultaten das Faraday'sche Gesetz zusammen, wonach die Stärke der Induction von der Anzahl der durchschnittenen Magnetkraftlinien abhängt.

Folgen dagegen die ponderomotorischen Wirkungen dem Potentialgesetze, so sind in der genannten Berechnung wegzulassen diejenigen Theile des Potentials, die sich auf die beiden Wege  $a\alpha$  und  $\beta b$  beziehen; es ist vielmehr nur die Differenz des elektrodynamischen Potentials für die Endlage  $\alpha\beta$  minus dem für die Anfangslage  $ab$  zu nehmen. Es ergibt sich hieraus, daß ein Unterschied des Inductionsgesetzes auch für ungeschlossene Leiter nur dann besteht, wenn mindestens das eine Leiterende selbst fortbewegt wird.

Fig. 1.



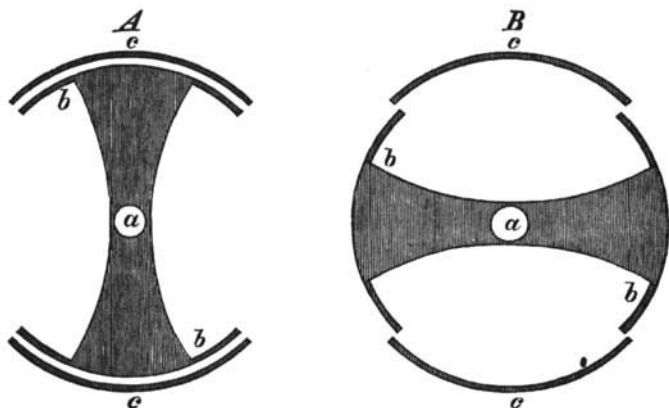
Denken wir uns den Endpunkt  $a$  des Leiters ( $ab$  Fig. 1) festliegend,  $b$  aber im Kreise um  $a$  drehbar, ferner die wirkenden Magnete und Stromtheile so angeordnet, daß die ersteren Rotationskörper bilden, deren magnetische Axe, wie die Axe ihrer Form mit der auf dem Mittelpunkte des Kreises errichteten Normale seiner Ebene zusammenfällt, während die Stromkreise zu dieser Axe concentrische Kreise bilden. Bei solcher Anordnung ist die relative Lage des Radius  $a\beta$  zu den Magneten oder Strömen genau dieselbe wie  $ab$ ; das elektrodynamische Potential hat in beiden Fällen den gleichen Werth, nämlich Null, und das Potentialgesetz würde die Folgerung ergeben, daß in diesem Falle keine elektromotorische Kraft während der Drehung des Radius  $ab$  in der Lage  $a\beta$  längs desselben wirkt.

Dagegen ist klar, daß der Leiter  $ab$  bei seiner Fortbewegung Magnetkraftlinien, die der Axe des Kreises parallel gehen, durchschneidet. Und entsprechender Weise kommt nach der von Neumann gegebenen Regel auch derjenige Theil des Potentials in Betracht, der sich auf den vom Punkte  $b$  beschriebenen Weg, d. h. den Kreisbogen  $b\beta$  bezieht. Dieser Theil des Potentials hat in der That einen von Null verschiedenen Werth; geschieht die Strömung der Kreisströme im Sinne des neben gesetzten Pfeils und der Bewegung von  $b$  nach  $\beta$ , so würde das Potential positiv seyn, also die Inductions-kraft von  $a$  nach  $\beta$

hin wirken müssen. Ein so gerichteter Strom würde nach Ampère's Gesetz der Bewegung entgegen wirken.

Tritt an dem Ende  $b$  des rotirenden Radius schleifende Berührung mit einem feststehenden Leiter ein, wie in der Lage  $a\gamma$  mit  $c$ , so würde das Potentialgesetz genau dieselbe inducirte Kraft anzeigen, da dann die Leitung  $a$  über  $\gamma$  bis  $c$  geschlossen wäre. In diesem Falle wäre aber nach dem Potentialgesetze die ganze elektromotorische Kraft in den ihre Richtung schnell verändernden Stromfäden der Gleitstelle zu suchen. Die Einführung einer Gleitstelle giebt uns bei einem solchen Versuche also immer die Gelegenheit unabhängig von dem Streit der Theorien die durch die betreffende Bewegung im geschlossenen Kreise erzeugbare elektromotorische Kraft zu bestimmen.

Figur 2.



Diesen Theil der Versuche habe ich selbst ausgeführt. Zu dem Ende habe ich das Ende  $b$  des rotirenden Leiters mit einer Condensatorplatte versehen, welche während seiner Rotation einer andern ähnlichen nahe gegenübertrat. Schematisch ist dies dargestellt in der Fig. 2 A. Es ist  $a$  wieder der Durchschnitt der Axe, welche verticale Richtung hat,  $b$  sind die cylindrischen beweglichen Condensatorplatten,  $c$  die feststehenden. Figur 2 A zeigt diesel-

ben Theile nach einer Drehung um einen rechten Winkel. Die Platten *bb* und *cc* sind Quadraten zweier mit der Rotationsaxe *a* coaxialen Cylinderflächen. Der radiale Träger *bb* liegt zwischen den Polen eines starken Elektromagneten. Das untere Ende der Axe *a* ruht auf dem unteren Pole desselben, das obere Ende reicht durch eine Durchbohrung des oberen Theils des Elektromagneten hinaus bis in einen von magnetischen Richtkräften verhältnißmäßig freien Raum und trägt dort einen Commutator, mittelst dessen die Platten *cc* während der Stellung *A* zur Erde abgeleitet, in der Stellung *B* aber mit der isolirten Platte eines Condensators nach Kohlrausch verbunden werden. Werden die Platten *bb* durch magnetische Induction positiv geladen, so laden sich die Platten *cc* in der Stellung *A* von der Erde aus negativ, und zwar wirkt der Apparat hierbei wie ein Condensator, so daß eine mäßige elektromotorische Kraft ein verhältnißmäßig bedeutendes Quantum Elektrizität anhäuft. Gehen dann die Platten in die Stelle *B* über, so wird die gesammelte negative E., deren Potential durch die Entfernung der positiven Platten *b* erheblich gesteigert ist, in Kohlrausch's Condensator übergeführt, und häuft sich in diesem an, bis dessen isolirte Platte selbst das Potential der Platten *cc* in der Stellung *B* angenommen hat.

Die Ladung von Kohlrausch's Condensator wird dann an einem Thomson'schen Quadrantelektrometer gemessen.

Ich übergehe hier die ausführliche Erörterung der Fehlerquellen, die sich geltend machen konnten und zum Theil gemacht haben, ehe ich die Mittel zu ihrer Beseitigung fand. Ich will nur kurz bemerken, daß nach jeder einzelnen Beobachtung die Pole des Magneten gewechselt wurden, wodurch der Einfluß aller Fehlerquellen von constanter Richtung beseitigt wird, daß ferner zwischen den Versuchen mit schneller Drehung immer solche mit langsamer Drehung angestellt wurden, um den Einfluß der durch den magnetischen Strom hervorgebrachten elek-

trostatischen Ladungen zu eliminiren. Da hier doppelte Condensation wirkt, so sind außerordentliche kleine elektrische Einflüsse im Stande Ladungen hervorzubringen. Ich behalte die ausführliche Beschreibung der Versuche und Methoden einem anderen Orte vor.

Es gelang mir schließlich bei großer Rotationsgeschwindigkeit und mit starken magnetisirenden Strömen Ablenkungen am Elektrometer bis zu 67 Theilstreichen zu erzielen, welche mit der Richtung der Magnetisirung und mit der Richtung der Bewegung ihr Zeichen wechselten, und an deren Entstehung aus elektrodynamischer Induction ich keinen Zweifel mehr hegen konnte. Die inducirte elektromotorische Kraft, welche den rotirenden Condensator lud, entspricht  $\frac{1}{31}$  von der eines Daniell'schen Elements.

Andrerseits konnten die Verbindungen mit dem Commutator auch so hergestellt werden, daß die feststehenden Platten *c* in der Stellung *A* mit Kohlrausch's Condensator verbunden wurden, in der Stellung *B* mit der Erde. Dann wurde in der ersten Stellung dem großen Condensator so lange Elektrizität entzogen, und in der zweiten Stellung an die Erde abgegeben, bis seine Potentialfunction den Werth angenommen hatte, der den Platten *c* bei dem Elektrizitätsquantum Null zukam, wenn sie der vertheilenden Wirkung der bewegten und elektrodynamisch inducirten Platten ausgesetzt waren. Die dabei entstehende Ladung ergab nach Entfernung der Platten des großen Condensators von einander am Elektrometer die Ablenkung 12,42, während 13,8 derjenige Werth gewesen wäre, der sich aus der bei der ersten Stellung des Commutators beobachteten Ablenkung von 67 nach der Capacität des Condensators hätte ergeben müssen. Letztere war durch Ladung des rotirenden Condensators mittelst eines Daniell'schen Elements bestimmt worden.

Die beschriebenen Versuche zeigen zunächst, daß die Platten des rotirenden Condensators durch eine inducirte

elektromotorische Kraft geladen werden, auch wenn keine Gleitstelle vorhanden ist.

Es wäre nun noch zu fragen, ob die ganze elektromotorische Kraft, die in einem durch eine Gleitstelle geschlossenen Kreise wirkt, auch in dem ungeschlossenen Kreise thätig war. Diese Frage war bei der Anfertigung des Apparats vorgesehen worden, und ich hatte deshalb an dem oberen Rande der festen Platten *cc* verstellbare Federn anbringen lassen, welche bei passender Einstellung metallische Stifte, die am oberen Rande der beweglichen Platten *bb* angebracht waren, berühren konnten. Während dieser Berührung war die inducirte Leitung zwischen ruhenden Endpunkten, nämlich der Axe des rotirenden Theils und den festen Platten *c* geschlossen, für welchen Fall die zweifelhaften Punkte der Theorie keinen Einfluß haben. Von *c* aus konnte direct der Kohlrausch-Condensator geladen werden. Die Ladung war unter übrigens gleichen Umständen etwas größer, nämlich 18,71, als im letztbeschriebenen Falle, wo sie nur 13,42 betrug. Indessen berechtigt dieß nicht auf eine entsprechende Größe der elektromotorischen Kraft in der Contactstelle zu schließen. Denn es ergab sich, daß die elektromotorische Kraft nicht dieselbe blieb, wenn die Gleitstelle in verschiedener Höhe der rotirenden Platten angebracht wurde, was geschehen konnte, nachdem man eine der Platten *c* entfernt hatte. In mittlerer Höhe der Gleitstelle, der Mitte beider Magnetpole gegenüber, war die elektromotorische Kraft am kleinsten, etwa nur  $\frac{5}{7}$  derjenigen an der oberen Anschlagstelle, was sich dadurch erklärt, daß die magnetischen Kraftlinien am Orte der Condensatorplatten ein wenig nach außen gebaucht waren, und deshalb zum Theil die Condensatorplatten selbst schnitten, und in ihnen schwache elektromotorische Kräfte von der Mitte zum oberen und unteren Rand hin inducirten. Der obige Ausschlag von 18,17 für die Gleitstelle am oberen Rand, reducirte sich also auf 13,36 für eine Gleitung an der Mitte der beweglichen Platten. Bei

den Versuchen ohne Gleitstelle kommt natürlich der Mittelwerth der elektromotorischen Kraft in Betracht, für die ganzen condensirenden Flächen berechnet. Dafs nun hier die beobachtete Ablenkung 13,42 so wenig gröfser ist, als die an der mittleren Gleitstelle wirkende Kraft 13,36 erklärt sich dadurch, dafs im ersteren Falle das Potential der Flächen von *b* nur durch Vertheilung auf die Platten *c* wirkte, und die Zahl 13,36 deren Potentialwerth misst, während ihr Elektrizitätsquantum gleich Null war. Unter diesen Umständen ist das durch Vertheilung erzeugte Potential nothwendig etwas kleiner, als das die Vertheilung erzeugende.

Bestätigt wurde diese Ansicht durch andere Versuche, bei denen ich nach Beseitigung der einen Platte *c* das Metallgestell des Magneten und die mit ihm verbundene Batterie isolirte und nur durch Drähte, die in der Mitte der unbedeckten rotirenden Platte *b* schleiften, die genannten Leiter mit der Erde verband. Die gebliebene eine Platte *c* wurde in der Stellung *A*, wo sie durch *b* gedeckt war, mit der Erde, in der Stellung *B* ungedeckt mit dem Kohlrausch-Condensator verbunden. Sie erhielt eine schwache Ladung von der Gröfse 5,3 und von derselben Art, als wäre die rotirende Axe nicht durch die Gleitstelle, sondern von ihren Spitzen aus zur Erde abgeleitet gewesen, wie in den erst beschriebenen Versuchen. Daraus ging unzweideutig hervor, dafs die in der Gleitstelle selbst vielleicht vorhandene elektromotorische Kraft jedenfalls kleiner war, als die Differenz zwischen dem Mittelwerthe und dem Minimalwerthe der bei den verschiedenen Höhen der Gleitstelle in sämmtlichen bewegten Theilen wirkenden inducirten Kraft. Wenn also überhaupt ein endlicher Theil der elektromotorischen Kraft in der Gleitstelle seinen Sitz hat, so ist derselbe verhältnismäfsig sehr klein ( $\frac{1}{33}$  der Gesamtkraft) und bei der bisher erreichten Genauigkeit dieser Messungen den Fehlerquellen gegenüber noch nicht von solcher Gröfse, dafs ich seine Existenz verbürgen möchte.

Es folgt nun hieraus, daß die Potentialtheorie, wenn in ihr nur die in den Leitern vorkommenden elektrischen Bewegungen und deren Fernwirkungen berücksichtigt werden, mit den Thatsachen in Widerspruch tritt. Die beschriebenen Versuche fügen sich dagegen hinreichend gut unter das von F. E. Neumann direct aus der Ampère'schen Hypothese abgeleitete Gesetz. Daß übrigens die Ampère'sche Hypothese auch für die Inductionen zwischen je zwei ungeschlossenen Leitern mit dem Gesetz von der Erhaltung der Kraft nach jeder Richtung hin in Uebereinstimmung gebracht werden kann, habe ich in meinem dritten Aufsätze über die Theorie der Elektrodynamik (Journal für Mathematik Bd. 78) nachgewiesen <sup>1)</sup>.

Aber auch das Potentialgesetz kann den hier gewonnenen Resultaten entsprechend ergänzt werden, wenn man mit Faraday und Maxwell annimmt, daß auch in den Isolatoren elektrische Bewegungen mit elektrodynamischer Wirksamkeit eintreten können, wodurch dieselben diëlektrisch polarisirt werden. Ich habe diese Hypothese schon am Schluß meiner ersten elektrodynamischen Abhandlung im 72<sup>ten</sup> Bande des Journals für Mathematik mit dem Potentialgesetz in Verbindung gebracht, mit Beziehung auf die elektrischen Bewegungen in ruhenden Leitern und Isolatoren. Die Theorie von Hrn. Cl. Maxwell ergibt sich aus dieser Modification des Potentialgesetzes, wenn man die Constante der diëlektrischen Polarisation ( $\epsilon$  in meiner Abhandlung) unendlich groß werden läßt. Bei

- 1) Ich brauche hier wohl kaum daran zu erinnern, daß ich das Potentialgesetz bisher zwar gegen nichtige Einwände vertheidigt habe, aber doch immer nur als ein solches, über dessen Richtigkeit endgiltig nur neue Versuche entscheiden könnten. Die Punkte zu finden, wo man das Experiment angreifen könne, war der ausgesprochene Zweck meiner früheren Arbeiten, der nun in einem wesentlichen Theile erreicht ist. So weit die einfachere Gesetzmäßigkeit einer solchen Theorie bei Mangel entscheidender Thatsachen größere Wahrscheinlichkeit giebt, schien diese mir allerdings auf Seiten des Potentialgesetzes zu liegen, und deshalb erschien letzteres mir besonders beachtenswerth.

diesem Gränzfall würden überhaupt keine ungeschlossenen elektrischen Ströme mehr bestehen, wie auch Hr. Maxwell ausdrücklich hervorgehoben hat, indem jede elektrische Bewegung in Leitern, die zu einer Anhäufung der Elektricitäten an ihrer Oberfläche führt, sich in den umgebenden Isolatoren als aequivalente Bewegung entstehender oder vergehender diëlektrischer Polarisirung fortsetzen würde.

Ich behalte mir vor die vollständige mathematische Ausführung der Principien für die bei Bewegung der Leiter und Isolatoren eintretenden ponderomotorischen und elektromotorischen Wirkungen, auf Grundlage der oben bezeichneten Annahmen an einem anderen Orte zu geben und dadurch die Verbindung zwischen der Potentialtheorie und der Maxwell'schen vollständig herzustellen. Hier wird es genügen in Bezug auf die vorbeschriebenen Versuche folgendes anzuführen.

Denkt man sich zwischen den beiden an einander vorbeigleitenden Condensatorplatten die Schicht der isolirenden Luft (beziehlich des Aethers) in kleine Prismen zerschnitten, die in einem gegebenen Augenblicke senkrecht zu den Condensatorflächen stehen, dann aber sich mit den Luftschichten verschieben, so ist jedes dieser Prismen in einer Bewegung begriffen, durch welche es in tangentialer Richtung überzugehen und in dieser Richtung sich zu verlängern strebt, so daß es der zugewendeten Seite der um den Elektromagneten circulirenden Kreisströme sich parallel streckt. In einem Drahtstücke, was diese Bewegung macht, würde nach dem Potentialgesetze eine elektromotorische Kraft wirken gleich derjenigen, die wir bei den Versuchen mit der Gleitstelle finden. Das Gleiche würde bei diëlektrischer Polarisirungsfähigkeit der Luftprismen in diesen geschehen, es würden sämmtliche Molekeln der Prismen nach der einen Richtung hin positiv, nach der anderen Richtung hin negativ geladen werden, und dem entsprechend würde in der der positiven Seite der Molekeln gegenüberstehenden Conden-

satorfläche negative Elektricität angehäuft werden, ihrer negativen Seite gegenüber positive. Somit würden die Metallflächen sich elektrisch laden können, ohne daß eine elektrodynamisch inducirte Kraft den metallischen Leiter selbst zu treffen brauchte.

Setzen wir das elektrische Moment für die Volumeinheit der Luft in Richtung der  $x$  gleich  $\chi$  und bezeichnen wir mit  $\mathfrak{X}$  die in gleicher Richtung wirkende elektromotorische Kraft, und mit  $\varphi$  die elektrische Potentialfunction im Innern des Diëlectricum (wie in meiner Abhandlung im 72<sup>sten</sup> Bd. des Journals für Mathematik), so würde zwischen den Condensatorplatten, da wo die  $x$  Axe zu ihnen normal ist, zu setzen seyn

$$\chi = \epsilon \left( \mathfrak{X} - \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right).$$

Dabei würde gegen die Gränzen der Luftschicht in Richtung positiven  $x$  die elektrische Gränzschicht von der Größe  $+\chi$  hingeschoben seyn, in der Richtung der negativen  $x$  die Schicht  $-\chi$ . Wenn nun an beiden Metallflächen selbst sich die elektrischen Dichtigkeiten  $+e$  und  $-e$  gesammelt haben, so ist nach bekannten Sätzen

1) an der Seite des positiven  $\chi$

$$-4\pi(\chi + e) = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}$$

oder

$$+4\pi e = (1 + 4\pi\epsilon) \frac{\partial \varphi}{\partial x} - 4\pi\epsilon\mathfrak{X};$$

2) an der Seite der negativen  $x$  ebenso

$$+4\pi(\chi + e) = \frac{\partial \varphi}{\partial x}$$

oder

$$4\pi e + (1 + 4\pi\epsilon) \frac{\partial \varphi}{\partial x} - 4\pi\epsilon\mathfrak{X}.$$

Wenn nun die beiden Condensatorflächen übriges durch eine nicht von inducirten Kräften getroffene metallinische Leitung zusammenhängen, wie dies nach den Annahmen der Potentialtheorie in unseren Versuchen der Fall war, so wäre  $\varphi$  in beiden Condensatoren gleich,

folglich in ihrem engen Zwischenraume  $\frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0$  und die gebundene Elektrizität

$$e = -\epsilon \mathfrak{X}.$$

Wenn dagegen nach den Annahmen der Ampère'schen Theorie die gesammte elektromotorische Kraft  $\mathfrak{X}h$  in dem metallischen Kreise wirkte, so wäre der Unterschied der Potentiale an beiden Flächen gleich  $-\mathfrak{X}h$  zu setzen, also im Zwischenraume

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = -\mathfrak{X}$$

wobei  $h$  den Abstand beider Flächen bezeichnet, und

$$e = -\left(\frac{1}{4\pi} + \epsilon\right)\mathfrak{X}.$$

Ist  $\epsilon$  sehr groß, so werden beide Werthe merklich gleich, das heißt, dann würde auch unter Annahme des Potentialgesetzes die elektrische Ladung nahehin so groß werden, als sie es nach dem Ampère'schen seyn müßte, so wie es in unseren Versuchen in der That der Fall war. Ist  $\epsilon$  unendlich groß, so würde jeder Unterschied zwischen beiden Fällen schwinden. Daß daraus nicht geschlossen werden dürfte, daß auch die Ladungen unendlich groß werden, weil dann andere Bestimmungen der elektrischen Maasseinheiten nöthig werden, habe ich schon in meiner mehrerwähnten Abhandlung erörtert.

Die Entscheidung zwischen den beiden noch übrig bleibenden Theorien, deren eine aus der Ampère'schen Hypothese abgeleitet ist und nur Fernwirkungen von Leiter zu Leiter berücksichtigt, und andererseits der Maxwell'schen (bezüglich dem die Isolatoren mitberücksichtigenden Potentialgesetz) wird wohl zunächst durch Untersuchung der auf die Isolatoren ausgeübten elektrodynamischen Wirkungen gewonnen werden müssen.