VI. Ueber einen neuen Gesichtspunkt, die Einwirkung des Magneten auf den elektrischen Strom betreffend; von Plücker.

(Siehe Ann. Bd. CIII, S. 88 und 151; Bd. CIV, S. 113.)

76. Die kreisende Bewegung eines Magnetspols um den Leitungsdraht und eines Leitungsdrahtes um den Magnetspol sind Bewegungserscheinungen, welche, als sie von Hrn. Faraday zuerst beobachtet wurden, die Aufmerksamkeit um so mehr in Anspruch nahmen, als sie bis dahin ohne Analogie waren. Indem Laplace und Biot auf die Wirkung zwischen dem Pole und einem einzelnen Elemente des linearen Stromleiters zurückgingen, erhielten sie eine Elementarkraft, die dem Quadrate der Entfernung zwischen dem Pole und dem Strom-Elemente umgekehrt proportional ist, und deren Richtung zugleich auf der Richtung des Strom-Elementes und derjenigen geraden Linie, welche dasselbe mit dem Pole verbindet, senkrecht steht. Diese Kraft, welche sowohl nach einer Commutation der magnetischen Polarität als auch nach einer Commutation der Stromrichtung in entgegengesetztem Sinne wirkt, würde das Strom-Element, wenn es frei beweglich wäre, parallel mit sich selbst in einem Kreise um diejenige Linie herumführen, die, parallel mit dem Elemente, durch den Pol gelegt wird.

Wenn wir an der Stelle des als Punkt gedachten Poles, der immer nur eine mathematische Fiction bleibt, einen Magneten von beliebiger Gestalt setzen, so tritt, in der Bestimmung der Richtung der Kraft, an die Stelle der durch den Pol gehenden geraden Linie diejenige magnetische Curve, welche dadurch, daß sie durch das Strom-Element geht, vollkommen bestimmt ist. Es ist weder eine Kraft vorhanden, welche die Richtung des Strom-Elementes ändert, noch eine Kraft, welche dasselbe, der magnetischen Curve entlang nach einer Stelle größerer magnetischer Wirkung hinreibt.

77. Das Vorstehende giebt, unter der Form eines Integrals den Ausdruck für die Total-Wirkung eines Magneten auf einen Strom, dessen Träger ein linearer Leiter von beliebiger Form ist. Nur ist hierbei bisher immer vorausgesetzt worden, daß diese Form unverändert dieselbe bleibe. Es ist ein neuer Gesichtspunkt, wenn wir den Leiter als *vollkommen biegsam* betrachten und dann nach der Form fragen, die ein solcher Leiter, als Träger des Stromes, unter der Einwirkung eines Magneten annimmt. Hier ergeben sich aus den einfachsten mechanischen Principien die folgenden Gesetze.

78. I. *Wenn auf einen vollkommen biegsamen Leiter, durch welchen ein elektrischer Strom geht, beliebige magnetische Kräfte wirken, so kann Gleichgewicht nur dann bestehen, wenn jedes Element des Leiters so gerichtet ist, daß die magnetische Wirkung auf dasselbe verschwindet, das heißt, wenn der Leiter die Form einer magnetischen Curve annimmt.*

Wenn diese Bedingung nicht erfüllt werden kann, so muß der Leiter, wenn seine kleinsten Theile nicht durch Cohäsion oder durch andere Kräfte zusammengehalten werden, in Folge der magnetischen Einwirkung nothwendig zerissen werden. Nichts ändert sich, wenn wir in den vorstehenden Betrachtungen an die Stelle des vollkommen biegsamen Stromträgers einen elektrischen Strom selbst setzen, der nicht an einen Leiter gebunden ist, sondern durch einen Raum, in dem ponderable Materie, die zu seiner Ueberführung dient, vertheilt ist, seinen Weg frei sich suchen kann. Ein solcher Strom wird, bevor der Magnet wirksam ist, eine mehr oder weniger wechselnde Bahn verfolgen, unter der Einwirkung desselben aber den Weg einer magnetischen Curve nehmen. Wenn er das nicht kann, so kann auch der Strom nicht fortbestehen, die Elektricität muß sich verlieren ohne einen solchen eigentlichen Strom zu bilden.

79. II. *Wenn der vollkommen biegsame Leiter unter der Einwirkung des Magneten auf einer gegebenen Ober-*

fläche im Gleichgewichte seyn soll, so muß die Richtung der auf jeden Punkt des Leiters wirkenden Kraft mit der Normalen der Oberfläche in diesem Punkte zusammenfallen.

Um diese Bedingung zu erfüllen, muß für jeden Punkt des Leiters, außer dem Elemente des Leiters selbst, auch das Element der durch diesen Punkt gehenden magnetischen Curve in die gegebene Oberfläche fallen, und hieraus ist wieder leicht zu entnehmen, daß, in dem Falle des Gleichgewichtes der vollkommen biegsame Leiter *der geometrische Ort derjenigen Punkte ist, in welchen das Element der durch dieselben gehenden magnetischen Curven in die gegebene Oberfläche fällt.* Dieser geometrische Ort, der mit der Lage der gegebenen Oberfläche gegen den Magneten Form und Lage ändert, ist also der *einzig* Weg, den der Strom auf der gegebenen Oberfläche einschlagen kann, und er schlägt diesen Weg nur dann ein, wenn seine Endpunkte die wir als fest betrachten *beide auf dem eben bestimmten geometrischen Orte liegen.* Diesen können wir passend *epipolisch-magnetische Curve* nennen. Vor und nach einer Commutation, sowohl der magnetischen Polarität als auch der Stromrichtung, würde ein Strom auf derselben Strecke zwischen den beiden gegebenen Punkten einmal gegen die Oberfläche gedrückt, das andere Mal von der Oberfläche fortgezogen werden. Nur in dem ersten Falle giebt es einen eigentlichen Strom. In dem zweiten Falle, so wie in dem allgemeinen Falle, daß die Strom-Enden *nicht* Punkte der bezeichneten Curve sind, verhindert der Magnet die Bildung eines Stromes ¹⁾.

1) In der Absicht, die von mir zuerst beobachtete Erscheinung des in magnetischen Curven sich zusammenziehenden elektrischen Lichtes in möglichst bezeichnender Weise zu veranschaulichen, fingirte ich vollkommen biegsame unendlich dünne magnetische Fäden (47 bis 49). Es ist bemerkenswerth, daß ein solcher Faden, wenn er in einem seiner Punkte festgehalten wird, ebenso wie ein linearer, vollkommen biegsamer, elektrischer Leiter, unter der Einwirkung des Magneten dann im Gleichgewichte sich befindet, wenn er die Form der durch den festgehaltenen Punkt bestimmten magnetischen Curve annimmt. In dem ersten Falle erkennt man sogleich die Kraft, welche dem magnetischen

80. Bei der theoretischen Discussion des Gesetzes I. treten uns drei Fälle entgegen, die wir auch in dem Experimente wiederfinden.

1. Die elektrische Entladung findet zwischen zwei gegebenen festen Punkten statt. Das ist der Fall des Davy'schen Bogens zwischen Kohlenspitzen, die sich anfänglich berühren, und dann allmählich aus einander gezogen, in einer bestimmten Entfernung festgehalten werden. Ohne störende Einwirkung ist der Weg der elektrischen Entladung, in der Luft wie im luftverdünnten Raume, diejenige gerade Linie, welche die beiden Kohlenspitzen, die auch durch beliebige Metalle ersetzt werden können, verbindet. Als Träger des Stromes sind, zum Theile wenigstens, mithin übergeführte glühende Partikel, die sich in dem Spectrum kund geben, zu betrachten. In längeren Röhren, in welchen das Gas möglichst verdünnt ist, werden, wenn durch dieselben der Ruhmkorff'sche Apparat entladen wird, keine solche Partikel mehr übergeführt und das verdünnte Gas *allein* ist Träger des Stromes; denn die bezüglichen Spectra

Faden von beliebiger Form und Lage die für den Fall des Gleichgewichtes erforderliche Form und Lage giebt. In dem zweiten Falle aber ist es anders. Wenn wir zum Beispiel bewegliche geradlinige Leiter von allen möglichen Richtungen betrachten, die alle von einem gegebenen Punkte als Strahlen ausgehen und auf welche ein gegebener Pol wirkt, so können wir uns diese sämtlichen Leiter auf Kegelflächen vertheilt denken, deren gemeinschaftliche Axe diejenige gerade Linie ist, welche den gegebenen Punkt mit dem gegebenen Pole verbindet. Alle solche Kegelflächen rotiren, in stabiler Bewegung, um ihre gemeinschaftliche Axe. Nehmen wir den Fall einer beliebigen magnetischen Einwirkung und dabei die Leiter unendlich klein, so rotiren diese alle in Kegelflächen, deren gemeinschaftliche Axe die Tangente der bezüglichen magnetischen Curve in dem gegebenen Punkte ist. Nur der, nach dieser Curve selbst gerichtete, Leiter bleibt in Ruhe, ohne daß die andern Leiter in diese Lage getrieben würden. Die Schwierigkeit der Frage liegt darin, daß wir uns den elektrischen Strom nicht als bereits fertig, sondern erst, als in der Bildung begriffen, denken müssen. Und wenn wir überhaupt auch über die Bildung eines Stromes keine bestimmte Anschauung haben, so wissen wir doch so viel, daß er, unter der magnetischen Einwirkung nur nach der magnetischen Curve sich bilden kann.

charakterisiren das jedesmalige Gas, wie die Spectra des Davy'schen Bogens die Substanz der Elektroden charakteristisch nachweisen.

Unter der Einwirkung des Magneten nimmt der Davy'sche Licht-Bogen die Form einer magnetischen Curve an, wenn die Endpunkte der beiden Elektroden gegen den Magneten eine solche Lage haben, daß sie zwei Punkte derselben magnetischen Curve sind. Wenn die Endpunkte der beiden Elektroden in eine andere Lage gebracht werden, wo dieß nicht mehr der Fall ist, da kann der Bogen nicht mehr fortbestehen; er muß zerreißen und giebt je nach der Dichtigkeit des umgebenden Gases, die Erscheinung des sprühenden und zischenden oder des wogenden Lichtes.

Die früheren hierher gehörenden Versuche so vieler ausgezeichneten Physiker liegen mir vollständig genug vor, um sie in dieser Beziehung discutiren zu können. Ich verweise daher einstweilen nur auf meine eigenen, in der dieser gegenwärtigen Abhandlung nachfolgenden neuen Mittheilung von Beobachtungen ¹⁾. Diese sind, mit Ausnahme einiger älteren, geradezu in der Absicht, das I. Gesetz zu verificiren, angestellt worden.

81. 2) Einer der beiden Endpunkte der elektrischen Entladung ist fest und der zweite der bloßen Bedingung unterworfen, daß er auf einer gegebenen Fläche von beliebiger Form liege. Diese Bedingungen sind vorhanden in dem merkwürdigen Verhalten desjenigen Lichtes, das ich magnetisches genannt habe, eben darum nur, weil es den Weg magnetischer Curven nimmt. Dieses Licht tritt in evacuirten Röhren an der negativen Elektrode auf und steigt von jedem Punkte derselben nach allen Richtungen bis zur Wandung der diese Elektrode umgebenden Glasröhre, die hierbei von dem übergeführten Platin mehr oder weniger geschwärzt wird. Was aus diesem elektrischen Lichte wird, nachdem es die Wandung getroffen, ist eine Frage, die zu erörtern hier nicht die Stelle ist. Wenn die Elektrode bis auf einen einzigen Punkt isolirt ist, so ist es dieser einzige Punkt, von welchem die elektrische Entladung, deren ver-

1) Welche in Heft IX erscheinen werden.

schiedene Wege, Elementarströmen entsprechend, die einzelnen leuchtenden Strahlen sichtbar machen. (Für unsere Anschauung ist es gleichgültig, ob die Strahlen alle von dem festen Punkte aus oder nach demselben hin gehen.) Ein jeder solcher Elementarstrom kann, nach dem obigen Gesetze I, unter der Einwirkung des Magneten, nur dann im Gleichgewichte seyn, wenn er nach einer magnetischen Curve gebogen ist, und diese ist hier für alle Elementarströme dieselbe Curve, und dadurch vollkommen bestimmt, daß sie durch den gegebenen festen Punkt geht. Das ganze von dem nicht isolirten Punkt ausgehende Licht zieht sich also in der, durch denselben gehenden, magnetischen Curve, die dadurch hell erleuchtet wird, zusammen. Der ganzen Reihe continuirlicher, elektrisches Licht ausstrahlender, Punkte der *nicht* isolirten negativen Elektrode entspricht eine continuirliche, aus magnetischen Curven gebildete, Lichtfläche.

Da die magnetischen Curven dieselben bleiben, wenn wir die magnetische Polarität commutiren, so stellt sich nach einer solchen Commutation genau die frühere Erscheinung wieder her.

Die schönen, von mir zuerst beobachteten und in dies. Ann. (Bd. CIII, S. 97 bis 106 und Bd. CIV, S. 113 bis 118) beschriebenen, Erscheinungen, zu denen ähnliche, später von mir auch an der positiven Elektrode beobachtete, noch hinzukommen, sind hiermit also vollkommen erklärt.

82. 3) Die Entladung findet zwischen zwei gegebenen Flächen oder verschiedenen Theilen derselben gegebenen Fläche statt, so daß die elementaren Entladungsströme auf diesen Flächen, innerhalb gewisser Gränzen sich ihren Anfangs- und Ausgangspunkt suchen können. Auch in diesem Falle war das Experiment der Theorie vorausgegangen. Die erste desfallsige Beobachtung machte ich an einem evacuirten Ellipsoide, das den mittleren Theil einer Geißler'schen Röhre (63) bildete. Wenn es in aequatorialer Lage an die genäherten Halbanker angestossen wurde, bildete sich im Innern desselben, fern von den beiden Elektroden,

ein gewölbeförmiger Bogen, der aus erleuchteten magnetischen Curven bestand. Nachdem die Aufmerksamkeit des Auges einmal auf diese Erscheinungen gerichtet war, nahm es sie auch unter anderen, sehr verschiedenen, Verhältnissen wahr.

83. Es bleibt nur noch übrig einige vorläufige Andeutungen über die Anwendung des Gesetzes II zu machen, welches den einzig möglichen Weg, den die elektrische Entladung unter der Einwirkung des Magneten auf der innern Wandung einer Glasröhre einschlagen kann, die epipolisch-magnetische Curve bestimmt. Nehmen wir beispielsweise an, die innere Wandung habe die Form eines dreiaxigen Ellipsoïds und dieses liege mit seinem Mittelpunkt so oberhalb der Mitte zwischen den beiden horizontalen Halbankern, daß eine seiner drei Axen senkrecht ist, so gehört die Durchschnitte-Ellipse in demjenigen Hauptschnitte derselben, der in die Aequatorial-Ebene fällt, offenbar der fraglichen Curve an; denn jede magnetische Curve, welche von einem der beiden Halbanker zum andern führt, schneidet die Aequatorial-Ebene unter rechtem Winkel, so daß die Elemente derjenigen dieser Curven, die jene Ellipse schneiden, innerhalb der Oberfläche des Ellipsoïds liegen. Ein regelmäßiger Strom ist nur dann möglich, wenn er in einem Punkte der Ellipse in das Ellipsoïd hinein, in einem andern Punkte der Ellipse herausgeleitet wird. Dieser Strom beschreibt alsdann, auf der Ellipse, den einen oder den andern Weg zwischen den beiden Punkten, je nachdem er die eine oder die andere Richtung hat. (Vergl. den Versuch der 11. Nummer.) Es ist eine secundäre Wirkung (die bei größerer magnetischer Einwirkung immer stärker und sehr verschieden stark bei verschiedenem Inhalte der Röhren hervortritt), daß der nach dem Magneten hingezogene Strom in wogendes Licht sich auflöst. Diese Erscheinung ist dadurch bedingt, daß die dem dritten Falle des Gesetzes I. entsprechende Wirkung hinzutritt (82) und dadurch verschwindet das Unerklärliche (15). Wenn der Strom in irgend zwei Punkten, die nicht beide Punkte der frag-

lichen Ellipse sind, oder, was dasselbe heisst, die nicht beide in der Aequatorial-Ebene sich befinden, ein- und ausgeleitet wird, so bildet, im Allgemeinen, sich kein Strom; nur in dem singulären Falle, dass beide Punkte derselben magnetischen Curve angehören und der Bogen dieser Curve zwischen diesen Punkten ganz innerhalb des Ellipsoïds fällt, tritt der erste Fall des Gesetzes I unmittelbar ein.

84. Ein zweites einfaches Beispiel bietet der Fall einer weitem cylindrischen Röhre, die 45° gegen die Aequatorialebene geneigt horizontal auf die Halbanker aufgelegt wird. Dann besteht die epipolisch-magnetische Curve in ihrer Mitte aus zwei abgesonderten Spiralen, die, einzeln genommen, durch Ströme von entgegengesetzter Richtung hell erleuchtet werden.

85. Sehr schön, wenn auch nicht in demselben Glanze als bei der direkten Entladung, lassen sich die obigen Gesetze durch inducirte Ströme zur Anschauung bringen. Ich nahm zu diesem Ende, um nur ein Beispiel hier schon anzuführen, eine blofse Glaskugel von etwa 80^{mm} Durchmesser, ohne Elektroden, in der nach der Evacuierung nur noch blofse Spuren eines Gases zurückgeblieben waren. Wenn die äufsere Wandung dieser Kugel mit *einer* Elektrode des Ruhmkorff'schen Inductions-Apparates in irgend einem Punkte berührt wird, so verbreitet sich durch die ganze Kugel von dem der berührten Stelle entsprechenden Punkte der innern Glaswand aus, ein diffuses Licht von der dem Gase eigenthümlichen Farbe. Dieses Licht zieht sich, wenn die Kugel auf die Mitte der einander genäherten Halbanker der Elektromagneten gelegt wird, nach derjenigen magnetischen Curve, welche durch den eben bestimmten Punkt geht, zu einem einzigen Lichtbogen zusammen. Auf dem Wege dieses Bogens findet eine doppelte elektrische Strömung, von entgegengesetzter Richtung, statt. Ist die berührende Elektrode die negative, so geht von der Berührungsstelle ein stärkerer positiver Strom aus; ein schwächerer kehrt auf demselben Wege zu ihr zurück. Ist die Elektrode die positive, so vertauschen die beide Ströme ihre

gegenseitige Stärke; der nach der Berührungsstelle hingehende positive Strom ist der stärkere. Wenn man die Kugel in beliebigen Punkten mit *beiden* Elektroden zugleich berührt, so treten die beiden Lichtbogen, wie sie den einzelnen Elektroden entsprechen, ohne einander sichtbar zu stören, anscheinend ganz unabhängig von einander, gleichzeitig hervor. Nur wenn die beiden Elektroden die Kugel in zwei Punkten derselben magnetischen Curve berühren, vereinigen sich die beiden Lichtbogen in einen einzigen.

86. Wenn wir den Endpunkt einer Elektrode auf der Oberfläche der Kugel fortführen, so ändert der Lichtbogen fortwährend Form und Lage. Die Länge des Bogens vermindert sich, wenn wir uns hierbei der epipolisch-magnetischen Curve annähern. Von einem Punkte dieser Curve aus geht keine magnetische Curve ins Innere der Kugel hinein. Wird ein solcher Punkt selbst von der Elektrode berührt, so bleibt das Licht auf der innern Fläche der Kugel, indem es sich zu zwei Strömen von ungleicher Stärke concentrirt, die, von der Berührungsstelle aus, auf der epipolischen Curve nach entgegengesetzter Richtung sich hinziehen. Diese Curve ist im vorliegenden Falle der in der Aequatorial-Ebene liegende, größte Kugelkreis, der durch unendlich viele magnetische Curven auf der Kugelfläche rechtwinklich geschnitten wird. Neben diesem doppelten epipolischen Lichtstromen besteht ungestört der freie Lichtbogen im Innern der Kugel fort, welcher der gleichzeitig berührenden zweiten Elektrode entspricht. Nur wenn beide Elektroden die Kugel in Punkten der epipolisch-magnetischen Curve berühren, vereinigen sich zwei epipolische Doppelströme in einen einzigen Doppelstrom, der die Lichtintensität der beiden früheren in sich vereinigt ¹⁾

Bonn den 15. Juli 1858.

- 1) Eine neue Reihe von mannigfaltigen Beobachtungen, auf die ich mich zum Theil schon bezogen habe, wird in Heft IX nachfolgen. Eine solche war bereits für den Druck zusammengestellt, als die neuen Gesichtspunkte, die ich in der gegenwärtigen Abhandlung entwickelt habe, über mannigfaltige von mir zuerst beobachtete Erscheinungen plötzlich ein volles Licht verbreiteten. Dadurch wird eine neue Redaction eines Theiles der frühern Zusammenstellung nothwendig.