8. Ueber unipolare Induction und den Pohl'schen Versuch; von Ernst Lecher.

Die Erscheinungen der unipolaren Induction wurden in verschiedener Weise zu erklären versucht, entweder durch Einführung von Fernwirkungen oder mittels der Kraftlinien Faraday's. Des Letzteren Anschauungen traten immer mehr in den Vordergrund, besonders durch das riesige Anwachsen der Elektrotechnik, welche — sehr zu ihrem Vortelle — in den einschlägigen Gebieten ausschliesslich mit Kraftlinien zu arbeiten gewohnt ist. In der rein wissenschaftlichen Physik aber ist oft ein Vermengen dieser beiden Auffassungen eingetreten und selbst Lehrbücher ersten Ranges und neuesten Datums zeigen — wohl um pädagogische Schwerfälligkeiten zu meiden — gewisse Rückfälle in liebgewonnene Fernwirkungsgewohnheiten.

Das Missverständnis zwischen Hrn. W. König¹⁾ und mir entspringt, wie ich glaube, einem solchen Confundiren zweier nicht immer ganz vereinbarer Ideenkreise.

Ich hielt es nämlich für dankbar, strenge auf dem Standpunkte Faraday's zu bleiben. Dabei denke ich an die späteren Arbeiten dieses Forschers, dessen Begriffe von Kraftlinien sich ja erst allmählich ausbildeten.²⁾ Als hinreichender Ausgangspunkt diene mir der einzige Satz: *Eine elektromotorische Kraft entsteht, wenn ein Leiter Kraftlinien schneidet.*

Ich trat gegen jene Fassung des Biot-Savart'schen Elementargesetzes auf, wonach ein Magnetpol längs den Kraftlinien um einen linearen Leiter rotire.³⁾ Hier ist der Fernwirkungsbegriff des „Poles“ mit dem Faraday'schen Kraftlinienbegriffe in einer zwar pädagogisch unendlich bequemen, aber nicht einwandfreien Weise verknüpft.

1) W. König, Ann. d. Phys. 2. p. 854. 1900.

2) E. Lecher, Wied. Ann. 69. p. 784. 1899.

3) E. Lecher, Wied. Ann. 54. p. 282. 1895; 69. p. 781. 1899.

Vermutung über die Angriffspunkte der Kräfte.

Wenn wir sagen, dass Kraftlinien nur auf Kraftlinien wirken können, so würde es oft schwer fallen, die Richtungen und Angriffspunkte der Kräfte genau anzugeben. Es erscheint mir besser an jenen Stellen, wo die Kraftlinien eines Systems mit einem zweiten Leiter (oder Magneten) in Berührung kommen, die Angriffspunkte der Kräfte zu suchen. *Man fasse aber immer zuerst den Vorgang der Induction ins Auge.* Ich will diesen Grundsatz an drei Beispielen erläutern:

a) Betrachten wir zuerst die ponderomotorische Wirkung zweier stromdurchflossener Leiter I und II aufeinander.

Um über den Angriffspunkt der Kräfte Aufschluss zu erlangen, sei Leiter I zunächst stromlos, hingegen Leiter II stromdurchflossen; es sind somit nur die von II erzeugten Kraftlinien vorhanden. Bei einer relativen Bewegung von I gegen II werden somit (im allgemeinen) durch den Leiter I die Kraftlinien von II geschnitten und in I ein Strom inducirt, dessen Entstehungsursache zunächst einen Contact der Kraftlinien von II mit dem Leiter I voraussetzt; es ist also jedenfalls — örtlich — in I die Entstehungsursache des inducirten Stromes zu suchen.

Denken wir nun an die analoge ponderomotorische Wirkung von I gegen II, so liegt sicher — örtlich — an derselben Stelle der Sitz der Wirkung. Ein Strom in I drückt die Kraftlinien von II hinaus und den mit diesen Kraftlinien verbundenen Leiter.¹⁾

Es scheint selbstverständlich, dass bei dieser Schlussweise I und II vertauscht werden können; dies ist meistens, aber nicht immer der Fall.

1) Für die unipolare Induction, d. h. für eine Drehung des Magneten um seine Axe, wobei das äussere Feld im Raume unverändert bleibt, leugnete ich ein starres Festsitzen der Kraftlinien an den Magneten (Wied. Ann. 54. p. 276. 1895). Für *translatorische* Verschiebungen eines Magneten habe ich dergleichen nie behauptet. Ob ich eine Schlinge über einen ruhenden Magnet schiebe, oder den Magneten in die ruhende Schlinge stecke, ist für die Inductionerscheinungen gleich. Die einzelne Kraftlinie ist durch Längs- und Querkräfte zwischen ihren Nachbarlinien eingebettet und erhält dadurch bei translatorischen Bewegungen des Magneten eine Art von starrer Verbindung mit dem Magneten.

b) Betrachten wir nun in gleicher Weise die Wirkung eines Stromes auf einen Magneten, z. B. die Oersted'sche Ablenkung einer Magnetnadel.

Es sei wieder zuerst der Leiter stromlos, also nur die Kraftlinien des Magneten vorhanden. Ein Drehen desselben wird durch das Schneiden der Kraftlinien im Leiter Strom induciren. Also muss auch die ponderomotorische Ablenkung der Nadel durch einen Strom sich so erklären lassen, dass der stromdurchflossene Leiter die mit ihm in Berührung befindlichen Kraftlinien und so den mit seinen Kraftlinien fest verbundenen Magneten hinausdrückt.

Kann man hier nicht auch sagen, dass die Kraftlinien des Stromes mit dem Magneten in Contact sind und denselben drehen?

Um diese Frage zu beantworten, denken wir uns die Magnetnadel durch ein Solenoid ersetzt. Dann sehen wir gleich, dass jetzt bei einer entsprechenden mechanischen Drehung des stromlosen Solenoides die Kraftlinien des stromdurchflossenen Leiters das Solenoid schneiden und in demselben Strom induciren. Wir müssen also obige Frage mit Ja beantworten.

Wir können somit hier den Angriffspunkt der Kräfte im Leiter oder im Magneten suchen.

c) Es sei nun aa' ein linearer Leiter und ns ein Magnet mit den punktirt gezeichneten Kraftlinien (vgl. Fig. 1).

Bei einer mechanisch eingeleiteten Bewegung des stromlosen Leiters aa' gegen ns werden (im allgemeinen) Kraftlinien geschnitten werden, es ist also an jener Stelle, wo die Kraftlinien mit aa' in Contact treten, der Sitz der Wirkung zu suchen. Ebenso muss auch bei einer Umkehrung der Erscheinung, bei einer ponderomotorischen Wirkung zwischen Strom und Magneten der Angriffspunkt der Kraft in aa' gesucht werden. Von oben gesehen sei a der Leiter, n das Magnetende und k eine vom Magnetende ausgehende Kraftlinie (vgl. Fig. 2). Wenn nun durch aa' ein Strom geht, so entsteht nach meiner Meinung kein Drehungsmoment, sondern zunächst eine Kraft α , welche auf den Leiter wirkt und als Reaction eine ebenso grosse Kraft α' , welche die Kraftlinie wegzuschieben sucht. k wirkt wie eine starre Verbindung mit n ; es entsteht

wohl ein Drehungsmoment, wenn a um n drehbar ist, nicht aber wenn die Drehungsaxe des Systems in a liegt.

Könnte man aber nicht auch hier die Sache so auffassen, dass die Kraftlinien des stromdurchflossenen $a a'$ auf das Magnetende n wirken und dasselbe im Kreise herumführen?

Zur Beantwortung dieser Frage gehen wir so vor, wie eben vorhin. Ersetzen wir in Fig. 1 den Magnet ns durch ein entsprechendes Solenoid und nehmen wir an, es sei $a a'$ stromdurchflossen, das Solenoid aber stromlos. Wenn ich jetzt den Leiter $a a'$ um das Solenoid drehe, oder umgekehrt, so wird im Solenoid *kein Strom* inducirt. Wir haben also für diesen Fall im Solenoid keinen Sitz einer Kraftwirkung zu

Fig. 1.

Fig. 2.

suchen; die in Fig. 2 dargestellte Skizzirung der Kraftwirkungen ist die einzig mögliche. Es wird also auch das Solenoid (oder der Magnet) nicht um $a a'$ rotiren.

Ich habe in der Ueberschrift dieses Abschnittes den Ausdruck „Vermutung“ gebraucht, weil diese meine Anschauungen vielleicht einmal der Prüfung durch den Versuch werden zugänglich sein. Die Schwierigkeit eines Experimentes liegt in einer einwandfreien Stromzuführung nach a und a' .

Es sind aber diese meine Vorstellungen für das Endergebnis dieser Publication nicht unbedingt notwendig. Dieselben scheinen mir sehr verführerisch, weil sie mich jener mechanisch äusserst unsympathischen Kräfte entraten lassen, deren Richtung nicht als Verbindungslinie der wirkenden Punkte auftritt. Das Drehungsmoment entsteht durch eine starre Verbindung wie beim Hebel und in ähnlichen Fällen.

Unmöglichkeit der Rotation eines Poles um einen linearen
Leiter nach Faraday.

In den Figg. 1 und 2 ändere ich nach der Fernwirkungstheorie nichts Wesentliches, wenn ich statt eines Poles deren mehrere rund herum um den Leiter anbringe. So gelange ich zur unipolaren Induction.

Es sei aa' der Leiter und $n \dots n$ magnetische Nordpole, $s \dots s$ magnetische Südpole (vgl. Fig. 3). Nach dem Biot-Savart'schen Elementargesetze müsste, wenn $n \dots n$ um aa' als Axe rotirt, in aa' ein Strom inducirt werden. *Nach Faraday ist das absolut unmöglich, da durch aa' auch nicht eine einzige Kraftlinie geht.*

Fig. 3.

Beim Pohl'schen Versuche liegen die Verhältnisse ähnlich, besonders augenfällig, wenn man zwei Magnete nimmt und „dafür sorgt, dass die Pole möglichst nahe an a sich befinden“. ¹⁾ Dadurch werden ja nach Faraday die Kraftlinien von aa' weggedrückt. —

Wie sieht aber die Sache bei Verwendung nur eines Magneten aus?

Derselbe hat bei der Drehung um aa' sowohl eine translatorische Bewegung, als auch eine Rotation um die Magnetaxe. Nehmen wir die Kraftlinien als ganz starr mit dem Magneten verbunden an (Preston), so tritt, wie auch Hr. König zugegeben hat, kein Schneiden der Kraftlinien ein. Nehmen wir aber an, es seien die Kraftlinien unabhängig von der Rotation des Magneten um die Magnetaxe, so kann das bei der gleichzeitigen Raumveränderung der Magnetaxe nur den Sinn haben, dass diese Kraftlinien an der Rotation des Magneten um die Magnetaxe keinen Anteil haben, d. h. immer nach derselben Weltrichtung orientirt bleiben, aber doch gleichzeitig mit dem Magneten sich translatorisch weiterbewegen. Es stelle Fig. 4 den Pohl'schen Versuch dar. b ist die gewöhnliche Hg-Rinne, c eine viel weitere. (Man denke sich in der schematischen Zeichnung sowohl b als c um aa' als Axe im Kreise herumgeführt.) Es sei zuerst die Leitung $aa'cy$

1) P. Drude, Physik des Aethers p. 76. 1894.

geschlossen. (z sei nicht vorhanden.) Dann würden die (punktirt gezeichneten) Kraftlinien nach dieser Auffassung bei einer mechanischen Drehung des Magneten um aa' als Axe den Leiter schneiden und zwar die Kraftlinien links von ns in entgegengesetzter Richtung wie die Kraftlinien rechts von ns , es werden also zwei gleich grosse, entgegengesetzte Ströme inducirt, welche sich aufheben.¹⁾ Die Sache wird gleich anders, wenn die Leitung $aa'bz$ geschlossen wird (y sei jetzt nicht vorhanden). Dann wird die früher bestandene Symmetrie ge-

Fig. 4.

stört und das Nicht-Schneiden der Kraftlinien in z ²⁾ erzeugt bei einer Rotation des Systems um aa' einen Induktionsstrom.

Man kann die Sache auch so auffassen: Das stromdurchflossene $aa'bz$ ist eine magnetische Doppelfläche. Wäre dieselbe fest mit n verbunden, so kann keine Wirkung auftreten. Nun ist beim Pohl'schen Versuche aa' (weil in unveränderter Entfernung) und $a'b$ fest mit dem Magneten verbunden, es tritt also nur die Restwirkung von bz und za auf. Die Ursache der Pohl'schen Rotation ist im Drahte z zu suchen. Mache ich aber die magnetische Doppelfläche sehr gross, $aa'cy$ (z sei

1) Ob die Stromleitung quer durch das Eisen des Magneten geht, oder aussen herumgeführt wird, ist gleichgültig sowohl nach Preston als auch nach Faraday.

2) W. König, Ann. d. Phys. 2. p. 855. 1900. „Es soll die Ursache der Rotation im Drahte z zu suchen sein. Es ist mir ganz unverständlich, was Hr. Lecher mit diesem Ausspruche meint.“

jetzt nicht vorhanden), so liegt der nicht mit dem Magneten fest verbundene Teil y so weit, dass fast gar keine Kraftlinien durch y gehen und daher fast keine Wirkung auftreten kann.

Ich habe diese in Fig. 4 schematisch dargestellte Anordnung ausgeführt. b war die gewöhnliche Hg-Rinne des Pohl'schen Apparates, c aber eine Hg-Rinne mit etwa 40 cm Radius. Die Reibung ist in dieser Rinne so gross, dass die Beobachtung ponderomotorischer Wirkungen ausgeschlossen war. Wohl aber lassen sich trotz Störungen durch die Kraftlinien der Erde und durch Thermoströme Inductionswirkungen ganz deutlich beobachten. Bei einer mechanischen Drehung des Systems um 45° wurde (nach Abrechnung der Fehlerquellen) in $aa'bz$ ein Ausschlag von etwa 19 Scalenteilen, in $aa'cy$ aber ein solcher von höchstens 2 Scalenteilen im Mittel gemessen. — Dieses Resultat widerspricht vielleicht nicht der Auffassung, wohl aber der Darstellungsweise von Hrn. König¹⁾ und anderen.²⁾

Unmöglichkeit der Rotation eines Poles um einen linearen Leiter nach König.

Mein von Hrn. König angegriffenes Experiment³⁾ ist — für sich allein betrachtet — allerdings nicht beweisend. Der Strom geht hier von aa' in den Magneten, und durch dessen obere Hälfte in der gezeichneten Weise (Fig. 5) in die Hg-Rinne w . Bei einer Umdrehung um aa' als Axe wird sowohl in aa' als auch in der oberen Axe des Magneten dieselbe elektromotorische Kraft inducirt, aber in einander auf-

1) W. König, Ann. d. Phys. 2. p. 856, Zeile 1—20 von oben, 1900.

2) Es ist ja selbstverständlich, dass eine eingehende Anwendung des Biot-Savart'schen Gesetzes unter *Berücksichtigung des ganzen Stromkreises* ein richtiges Resultat giebt. Es ist aber wohl Biot selbst die Ursache der allgemein üblichen, falschen Darstellung. (Vgl. Experimentalphysik von J. B. Biot, übersetzt von G. Th. Fechner, Leipzig, Voss 1829. IV. p. 160, Zeile 16—24 von oben und p. 201.) Nach ihm wäre der Leiter $a_1 b z$ und $a_1 b c$ (er nennt denselben in einem analogen Versuche $FF'Z$) *ohne Einfluss auf die Bewegung*. — Auch König und fast alle Lehrbücher haben sich von dieser Anschauungsweise nicht, oder mindestens nicht so vollständig emancipirt, dass nicht Missverständnisse möglich wären.

3) E. Lecher, Wied. Ann. 69. p. 783. 1899.

hebenden, entgegengesetzten Richtungen. Das ist in Kürze der König'sche Einwurf.¹⁾

Wenn ich gleichwohl den Versuch als der Veröffentlichung wert erachtete, so liegt der Grund darin, dass bei einer Drehung von n um aa' Magnet und Leiter nicht fest miteinander verbunden sind; hingegen bildet Magnetpol s und der daselbst nach oben gehende Leiter ein starres Ganzes. Mit Rücksicht auf diesen Unterschied erwäge man nun König's Darstellung des Fleischmann'schen Versuches.²⁾ Hier ist nach Hrn. König der Fall so, dass man einen linearen Leiter und nebenan einen Pol hat, der andere Pol ist eliminirt. „Einen völligen Ausschluss der Einwirkung des Stromes auf die einen Pole der Magnet-systeme erreicht man, wenn man nach Fleischmann den Stromleiter röhrenförmig bildet und die einen Pole in das Innere der Röhre hineinführt, dann entspricht das auf die äusseren Pole wirkende Feld genau dem Feld eines linearen Stromleiters.“³⁾ Hier hätten wir also nach König den Fall unserer Fig. 1 idealisirt: linearer Stromleiter und nur ein Magnetpol. Der Versuch ergibt:

Fig. 5.

1. Rotation des Magnetpoles um den festgehaltenen Leiter;
2. Rotation des Leiters um seine Axe bei festgehaltenem Magneten (Reaction der Wirkung 1);
3. Ausbleiben jeder Drehung, wenn Magnet und Leiter fest verbunden sind.

Acceptirt man also — und das hätte ich vielleicht in meiner letzten Publication stärker betonen sollen — die übliche Darstellung vom Rotiren eines Poles längs den Kraftlinien, so ergibt mein Versuch (Fig. 5) ein Resultat, welches ganz unerwartet sein musste und das unmöglich als „selbstverständlich“ erscheinen durfte. Nach dem König-Fleischmann'schen Versuche kann bei s keine Rotation eintreten (Magnetpol und Leiter fest verbunden), wohl aber bei aa' (wo keine fixe Verbindung ist). — Dass dem nicht so ist, zeigt eben mein Versuch.

1) W. König, Ann. d. Phys. 2. p. 857. 1900.

2) L. Fleischmann, Wied. Ann. 60. p. 519. 1897.

3) W. König, Ann. d. Phys. 2. p. 856. 1900.

Es wird mir somit unmöglich, die Folgerung zu umgehen, dass die König'sche Auffassung¹⁾ der besprochenen Experimente nicht einwandsfrei zu sein scheint, während die von mir vertretene Darstellung mittels Kraftlinien sowohl den König-Fleischmann'schen Versuch als auch alle anderen mir bekannten einschlägigen Erscheinungen einfach zu übersehen und zu erklären gestattet.

Ich glaube zu folgenden zwei Schlüssen kommen zu müssen:

1. Die alte Biot-Savart'sche Vorstellung von der Rotation eines Poles um einen linearen Leiter *ohne Berücksichtigung der Zuleitungsdrähte* widerspricht den experimentellen Ergebnissen.

2. Die landläufige Erklärung des alten Pohl'schen Versuches mittels Rotation des Poles längs den Kraftlinien des linearen Mittelleiters ist unhaltbar. Diese Drehung erfolgt vielmehr durch Wirkung der bisher meist unbeachtet gebliebenen seitlichen Zuleitungen.

St. Georgen a. L., 1. September 1900.

1) Diese König'sche Auffassung und eventuelle Consequenzen derselben veranlassten mich zu einigen Experimenten, welche alle versagten. Vgl. Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Wien **108**. p. 980. 1899.

(Eingegangen 5. September 1900.)