

Ampères Motor: Seine Geschichte und die Kontroverse bezüglich seiner Funktionsweise¹

A. K. T. Assis⁺

Institute of Physics ‘Gleb Wataghin‘

University of Campina - UNICAMP, 13083-859 Campinas, SP, Brazil

J. P. M. C. Chaib⁺⁺

Curso de Física, Universidade Católica de

Brasilia - UCB, 71966-700 Taguatinga, DF, Brazil

American Journal of Physics, Vol. 80, pp. 990-995 (2012). DOI: 10.1119/1.4746698.

Übersetzung: Hermann Härtel

Zusammenfassung

Im Jahr 1822 erfand Ampère eine neue Art von Motoren, in dem es ihm gelang, einen zylinderförmigen Magneten rotieren zu lassen. Dies gelang, in dem er ihn mit einer Batterie verband, die ihrerseits einen konstanten Strom lieferte. In der heutigen Zeit ist es einfach, einen solchen Motor im Klassenzimmer vorzuführen. Dazu benötigt man nur einen Neodymium Magneten, eine Batterie, einen Stahlnagel und ein kurzes Kupferkabel. Aber obgleich es sehr einfach ist, die Rotation zu beobachten, wird über eine Erklärung dieses Vorganges noch immer gestritten. Die vorliegende Arbeit stellt die Geschichte dieses Motors dar unter Einschluß einer Kontroverse zwischen Ampère und Faraday bezüglich dessen Funktionsweise, sowie eine moderne Erklärung auf der Basis des Feldkonzeptes.

Die Vorführung dieses Motors im Klassenzimmer ist wegen des zu erwartenden positiven Lernerfolges sehr zu empfehlen.

1. German translation of the paper by A. K. T. Assis and J. P. M. C. Chaib, “Ampère’s motor: Its history and the controversies surrounding its working mechanism”, American Journal of Physics, Vol. 80, pp. 990-995 (2012). DOI: 10.1119/1.4736698.

German translation by H. Härtel, haertel@astrophysik.uni-kiel.de

Einführung

Es gilt allgemein als didaktisch wertvoll, sowohl Informationen über die Geschichte der Physik zu vermitteln, als auch die Durchführung von Freihandversuchen (hands-on experiments) im Klassenzimmer zu ermöglichen¹. Dabei sind besonders solche Experimente geeignet, die mit einfachen Mitteln herzustellen und deren beobachtbare Effekte augenfällig sind.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Konstruktion vorgestellt, die sehr treffend als „der einfachste Motor“ bezeichnet wurde.^{2,3} Eine andere Bezeichnung ist „Unipolar-Motor.“^{4,7}

Die Einfachheit dieser Konstruktion ist hier von Interesse. Daneben aber wird die faszinierende Geschichte dieses Motors vorgestellt, die nahezu 200 Jahre zurückreicht. Damals gab es eine wichtige Kontroverse zwischen Ampère und Faraday bezüglich der Funktionsweise dieser Konstruktion. Deren gegensätzliche Auffassung wird kontrastiert mit der heutigen, auf dem Feldkonzept basierenden Erklärung.

Diese unterschiedlichen Interpretationen des gleichen beobachtbaren Effektes eignen sich sehr gut für eine Diskussion im Klassenzimmer.

II. Der „einfachste“ Motor

Schüler sind in der Regel fasziniert von Motoren. Einer der einfachsten elektrischen Motoren, der äußerst einfach im Klassenzimmer vorgeführt werden kann, besteht aus nur 4 Komponenten: einem zylinderförmigen Neodymium-Magneten, einer Gleichstromquelle, (z.B. eine 4,5 Volt Stabbatterie), einem Eisennagel oder einer Schraube und einem kurzen Kupferdraht (siehe Abb.1)

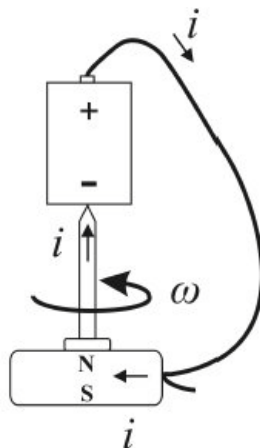


Abb. 1. Der „einfachste“ Motor. Fließt ein Gleichstrom i durch den Leiterkreis, so rotieren Nagel und Magnet zusammen relativ zur Umgebung mit der Winkelgeschwindigkeit ω .

Die Stärke des Magneten übertrifft das eigene Gewicht zusammen mit dem des Nagels bei weitem und reicht sogar noch aus, um Magnet und Nagel zusammen an dessen Spitze in senkrechter Position an dem ferromagnetischen Boden der Batterie „anzuheften“.

Hält man die Batterie in der Hand, verbindet das eine Ende des Kupferdrahtes mit dem oberen Pol der Batterie und berührt mit dem anderen Ende die zylinderförmige Seite des Magneten, so wird der Stromkreis geschlossen und es fließt ein konstanter Strom durch den Magneten.

Sofort beginnen Magnet und Nagel sehr rasch um ihre vertikale Achse zu rotieren. Eine Rotation findet nicht statt, wenn das Drahtende den unteren flachen Boden des Magnet in der Mitte berührt.

III. Feld-Konzept-basierte Erklärung

Die Erklärung der Funktionsweise dieses Motors erfolgt typischerweise an Hand von Abb.2^{2,3,5,8}

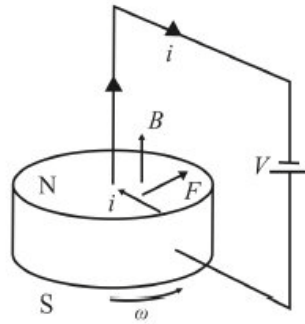


Abb. 2. Die Kraft \vec{F} wirkt auf den Magneten, erzeugt durch die Wechselwirkung von Magnetfeld \vec{B} des Magneten und radialem Strom i .

Der Magnet erzeugt ein Magnetfeld \vec{B} , welches im wesentlichen im Inneren des Magneten homogen und parallel zur Magnetachse ausgerichtet ist. Auf Grund der Lorentzkraft erfährt jedes radiale Stromelement idl der Länge $|dl|$ und der Stromstärke i eine Kraft $d\vec{F}$, gegeben durch

$$\vec{F} = id\vec{l} \times \vec{B}. \quad (1)$$

Die Richtung dieser Kraft wird bestimmt durch die „Rechte-Hand-Regel“, senkrecht zum magnetischen Feld und zur Richtung des Stromes.

Diese Kraft erzeugt ein Drehmoment, das auf den Magneten einwirkt und ihn um seine Achse rotieren lässt.

Für eine Situation wie in Abb.1 bewirkt diesen Drehmoment eine Rotation des Magneten, von oben betrachtet im Gegenuhrzeiger-Sinn. (siehe Abb.2)

IV. Zur Vorgeschichte dieses Motors

Um die Entwicklung zu verstehen, die zur Entdeckung des Ampèreschen Motors geführt hat, ist es wichtig, zunächst den ersten elektrischen Motor in der Geschichte der Physik zu diskutieren, der von Faraday (1791–1867) vorgestellt wurde.^{9,10}

In der Folge der historischen Entdeckung Oersteds (1820) bezüglich der Ablenkung einer magnetisierten Nadel durch einen langen stromführenden Draht, wendete sich Faraday dem Studium des Elektromagnetismus zu. Im September des Jahres 1821 entwickelte er ein Gerät, das üblicherweise als erster Motor überhaupt angesehen wird.¹¹ Die Abb.3 zeigt schematisch zwei Versionen seiner Motoren.

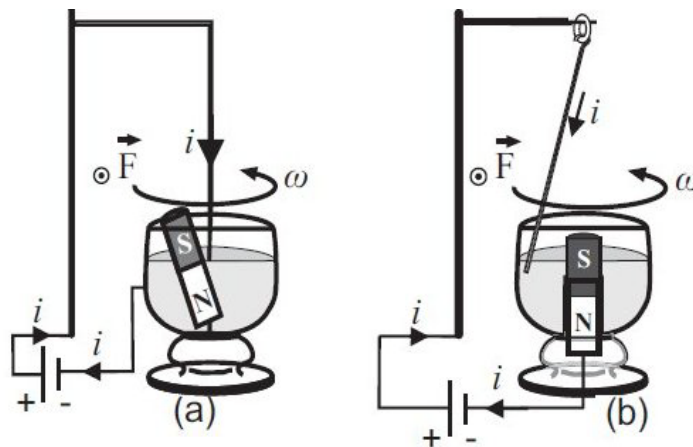


Abb. 3. Vereinfachte Darstellung von Faradays Motoren.

(a) Der obere Pol des Magneten rotiert um den vertikalen feststehenden Leitungsdraht.

(b) Das untere Ende des Leitungsdrahtes rotiert um den feststehenden Magneten.

In beiden Fällen werden mit Quecksilber gefüllte Behälter verwendet. Ein konstanter Strom längs des Leiters fließt durch das Quecksilber und entlang des Magneten. In Abb.3(a) rotiert der obere Magnetpol um den feststehenden vertikalen stromführenden Draht. In Abb.3(b) rotiert das untere Ende des schräg verlaufenden Drahtes um den feststehenden vertikalen Magneten. Faraday sandte ein kleines Modell dieses Apparates an verschiedene Wissenschaftler, einschließlich Ampère. In diesem Modell rotierte der schräg verlaufende Leiterdraht um ein feststehendes magnetisiertes Metallstück

Kürzlich hat Hottecke ein historisches Modell des beschriebenen Motors hergestellt und didaktische Implikationen dieses Gerätes diskutiert.¹²

Faraday informierte Ampère über seine Erfindung im Oktober 1821. In der ersten Veröffentlichung zu dem Gerät schrieb er folgendes^{9,10}:

Having succeeded thus far, I endeavoured to make a wire and a magnet revolve on their own axis by preventing the rotation in a circle round them, but have not been able to get the slightest indications that such can be the case; nor does it, on consideration, appear probable.

„Nachdem ich soweit gekommen war, bemühte ich mich darum, den Draht und den Magneten um die jeweilige eigene Achse rotieren zu lassen, habe aber nicht das kleinste Anzeichen dafür entdecken können, daß dies erreicht werden kann. Auch scheint es nach einigem Nachdenken wenig wahrscheinlich, daß dies gelingen kann“. [Übersetzung HH]

André-Marie Ampère (1775–1836) hatte ebenfalls nach Oersteds Entdeckung damit begonnen, sich mit dem Elektromagnetismus zu beschäftigen. Sein Ansatz war ein völlig anderer als der von Oersted und Faraday. Ampère schuf ein ganz neues Forschungsfeld, das er als „Elektrodynamik“ kennzeichnete.¹³⁻¹⁷ Er setzte sich zum Ziel, alle elektrischen und elektromagnetischen Phänomene als Wechselwirkung zwischen elektrischen Strömen deuten zu können.

Unter dieser Zielsetzung postulierte er die Existenz mikroskopisch kleiner oder molekularer elektrischer Ströme innerhalb von Magneten als Ursache für deren Magnetismus. Ebenfalls als Erster sagte er Drehmomente und Kräfte zwischen stromführenden Leitern ohne Anwesenheit von Dauermagneten voraus und beobachtete sie auch. Sein Hauptziel bestand darin, ein zwischen Stromelementen wirksames Kraftgesetz zu finden, das als Erklärung dienen könnte für die Wechselwirkung zwischen zwei Strömen, zwischen einem Strom und einem Magneten sowie zwischen zwei Magneten. Er erreichte dieses Ziel im Jahr 1822.¹⁸⁻²⁰

Faraday versuchte, mit Hilfe eines Gleichstroms einen Magneten um seine eigene Achse rotieren zu lassen, ohne Erfolg. Er war schließlich der Meinung, ein solcher Effekt sei wenig wahrscheinlich.

Ampère dagegen sagte die Existenz eines solchen Effektes voraus, wobei er sich auf eine vorläufige Version seines Kraftgesetzes stützte. Es gelang ihm als Erster, die Rotation eines Magneten um seine eigene Achse zu demonstrieren; er führte dies Experiment zwischen November und Dezember 1821 aus. Im Januar 1822 präsentierte er es der Akademie der Wissenschaften^{13,19}

Eine vereinfachte Version des Ampère-schen Motors zeigt Abb. 4.

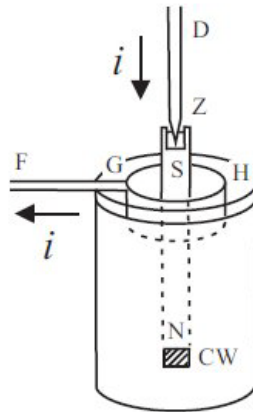


Abb. 4. Schematische Darstellung von Ampères Motor.

Der zylinderförmige Magnet NS schwimmt in flüssigem Quecksilber; auf Grund eines Gegenwichtes CW am unteren Ende wird seine senkrechte Position ermöglicht.

Am oberen Ende befindet sich eine kleine, mit Quecksilber gefüllte Schale. Ein Gleichstrom i fließt von oben längs des Leiters und verläßt ihn seitlich durch GF.

Ein metallischer Ring schwimmt in dem Quecksilber. In dieser Konfiguration rotiert der Magnet um seine Achse

V. AMPÈRES ERKLÄRUNG

Ampères Konzept der Elektrodynamik basierte auf einer Kraft, die direkt die Wechselwirkung zwischen zwei Stromelementen beschreibt, die längs deren Verbindungslinie wirksam wird und stets dem Newtonschen Axiom „Aktio = Reaktio“ entspricht.¹⁹⁻²³

Um die Funktionsweise seines Motors zu erklären, betrachtete Ampère im wesentlichen die Wechselwirkung zwischen mikroskopischen Strömen innerhalb des Magneten (verantwortlich für den Magnetismus) und den durch die Batterie erzeugten makroskopischen Strom, der von außen durch den Magneten fließt.

Eine schematische Wiedergabe dieses Gerätes zeigt Abb. 5

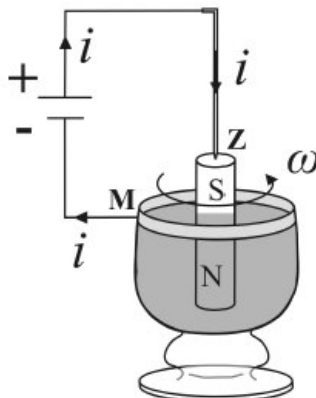


Abb. 5. eine schematische Wiedergabe des Ampèreschen Motors.

Ampère erklärte die Drehung des Magneten, indem er sich auf das Konzept von Aktio und Reaktio zwischen Stromelementen stützte. Insbesondere betrachtete er die Wechselwirkung zwischen dem makroskopischen Strom i , der, von der Batterie angetrieben, durch den Stromkreis fließt und den mikroskopischen Strömen i' , die um die Moleküle innerhalb des Magneten fließen.

Ampère präsentierte eine Erklärung der Funktionsweise seines Motors anhand einer Zeichnung,

ähnlich wie Abb. 6

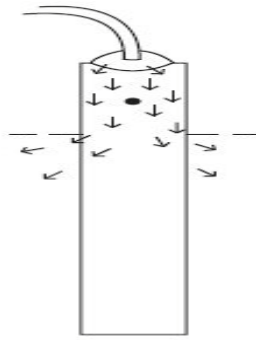


Abb. 6. Der mikroskopische Strom i' des Magneten und der externe radiale Strom i des Magneten fließen innerhalb (Z_m) und außerhalb (mM) des Magneten mn'

Der innere Kreis stellt einen Querschnitt des zylinderförmigen Magneten in der Aufsicht dar. Der tangentielle Strom i' repräsentiert den gesamten mikroskopischen oder molekularen Strom des Magneten, der nach Ampères Auffassung seine magnetischen Eigenschaften bewirkt. Das Gebiet zwischen innerem und äußerem Kreis ist mit Quecksilber gefüllt. Der äußere Kreis Mfc' repräsentiert den in Quecksilber schwimmenden Ring, der den Magneten umschließt. Der radiale Strom i längs des Radius Z_mM ist der makroskopische elektrische Strom, der nach Anschluß der Batterie durch den Leiterkreis fließt. Er tritt am oberen Ende in den Magneten ein und verläßt ihn radial. Zu betonen ist hier die Tatsache, daß sich der Stromanteil Z_m dieses radialen Stromes i innerhalb des Magneten befindet, während der Anteil mM in dem Quecksilber außerhalb des Magneten verläuft.

Ampères Erklärung lautet folgendermaßen:^{13,16,17}

Let ZM be one of these currents [from the external circuit]. The Z_m portion does not act upon the [microscopic] electric currents of the magnet. The mM portion attracts mn' and repels mn . These combined forces make the magnet turn around its axis in the $n'mn$ direction. Similar forces are exerted simultaneously upon all points of the magnet, so that it turns indefinitely around itself.²⁴

Sei ZM eines dieser Ströme (des externen Leiterkreises). Der Z_m -Teil wirkt nicht auf die (mikroskopischen) Ströme des Magneten ein. Der mM -Teil dagegen zieht mn' an und stößt mn ab. Die Kombination dieser beiden Kräfte bewirkt die Rotation des Magneten um seine Achse in der $n'mn$ -Richtung. Entsprechende Kräfte wirken gleichzeitig auf alle Punkte des Magneten ein, so daß er kontinuierlich um seine Achse rotiert. [Übersetzung HH]

Diese Kräfte sind in Abb.7 angegeben.

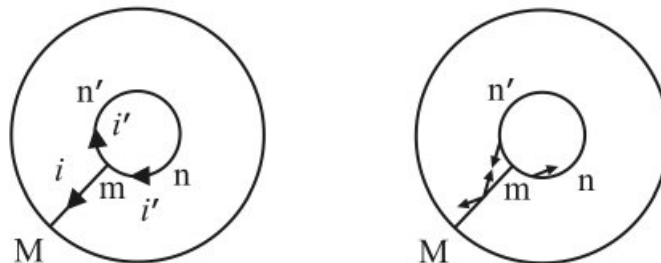


Abb. 7. (a) Die Pfeile kennzeichnen die tangentialen mikroskopischen Ströme i' , sowie die radialen makroskopischen, die außerhalb des Magneten fließen.

(b) Die Pfeile kennzeichnen den anziehenden Anteil des Aktio/Reaktio Paares die zwischen i' in dem Abschnitt mn' und i wirken, sowie die abstoßenden Kräfte des Aktio/Reaktio Paares zwischen i' in dem Abschnitt nm und i .

Ampère betrachtet hier nur die aller wichtigsten Kräfte zwischen dem externen radialen Strom i längs mM und dem internen mikroskopischen Strom i' längs mn' in tangentialer Richtung. Der Teil mM zieht den Teil mn' an und stößt den Teil nm ab.

Insgesamt ergibt die Kombination dieser Kräfte ein Drehmoment auf den Magneten und läßt ihn um seine Achse in der $n'mn$ Richtung rotieren.

In Abb. 7 sind ebenfalls die Reaktionskräfte angegeben, die von dem mikroskopischen Strom i' auf den externen makroskopischen Strom i ausgeübt werden. Aufgrund von „Aktio und Reaktio“ muß der mikroskopische Strom ein gegenläufiges Drehmoment auf den makroskopischen Strom aufbringen, der außerhalb des Magneten im Quecksilber fließt

Man kann ein qualitatives Verständnis bezüglich der Richtung der in Abb. 7 dargestellten Wechselwirkungen erhalten, wenn man die Ampèresche Kraft zwischen Stromelementen heranzieht. Um das Verständnis moderner Leser zu erleichtern, wird diese Kraft in Vektorschreibweise und in SI Einheiten wie folgt wiedergegeben: ²¹⁻²³

$$d^2\vec{F}_{21}^A = \frac{\mu_0}{4\pi} i_1 i_2 \cdot \frac{\hat{r}_{12}}{r_{12}^2} [2(d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2) - 3(\hat{r}_{12} \cdot d\vec{l}_1)(\hat{r}_{12} \cdot d\vec{l}_2)] = -d^2\vec{F}_{12}^A \quad (2)$$

In dieser Gleichung bedeutet $d^2\vec{F}_{21}^A$ die Ampèresche Kraft, die von dem Stromelement $i_2 d\vec{l}_2$, am Ort \vec{r}_2 auf das Stromelement $i_1 d\vec{l}_1$ am Ort \vec{r}_1 ausgeübt wird; die Konstante

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ kg m C}^{-2}$ ist die Permeabilität des Vakuums; $r_{12} = \left| (\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \right|$ entspricht der

Entfernung zwischen den beiden Stromelementen; und $\hat{r}_{12} = (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)/r_{12}$ entspricht dem

Einheitsvektor in der Richtung von $i_2 d\vec{l}_2$ auf $i_1 d\vec{l}_1$.

Besonders zu betonen ist die Tatsache, daß diese Kraft mit dem Prinzip „Aktio = Reaktio“ übereinstimmt, denn es gilt: $d^2\vec{F}_{21}^A = -d^2\vec{F}_{12}^A$. Außerdem ist diese Kraft stets längs der geraden Linie ausgerichtet, die die beiden Elemente verbindet, das heißt: längs \hat{r}_{12} .

Dies bedeutet daher, daß diese Kraft mit dem Newtonschen „Aktio = Reaktio“ übereinstimmt und zwar in seiner strengen Form. Diese Übereinstimmung gleicht derjenigen, die für die Newtonsche Gravitationskraft oder die elektrostatische Kraft zwischen zwei Punktladungen zutrifft. Das Wesentliche an Ampères Erklärung besteht in der Aussage, daß nur der derjenige Teil des makroskopischen Stromes i , der außerhalb des Magneten fließt, ein Drehmoment auf den im Innern fließenden mikroskopischen Strom i' ausübt.

Aus dem Prinzip „Aktio = Reaktio“ folgt dann, daß auch der mikroskopische Strom ein entgegengerichtetes Drehmoment auf den externen makroskopischen Strom ausüben muß.

VI. FARADAYS ERKLÄRUNG

Ampère sandte sein Papier an Faraday, der jedoch in seiner Antwort vom 2. Februar 1822 eine andere Erklärung bezüglich Ampères Motor präsentierte.¹⁹ Faraday stellte im Wesentlichen eine Analogie zu seinem eigenen Motor her, bei dem ein Leitungsdraht, wie in Abb. 3(b) um einen feststehenden Magneten rotiert.

Faradays Interpretation der Funktionsweise seines eigenen Motors basierte auf der Annahme, „es sei evident, daß jeder Pol die Kraft habe, eigenständig auf den Draht einzuwirken“.⁹

Weiterhin erfolge nach seiner Meinung diese Wechselwirkung nicht längs der geraden Verbindungslinie, sondern habe eine dazu senkrechte Orientierung, die die rotierende Bewegung bewirke. Zum Beispiel würde im Fall der Abb. 3 der Südpol des Magneten eine Kraft auf den

Strom aufbringen, der längst des Drahtes nach unten fließt. Diese Kraft sei senkrecht zu dem Papier auf den Leser zu orientiert.

Faraday wandte das gleiche Konzept an, um die Funktionsweise von Ampères Motor zu erklären. Aber statt anzunehmen, daß die magnetischen Pole auf den Strom in dem externen Leitungsdraht einwirkten, war er überzeugt, daß die Magnetpole auf die Ströme innerhalb des Magneten einwirkten. Abb. 8 verdeutlicht Faradys Erklärung zum Ampèreschen Motor.

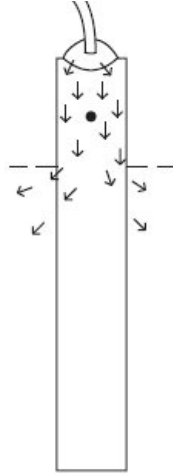


Abb. 8. Faradys Erklärung zum Ampèreschen Motor.

Der Gleichstrom tritt von oben durch einen Tropfen Quecksilber in den Magneten ein. Der schwarze Punkt repräsentiert den Südpol des Magneten, während die Pfeile den Strom anzeigen, der durch den Magneten in das umgebende Quecksilber fließt.

Faradys Erklärung zur Funktionsweise des Ampèreschen Motors lautet wie folgt:²⁵

„The rotation of the magnet seems to me to take place in consequence of the different particles of which it is composed being put into the same state by the passing current of electricity as the wire of communication between the voltaic poles, and the relative position of the magnetic pole to them. Thus the little arrows may represent the progress of the electricity. Then any line of particles parallel to them except that line which passes as an axis through the pole (represented by a dot) will be in the situation of the revolving wire and will endeavour to revolve round the pole and as all the lines act in the same direction or tend to go one way round the pole, the whole magnet revolves.“

Die Rotation des Magneten scheint mir eine Folge der Tatsache zu sein, daß die vielen Teile, aus denen er zusammengesetzt ist, durch den durchfließenden elektrischen Strom in den gleichen Zustand relativ zum magnetischen Pol versetzt werden, wie der Verbindungsdraht zwischen den voltaischen Polen. Die kleinen Pfeile mögen daher das Voranschreiten der Elektrizität darstellen. Dann befinden sich alle dazu parallelen Linien - mit Ausnahme der achsialen Linie durch den Magnetpol (gekennzeichnet durch den Punkt) in dem gleichen Zustand wie der rotierende Draht und werden sich bemühen, den Pol zu umrunden, und da alle Linien in der gleichen Richtung agieren oder bestrebt sind, den gleichen Pfad um den Pol herum einzuschlagen, rotiert der gesamte Magnet. [Übersetzung HH]

Abbildung 9 liefert eine Erläuterung der Faradayschen Erklärung.

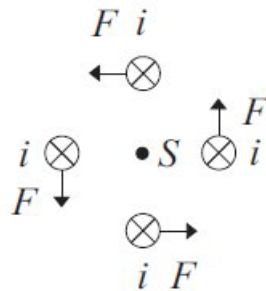


Abb. 9. Die Kräfte F werden durch den Südpol auf die von oben durch den Magneten fließenden internen Ströme i ausgeübt.

Der Buchstabe S repräsentiert den Südpol des Magneten. Die Kreuze repräsentieren die abwärts fließenden Ströme innerhalb des Magneten. Die Pfeile kennzeichnen die tangentialen Kräfte, die durch den Südpol auf die inneren Ströme ausgeübt werden. Nach Faraday würden diese angenommenen internen Kräfte insgesamt ein Drehmoment auf den Magneten ausüben, wodurch er im Gegenuhrzeiger-Sinn - von oben betrachtet - in Rotation versetzt wird

VII Kontroverse : Ampère versus Faraday

Ampère bemerkte sofort, daß Faradays Erklärung das dritte Newtonsche Gesetz „Aktio = Reaktio“ verletzt. Faraday nahm an, daß der Magnetpol auf die inneren Ströme einwirkte in der Form tangentialer oder quer verlaufender Kräfte. Dieses interne Drehmoment würde die Rotation des Magneten bewirken. Ampère ging in seiner Antwort an Faraday vom 10. Juli 1822 explizit auf diesen Punkt ein.²⁶

„As the action is always equal to the reaction, fundamental and clear principle of physics states that it is impossible that a rigid body be put into any kind of motion, due to a mutual action between two of its particles, as this action produces upon the two particles two equal forces which tend to move the body in opposite directions. From this it follows that, when the particles of a magnet traversed by an electric current which puts them into the same state as the conducting wire act upon the pole or upon any other portion of the magnet, there cannot result from this [interaction] any motion in this body, in the same way that the ensemble of a magnet and a conducting wire cannot move when they are rigidly connected together. From this observation, the rotation of a floating magnet around its axis can only be explained as I did in the Memoir of May of the Annales de Chimie et de Physique, which I sent to you recently through M. Dorckray of Manchester“.²⁷

Da die Aktion immer gleich der Reaktion ist, folgt als fundamentales Prinzip der Physik, daß es unmöglich ist, daß ein starrer Körper durch die gegenseitige Aktion zwischen zwei seiner Teile in irgendeine Art von Bewegung versetzt werden kann, denn durch eine solche Aktion werden auf die beiden Teile zwei gleich große Kräfte aufgebracht mit dem Bestreben, sie in die entgegengesetzte Richtung zu bewegen. Hieraus folgt, daß falls die stromdurchflossenen Teile des Magneten, die durch den Strom in den gleichen Zustand gebracht werden wie der stromführende Draht, auf den Pol oder auf irgend ein anderes Teil des Magneten einwirken, so kann hieraus [aus der Wechselwirkung] keine Bewegung des Körpers resultieren. Genau so wenig könnten Magnet und stromführender Leiter sich bewegen, falls sie fest miteinander verbunden wären. Hieraus folgt, daß die Rotation eines schwimmenden Magneten nur erklärt werden kann, wie ich es in den „Memoir of May of the Annales de Chimie et de Physique“ getan und Ihnen kürzlich durch Dorckray aus Manchester zugesandt habe.²⁷ [Übersetzung HH]

VIII. Bootstrap Effekt mit der zeitgemäßen Interpretation, basierend auf dem Feld-Konzept.

Eine zeitgemäße Erklärung der Funktionsweise des Ampèreschen Motors, basierend auf dem Feldkonzept, wurde im Abschnitt III vorgestellt. Sie unterscheidet sich von Ampères ursprünglicher Erklärung und auch von Faradays Modell.

Um den Gesichtspunkt Faradays mit einer modernen Interpretation in Übereinstimmung zu bringen, scheint es notwendig zu sein, das Konzept eines Magnetpols zu vermeiden und anzunehmen, daß das Drehmoment von Kräften bewirkt wird, die auf den im Innern in radialer horizontaler Richtung fließenden Strom einwirken.

Um den Gesichtspunkt Ampères mit einer modernen Interpretation in Übereinstimmung zu bringen, dürfte man nur die Wechselwirkung zwischen Stromelementen betrachten und müsste das Feldkonzept vermeiden.

Während Faraday glaubte, daß der Magnetpol auf in senkrechter Richtung fließende Ströme einwirke, basiert die moderne Erklärung auf einer Einwirkung des magnetischen Feldes auf interne Ströme in radialer horizontaler Richtung. Trotz dieses Unterschiedes teilt die moderne Interpretation einen wichtigen Punkt mit der Erklärung Faradays. Gemäß beider Erklärungen entsteht das Drehmoment auf Grund der Wechselwirkung zwischen internen Komponenten innerhalb des Magneten. Nach Faraday wirkt der Magnetpol auf interne, im Innern des Magneten fließende Ströme ein. In analoger Weise besagt die moderne Erklärung, daß das magnetische Feld auf interne, im Innern des Magneten fließende Ströme einwirkt.

In der gleichen Weise, wie Ampère die ursprüngliche Erklärung Faradays zurückwies, würde er sicherlich auch die moderne, auf dem Feldkonzept basierende Erklärung zurückweisen.

Schließlich basieren beide Erklärungen auf einem sogenannten „bootstrap“ Effekt - das heißt, auf ein sich selbst erhaltendes Drehmoment ohne Unterstützung von außen.

IX. Zu den entgegengerichteten Drehmomenten, die auf den externen makroskopischen Strom einwirken

Ampères Erklärung der Funktionsweise seines Motors steht dagegen im Einklang mit dem dritten Newtonschen Gesetz. Sein Kraftgesetz besagt, daß die Kraft zwischen zwei Stromelementen immer längs ihrer Verbindungslinien ausgerichtet ist (siehe Gleichung (2)).^{19,20} Wendet man somit die Ampèresche Kraft auf seinen Motor an, dann folgt, daß das auf den Magneten einwirkende Drehmoment durch den externen Strom ausgeübt wird. Dem Prinzip „Aktio und Reaktio“ zu Folge muß der Magnet ein entgegengerichtetes Drehmoment auf den externen Strom aufbringen.

Ist es möglich, dies entgegengerichtete Drehmoment auf den externen Strom zu beobachten? Im Zuge der Verteidigung seines Standpunktes zitierte Ampère Experimente, die von Davy durchgeführt wurden.²⁸ Diese zeigten die Bewegung des Quecksilbers in die der Bewegung des Magneten entgegengesetzte Richtung.

Heutzutage können die auf den externen Strom einwirkenden entgegengerichteten Drehmomente leicht beobachtet werden. Hierzu ist es notwendig, den Magneten zusammen mit der Batterie gegenüber dem Labor zu fixieren, während der externe Leiterkreis relativ zum Labor frei rotieren kann. Extrem einfache Anordnungen sind in der Literatur vorgeschlagen worden, die die Wirkung dieser entgegengerichteten Drehmomente sichtbar machen. Diese zeigen, daß der Leiterkreis unter diesen Bedingungen relativ zum Labor rotiert. Falls der Magnet in Ampères Motor im Uhrzeiger-Sinn rotiert, rotiert der externe Stromkreis, sofern er entsprechend frei ro-

tieren kann, im Gegenuhrzeiger-Sinn. Diese Experimente können sehr einfach durchgeführt werden mit Hilfe eines beweglichen externen Kupferdrahtes.^{4,7,8,29,30}

Eine sehr interessante Alternative stellt die Nutzung einer aus einfacher Aluminiumfolie gefertigten Röhre als Überbrückung des externen Stromkreises dar.⁶

Anwendungen im Klassenzimmer.

Viele interessante Themen können im Klassenzimmer in Verbindung mit diesem einfachen Gerät angesprochen werden.

- Dieser Motor ist extrem einfach zusammenzusetzen. Er läuft sehr schnell, fasziniert und überrascht sowohl Schüler als auch Experten.
- Er ist ein kostengünstiges Gerät. Neodymium Magnete sind heutzutage in vielen Schulen oder Läden zu finden
- Das Gerät besitzt eine sehr interessante Geschichte, die zurückgeht auf Ampère und Faraday im Jahr 1821-22
- Es gibt eine faszinierende und dokumentierte Kontroverse zwischen diesen beiden Vätern der modernen elektromagnetischen Theorie. Die unterschiedlichen Paradigmen können verglichen und untersucht werden.
- Es gibt unterschiedliche Erklärungen für diesen Effekt. Ampères Erklärung basiert auf dem Prinzip von Aktio und Reaktio zwischen internen mikroskopischen und externen makroskopischen Strömen. Faradays Deutung und die zeitgemäße Erklärung, die auf dem Feldkonzept basieren, benötigen auf der anderen Seite einen sogenannten „bootstrap“ Effekt. Das heißt, der Magnet (sein Pol oder sein eigenes Magnetfeld) wirkt auf interne Ströme und erzeugt ein Drehmoment auf den Magneten

Danksagung

Die Autoren danken FAPESP (Brasilien) und dem Organisationskommittee der First Latin American Conference of the International History, Philosophy, and Science Teaching Group für finanzielle Unterstützung zur Teilnahme an dieser Konferenz. Sie danken verschiedenen Personen für ihre Kommentare, Vorschläge und Hinweise: C. Blondel, J. R. Hofmann, J. J. Lunazzi, T. E. Phipps Jr., F. L. d. Silveira, F. Steinle, and B. Wolff.

+ assis@ifl.unicamp.br

++ chaib@ucb.br

¹ M. Matthews, *Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science* (Routledge, New York, 1994).

² C. Chiaverina, „The simplest motor?“, *The Physics Teacher* 42, 553 (2004).

³ H. J. Schlichting and C. Ucke, „Der einfachste Elektromotor der Welt“, *Physik in Unserer Zeit* 35, 272-273 (2004).

⁴ A. M. Munoz, "Motor homopolar," *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 4, 352-354 (2007).

⁵ S. M. Stewart, "Some simple demonstration experiments involving homopolar motors“, *Revista Brasileira de Ensino de Física* 29, 275-281 (2007).

⁶ H. K. Wong, "Levitated homopolar motor," *The Physics Teacher* 47, 124 (2009).

⁷ H. K. Wong, "Motional mechanisms of homopolar motors & rollers", *The Physics Teacher* 47, 463-465 (2009).

⁸ H. J. Schlichting and C. Ucke, "A fast, high-tech, low cost electric motor construction,"(2004). This

- article is a modified version which was published originally in German in the journal *Physik in unserer Zeit* 35, 272-273 (2004). English translation by J. Williams. Available at <<http://users.physik.tu-muenchen.de/cucke/english.htm>>.
- 9 M. Faraday, "On some new electro-magnetical motions, and on the theory of magnetism", *The Quarterly Journal of Science, Literature, and the Arts* 12, 74-96 (1821).
 - 10 M. Faraday, "On some new electro-magnetical motions and on the theory of magnetism", in *Great Books of the Western World* 45, 795-807, edited by R. M. Hutchins (Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952). Reprint of the *Quarterly Journal of Science* 12, 74-96 (1821).
 - 11 M. Faraday, "Description of an electro-magnetical apparatus for the exhibition of rotatory motion", *The Quarterly Journal of Science, Literature, and the Arts* 12, 283-285 (1822).
 - 12 D. Hottecke, "How and what can we learn from replicating historical experiments? A case study", *Science & Education* 9, 343-362 (2000).
 - 13 A.-M. Ampère, "Expériences relatives à de nouveaux phénomènes électro-dynamiques", *Annales de Chimie et de Physique* 20, 60-74 (1822).
 - 14 A.-M. Ampère, "Exposé sommaire des nouvelles Expériences électro-magnétiques faites par différents Physiciens, depuis le mois de mars 1821, lu dans la séance publique de l'Académie royale des Sciences, le 8 avril 1822," in *Recueil d'Observations électro-dynamiques*, edited by A.-M. Ampère (Crochard, Paris, 1822), pp. 199-206. Despite this date, the volume of the *Recueil* was only published in 1823.
 - 15 A.-M. Ampère, "Exposé sommaire des nouvelles expériences électromagnétiques faites par différents Physiciens, depuis le mois de mars 1821, lu dans la séance publique de l'Académie royale des Sciences, le 8 avril 1822," in *Collection de Mémoires relatifs à la Physique II: Mémoires sur l'électrodynamique*, pp. 238-244, edited by J. Joubert (Gauthier-Villars, Paris, 1885).
 - 16 A.-M. Ampère, "Expériences relatives aux nouveaux phénomènes électro-dynamiques que j'ai obtenus au mois de décembre 1821", in *Recueil d'Observations électro-dynamiques*, edited by A.-M. Ampère (Crochard, Paris, 1822), pp. 237-250. Despite this date, the volume of the *Recueil* was only published in 1823.
 - 17 A.-M. Ampère, "Expériences relatives aux nouveaux phénomènes électro-dynamiques obtenus au mois de décembre 1821," in *Collection de Mémoires relatifs à la Physique II: Mémoires sur l'électrodynamique*, pp. 192-204, edited by J. Joubert (Gauthier-Villars, Paris, 1885).
 - 18 A.-M. Ampère, "Mémoire sur la Détermination de la formule qui représente l'action mutuelle de deux portions infiniment petites de conducteurs voltaïques. Lu à l'Académie royale des Sciences, dans la séance du 10 juin 1822," *Annales de Chimie et de Physique* 20, 398-421 (1822).
 - 19 C. Blondel, *A.-M. Ampère et la Création de l'Électrodynamique (1820-1827)* (Bibliothèque Nationale, Paris, 1982).
 - 20 J. R. Hofmann, *André-Marie Ampère, Enlightenment and Electrodynamics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1996).
 - 21 A. K. T. Assis, *Weber's Electrodynamics* (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1994).
 - 22 M. d. A. Bueno and A. K. T. Assis, *Inductance and Force Calculations in Electrical Circuits* (Nova Science Publishers, Huntington, NY, 2001).
 - 23 A. K. T. Assis and J. A. Hernandez, *The Electric Force of a Current: Weber and the Surface Charges of Resistive Conductors Carrying Steady Currents* (Apeiron, Montreal, 2007). Available at <<http://www.ifi.unicamp.br/~assis>>.
 - 24 Soit ZM un de ces courans, la portion Zm est sans action, d'après ce qui a été dit précédemment, sur les courans électriques de l'aimant; la portion mM attire mn' et repousse mn; ces deux forces réunis tendent à faire tourner l'aimant sur lui-même dans le sens n'mn; des forces semblables s'exerçant simultanément sur tous les points de l'aimant, il tourne sur lui-même indéfiniment.
 - 25 L. d. Launay (editor), *Correspondence du Grand Ampère* 3 (Gauthier Villars, Paris, 1943).

²⁶ L. d. Launay (editor), *Correspondence du Grand Ampère 2* (Gauthier Villars, Paris, 1936).

²⁷ D'après ces faits, j'ai déterminé un principe fondamental et évident en physique, c'est que, l'action étant toujours égale à la réaction, il est impossible qu'un corps solide soit mis en mouvement par une action mutuelle entre deux de ses particules, parce que cette action produit sur les deux particules deux forces égales qui tendent à mouvoir le corps en sens opposés. D'où il suit que, quand les particules d'un aimant, traversées par un courant électrique qui les met dans le même état que le fil conducteur, agissent sur le pôle ou sur toute autre partie de l'aimant, il ne peut en résulter aucun mouvement dans ce corps, pas plus que l'assemblage d'un aimant.