

Der weltweit „einfachste“ und älteste Motor

Wie erklärt man seine Funktionsweise?

Hermann Härtel
 Gastwissenschaftler am
 Institut für Theoretische Physik und Astrophysik (ITAP)
 Universität Kiel
 Die englische Originalfassung wurde veröffentlicht in
 „European Journal of Physics Education
 Vol.11No 1 (2020)

Zusammenfassung

In der Literatur finden sich Erklärungen zur Funktionsweise eines sehr einfachen elektrischen Motors, der aus nur vier Teilen besteht, aus einer Batterie, einem Neodymium-Magneten, einer eisenhaltigen Schraube und einem kurzen Kupferkabel. Diese Erklärungen sind problematisch, da sie den Grundsatz, dass innere Kräfte einen Körper nicht in Rotation versetzen können, nicht beachten. Eine akzeptable Erklärung wird vorgestellt unter Bezug auf eine schon vor vielen Jahren von Ampère und Weber aufgestellten Theorie.

Einführung und Zielsetzung

Aufgrund der Verfügbarkeit von relativ starken Permanentmagneten kann ein extrem einfacher Motor aufgebaut werden. Es besteht aus 4 Komponenten: einer 1,5-V-Batterie, einem zylindrischen Neodym-Magneten, einem Eisen-Spitznagel und einem kurzen Kupferkabel (Abb. 1).

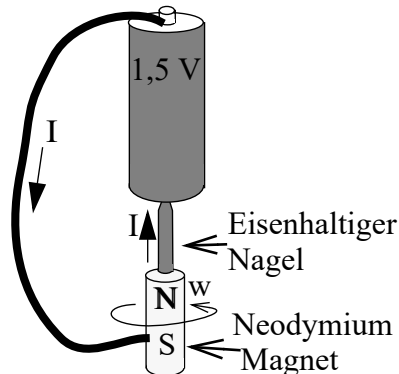


Abb.1 Der weltweit „einfachste“ Motor

Nach Schließen des Stromkreises beginnen sich Nagel und Magnet zur Überraschung des Publikums zu drehen und dies mit einer erstaunlich hohen Rotationsfrequenz (einem geschätzten Wert von etwa 5 U/s). Der Strom, der der Batterie durch den nahezu kurzgeschlossenen Stromkreis entnommen wird, liegt zwischen 1 und 2 A.

Dieser Motor wird häufig an verschiedenen Schulen und bei offenen Bildungsveranstaltungen vorgeführt. Über das Funktionsprinzip dieses Motors finden sich in der Literatur kontroverse Ansichten.

Dieser Artikel basiert auf einer Veröffentlichung von Assis (2016), in der er die Geschichte dieses Motors einschließlich der Kontroverse zwischen Ampère und Faraday über sein Funktionsprinzip vorstellt, sowie veröffentlichte Erklärungen kritisiert.

In diesem Artikel wird der Diskussion ein einfaches Experiment hinzugefügt, um zu verdeutlichen, warum einige der veröffentlichten Erklärungen (Chiaverina, 2004) (Schlichting, Ucke, 2004) (Featonby, 2006) nicht akzeptabel sind. Es wird weiterhin die Art und Weise hinterfragt, wie Newtons 3. Gesetz in diesen Veröffentlichungen angewendet wird, um die Funktionsweise

dieses Motors zu erklären. Abschließend wird eine Kurzfassung der diesbezüglichen Arbeiten von Ampère und Wilhelm Weber vorgestellt, anhand derer erklärt werden kann, wie der einfachste Motor funktioniert.

Problematische Erklärungen

Abbildung 2 verdeutlicht die in einer der genannten Veröffentlichungen angebotene Erklärung. (Chiaverina)

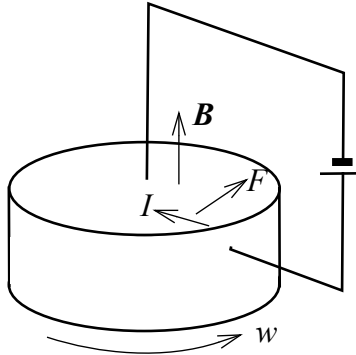


Abb.2 Schematische Darstellung von Magnet und Stromkreis mit Angabe der Magnetkraft F .

Der elektrische Strom fließt durch den Magneten und sein Magnetfeld. Auf die fließenden Elektronen wird eine Magnetkraft ausgeübt, deren Richtung durch die Rechte-Hand-Regel vorgegeben ist. Diese Kraft wird - so heißt es - in ein Drehmoment transformiert, das die Drehung des Magneten bewirkt.

Wäre das Magnetfeld „extrinsisch“, so könnte diese Erklärung in Ordnung zu sein. Das Problem ist jedoch, dass es sich um ein Magnetfeld handelt, das durch den Magneten selbst erzeugt wird. Bei einem externen Impuls könnte der Magnet in Drehung versetzt werden. Ist die Kraftquelle jedoch intern, so sind actio und reactio rein intern und können keine Rotation des Magneten verursachen.

Die anderen zitierten Veröffentlichungen folgen dem selben Argument wie in Abbildung 2 dargestellt und sind daher alle nicht akzeptabel.

Die Kontroverse zwischen Faraday und Ampère drehte sich um die gleiche Frage: Kann ein Körper durch innere Kräfte in Rotation versetzt werden? Ampère bestand darauf, dass eine solche Rotation nur durch äußere Einflüsse erfolgen könne, und lieferte auch eine entsprechende Erklärung, die er aus seinem Kraftgesetz ableitete. Diese Erklärung wird weiter unten vorgestellt.

Das Experiment

Das in Zusammenhang mit der Abbildung 2 aufgezeigte Problem mit der oben genannten Erklärung kann durch ein einfaches Experiment demonstriert werden.

Legt man einen etwas dickeren metallischen (nicht magnetischen) Ring um den Magneten (Abb. 3), der mit dem Magneten mechanisch und elektrisch fest verbunden ist, so wird der Kontaktpunkt für den elektrischen Strom in einen Bereich mit einem viel kleineren Magnetfeld verlegt. Der elektrische Strom durch den Magneten I wird durch diesen Metallring nicht verändert, das Magnetfeld des Magneten B bleibt gleich und somit sollte sich auch die Wirkung der im In-

nenraum postulierten Magnetkraft F nicht verändern.

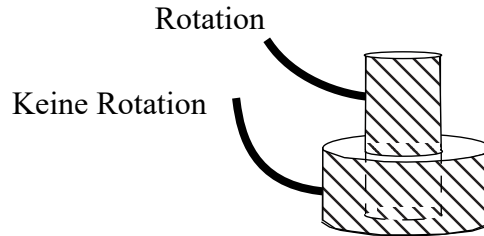


Abb.3 Anordnung zum Verschieben des Kontaktpunktes nach außen.

Das experimentelle Ergebnis ist eindeutig. Bereits bei einem Aluminiumring mit einer Wandstärke von 1 mm ist es wegen des schwächeren Magnetfeldes am Kontaktpunkt deutlich schwieriger, eine Rotation zu erreichen. Bei einer Wandstärke von 5 mm ist dies nicht mehr möglich. Im Internet ist ein Video verfügbar, das dieses Experiment zeigt.

(<http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/Videos/Einfachster-Motor.mp4>)

Anwendung des 3. Newtonschen Gesetzes

Nimmt man das 3. Newtonsche Gesetz ernst, so sollte von Anfang an klar sein, dass innere Kräfte allein nicht die Rotation des Magneten verursachen können. Vielmehr bedarf es einer Einwirkung, um eine solche Drehung zu bewirken. Eine Erklärung, die auf diese Tatsache hinweist, wurde von Wong (2006) veröffentlicht.

Die von Wong vorgestellte Erklärung legt den Schwerpunkt auf eine Wechselwirkung zwischen den fließenden freien Elektronen im externen Stromkreis in der Nähe des Kontaktpunktes und dem starken Magnetfeld in diesem Bereich außerhalb des Magneten.

Abbildung 4 veranschaulicht diese Erklärung

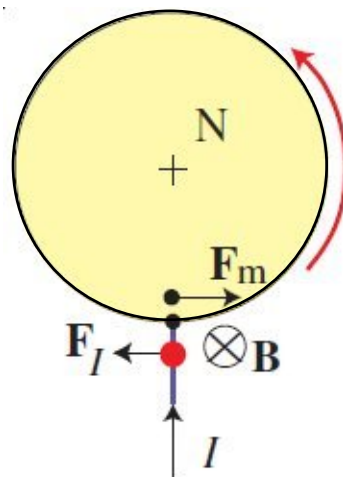


Abb.4 Aufsicht auf den Magneten mit Angabe der actio- und reactio-Kräfte (siehe Text).

Betrachtet wird der Strom an dem farblich hervorgehobenen Punkt. Dort wirkt auf Grund des Magnetfeldes die Lorentzkraft F_I auf die bewegten Ladungsträger. Und dann heißt es lapidar: Auf Grund des Newtonschen Prinzips von actio und reactio übt dann der Strom auf den Magneten eine gleich große entgegengerichtete Kraft F_M aus. Durch das durch F_I and F_m bedingte Dreh-

moment rotiert der Magnet entgegen dem Uhrzeigersinn.

Diese von Wong vorgelegte Erklärung ist unbefriedigend, da sie sich nur auf das actio=reactio-Prinzip bezieht, ohne auf weitere Einzelheiten einzugehen. Solche fehlenden Angaben müssten sich auf beide Wechselwirkungspartner beziehen, einerseits auf den Permanentmagneten mit seinem Magnetfeld, hervorgerufen durch interne mikroskopische Ströme oder Spins und andererseits auf den externen Strom mit seinem umgebenden Magnetfeld.

Unter der Annahme, dass durch eine solche Wechselwirkung zwei Lorentzkräfte in entgegengesetzter Richtung auf die freien Elektronen beider Partner einwirken, bleibt die Frage offen: Wie könnten diese Kräfte, die ausschließlich auf sich bewegende Elektronen einwirken, auf die positiven Gitterbausteine der beiden Leiter übertragen werden und somit den gesamten Magneten und gegebenenfalls auch den äußeren Leiter beschleunigen?

Bei einem langen und dünnen Leiter ist eine solche Kopplung zwischen den freien Elektronen und dem metallischen Draht denkbar. Die fließenden Elektronen erfahren beim Durchqueren des Magnetfeldes des Permanentmagneten eine Lorentzkraft proportional zu $(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ und werden seitwärts abgelenkt. Da sie den Draht nicht verlassen können (Neutralität muss gewahrt bleiben), stauen sich Ladungen an der Oberfläche, die ein elektrisches Feld erzeugen. Dieses elektrische Feld koppelt die Oberflächenladungen durch eine Art von Kontaktkräften mit dem Metalldraht und könnte somit den Draht zur Seite ziehen.

Im Fall des Permanentmagneten ist die Situation komplexer. Die Quelle für eine auf den Magneten ausgeübte Kraft kann nur der äußere Strom und sein Magnetfeld sein, sie kann nicht aus dem eigenen Magnetfeld stammen. Anderenfalls wäre das Newtons Prinzip „actio = reactio“ verletzt.

Um eine solche Kraft zu bestimmen, kann eine Situation wie in Abbildung 5 dargestellt untersucht werden, bei der ein stromführender Elektromagnet von einem externen Strom durchflossen wird. Dabei wird vorausgesetzt, dass das gleich starke Magnet erzeugt wird.

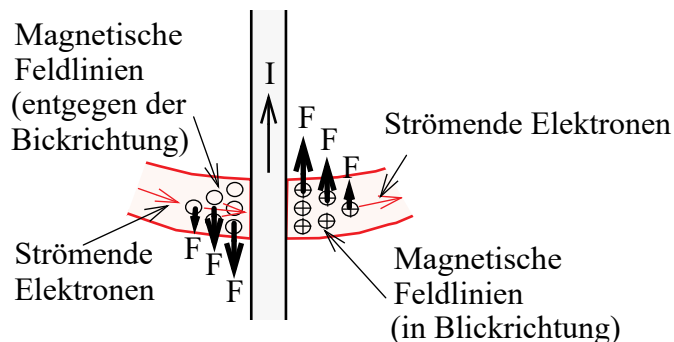


Abb.5 Magnetkräfte auf einen stromführenden Elektromagneten aufgrund des Magnetfeldes eines durchquerenden stromführenden Leiters.

Wie in Abbildung 5 gezeigt, werden aufgrund des Magnetfeldes des externen Stromes zwei Kräfte entgegengesetzter Richtung auf die im Elektromagneten fließenden Elektronen ausgeübt. Solch ein Kräftepaar bewirkt, wenn es von den fließenden freien Elektronen auf den Solenoid übertragen werden kann, dass sich die beiden wechselwirkenden elektrischen Ströme parallel ausrichten. Es ist jedoch nicht zu sehen, wie dieses Kräftepaar bewirken könnte, dass sich der Magnet um seine Symmetrieachse dreht.

Es ist kein Argument bekannt, warum diese Schlussfolgerung nicht für den Strom im Inneren eines Permanentmagneten gelten sollte. Wie auch immer der Strom vom äußeren Kontaktpunkt des Magneten zu seiner Mittelachse fließt, eine permanente Rotation um diese Symmetrieachse ist nicht zu erwarten.

Diskussion

Wie funktioniert dieser kleine Motor? Die bisherigen Überlegungen haben gezeigt, dass die

Lorentz-Kraft nicht hilfreich ist, um eine Antwort auf diese Frage zu finden. Was benötigt wird, ist eine Wechselwirkung zwischen dem externen stromführenden Leiter und dem Permanentmagneten in Form von Anziehungs- und oder Abstoßungskräften, um die beobachtbare Drehung zu erklären.

Eine Antwort auf diese Frage findet sich in den Arbeiten von Ampère und Weber, die zwischen 1822 und 1846 veröffentlicht wurden. Wie Assis berichtete [1], präsentierte Ampère 1822 erstmals einen Motor, bei dem sich ein zylindrischer Permanentmagnet um seine Symmetrieachse drehte.

Abbildung 6 zeigt eine schematische Darstellung dieses Ampèreschen Motors.

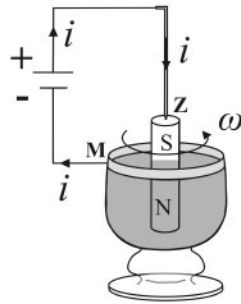


Abb.6 (a) Schematische Darstellung des Ampèreschen Motors.

Der Permanentmagnet S-N taucht in ein mit Quecksilber gefülltes Gefäß ein und kann sich frei um seine Achse drehen. Der von außen zugeführte elektrische Strom tritt am Punkt Z in den Permanentmagnet ein und verlässt das Gefäß am Punkt M.

Der kleine Motor von Abbildung 1 ist eine moderne Weiterentwicklung dieses ersten Ampèreschen Motors. Die wesentlichen Bausteine sind die gleichen: Ein zylindrischer Magnet, der sich frei um seine Achse drehen kann, und ein externer Stromkreis, der an der Achse des Magneten in denselben eintritt und an dessen Rand austritt oder umgekehrt. Daher sollte für beide Motoren die gleiche Erklärung zutreffen.

Ampère gab eine Erklärung ab auf der Grundlage seines neu entwickelten Gesetzes über die Wechselwirkung zwischen infinitesimalen Stromelementen (das ursprüngliche Ampère-Gesetz).

Zum besseren Verständnis dieser Ampèreschen Erklärung sei auf folgende Punkte hingewiesen:

1. Ampère nahm an, dass alle Phänomene des natürlichen Magnetismus auf einer Wechselwirkung zwischen elektrischen Strömen beruhen. Um die Wirkung des Permanentmagnetismus zu erklären, postulierte er das Vorhandensein von mikroskopischen elektrischen Strömen innerhalb des magnetischen Materials.
2. Ampère bestand darauf, dass alle in der Natur auftretenden Kräfte dem Newtons Prinzip "actio=reactio" in seiner strengen Form unterliegen müssen, d.h. dass es zwischen wechselwirkenden Partnern nur gleich große anziehende und abstoßende Kräfte geben kann, deren Wirkungslinien mit den Verbindungslinie der interagierenden Partner zusammenfallen.
3. Auf der Grundlage seiner Experimente und unter Verwendung verschiedener neu entwickelter Messgeräte gelang es Ampère, ein Gesetz zu formulieren, um diese Wechselwirkung zu untersuchen [7.] Dieses Gesetz ermöglichte es ihm quantitative Aussagen über die Wechselwirkung zwischen zwei beliebig ausgerichteten Gleichstromelementen zu machen. Dieses Gesetz wurde zu dieser Zeit relativ gut aufgenommen, wie das folgende Zitat aus einer Erklärung von Maxwell 9 belegt.

„The experimental investigation by which Ampère established the law of the mechanical action between electric currents is one of the most brilliant achievements in science. The

whole, theory and experiment, seems as if it had leaped, full grown and full armed, from the brain of the 'Newton of Electricity'. It is perfect in form, and unassailable in accuracy, and it is summed up in a formula from which all the phenomena may be deduced, and which must always remain the cardinal formula of electrodynamics.“




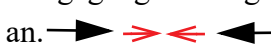
(Maxwell 1954)

4. Das Amperesche Kraftgesetz für zwei beliebig im Raum orientierte Stromelemente lautet

$$\text{(in moderner Vektornotation) } F = -\frac{\mu_0}{4\pi} I I' \frac{r^0}{r^2} [-2(d\vec{s} \text{ P } d\vec{s}') + 3(r^0 \text{ P } d\vec{s})(r^0 \text{ P } d\vec{s}')]$$

dF ist die Kraft zwischen 2 Stromelementen $I ds$ und $I' ds'$ in einem Abstand r mit dem Einheitsvektor r^0 .

Für den einfachen Fall von zwei gleich- oder entgegengesetzt gerichteten Stromelementen, die in derselben Ebene liegen, ergeben sich aus diesem Gesetz die folgenden 4 Regeln, die für das Verständnis der Funktionsweise des Ampereschen Motors hilfreich sind:

1. Parallel gerichtete Stromelemente ziehen sich an. 
2. Anti-parallel gerichtete Stromelemente stoßen sich ab 
3. Gleich gerichtete Stromelemente stoßen sich ab 
4. Entgegengesetzt gerichtete Stromelemente (in getrennten Stromkreisen) ziehen sich an. 

Regel 1 und 2 stimmen mit den bekannten Regeln über Magnetkräfte zwischen parallel ausgerichteten stromführenden Leitern überein.

Regel 3 und 4 sind im klassischen Elektromagnetismus unbekannt. Da ein elektrischer Strom in seiner Stromrichtung keine magnetische Kraft ausübt, kann im Rahmen des klassischen Elektromagnetismus keine Aussage über eine Wechselwirkungen zwischen solchen Stromelementen getroffen werden, die wie in Regel 3 und 4 angegebenen orientiert sind.

In Bezug auf Regel 3 besteht jedoch ein Bezug zum klassischen Elektromagnetismus. Es ist bekannt, dass stromführende Leiterkreise die Tendenz haben, sich auszudehnen. Dies lässt sich mit der Regel erklären, dass sich in einem geschlossenen Stromkreis alle Teile mit antiparallel fließenden Strömen abstoßen (siehe Abb. 7)

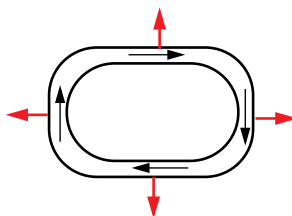


Abb.7 Magnetische Kräfte zwischen antiparallel orientierten Stromelementen.

Daher sollte in allen stromführenden Stromkreisen eine gewisse Längsspannung vorhanden sein. Eine solche Beanspruchung könnte auch durch die obige Regel 3 erklärt werden.

Für Regel 4 gibt es jedoch im Rahmen des klassischen Elektromagnetismus keine Beziehung. Zum Verständnis der folgende Erklärung von Ampères Motor kann es hilfreich sein, zu beach-

ten, dass es für planare Stromelemente einen kontinuierlichen Übergang von Regel 3 zu Regel 4 gibt, der vom Winkel zwischen den beiden Stromelementen abhängt. Abbildung 8 zeigt diesen Übergang von anziehender zu abstoßender Wechselwirkung in Abhängigkeit vom Winkel zwischen planaren Stromelementen. .-,

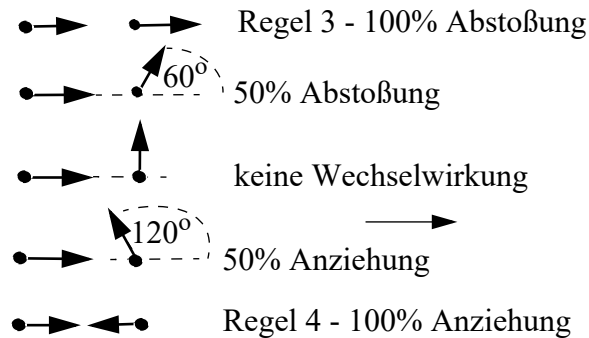


Abb.8 Übergang von Regel 3 zu Regel 4 für planare Stromelemente

Die auf dem Kraftgesetz von Ampère basierenden Regeln 3 und 4, sind hilfreich, um die Erklärung von Ampère in Bezug auf die Funktionsweise seines Motors zu verstehen (siehe Abb.9).

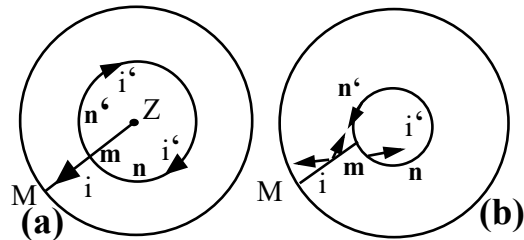


Abb.9 (a) Die Pfeile kennzeichnen die tangentialen mikroskopischen Ströme i' , sowie den radialen makroskopischen Strom, der außerhalb des Magneten fließt.
(b) Die Pfeile kennzeichnen den anziehenden Anteil des actio/reactio-Paares, die zwischen i' in dem Abschnitt mn' und i wirken, sowie die abstoßenden Kräfte des actio/reactio-Paares zwischen i' in dem Abschnitt nm und i .

Der Strom i' ist der solinoidale Strom als Ergebnis von mikrophysikalischen Strömen. Wie bereits erwähnt, wurden solche Ströme von Ampère als Quelle des natürlichen Magnetismus postuliert.

In seiner in Abbildung 9 beschriebenen Erklärung verweist Ampère auf Abschnitte von Strömen zu beiden Seiten des Kreuzungspunkts als Summe einzelner Stromelemente. Die Stromelemente in solchen Abschnitten haben entgegengesetzt gerichtete Geschwindigkeitskomponenten in Bezug auf den externen Strom (den Interaktionspartner). Aufgrund der Regel 3 und 4 führen solche entgegengesetzten Strömungsrichtungen entweder zu Anziehungs- oder Abstoßungskräften.

Abb. 10 zeigt, wie Regel 3 und 4 hilfreich sein können, um die Erklärung von Ampère zum

Funktionsprinzip seines Motors verständlich zu machen.

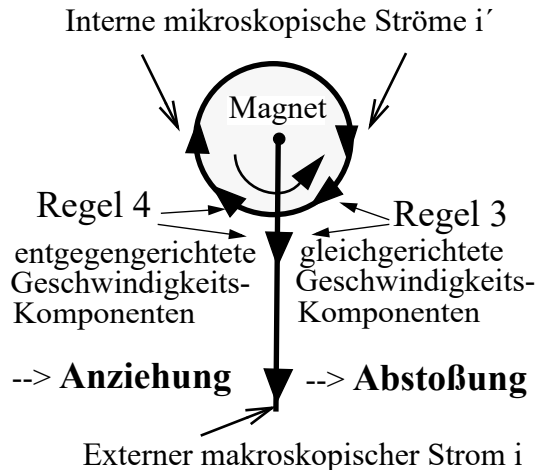


Abb.10 Erläuterung der Ampèreschen Erklärung zur Funktionsweise seines Motors

Die Wechselwirkungskräfte zwischen den Elementen der beiden Stromkreise variieren umgekehrt mit dem Quadrat ihres Abstandes und haben daher ihren hauptsächlichsten Ursprung in der Nähe des Kreuzungspunktes. Die Anwendung von Regel 3 und 4 auf die Geschwindigkeitskomponenten der fließenden Elektronen in den beiden jeweils gegenüberliegenden Leiterteilen führt zu den entgegengesetzt gerichteten Kräften zwischen den entgegengesetzt angeordneten Abschnitten. Diese Kräfte bewirken die Drehung des kleinen Motors.

Für eine detaillierte Beschreibung, wie diese 4 Regeln aus Webers Elektrodynamischem Grundgesetz unter der Verwendung graphischer Mittel und qualitativer Argumente abgeleitet werden können, siehe Härtel (2018).

Für eine ausführliche Darstellung der Arbeit von Weber siehe Assis (1994)

Weitere Planung

Wird der kleine Motor als Generator eingesetzt, das heißt, wird der Magnet von außen in Rotation versetzt, so wird zwischen Rand und Rotationsachse des Magneten eine Spannung induziert. Dieser Effekt wird als Unipolare Induktion bezeichnet. Seit Faraday diesen Effekte vor etwa 200 Jahren entdeckte, wird kontrovers über eine zutreffende Erklärung diskutiert. Verschiedene Autoren präsentieren unterschiedliche Experimente, die bisher zu keiner einheitlichen Interpretation geführt haben.

In einem nachfolgenden Artikel wird versucht, auf der Basis eigener Experimente und unter Bezugnahme auf die Arbeiten von Weber und Ampère einen konstruktiven zur Deutung der Unipolaren Induktion zu leisten.

Literatur

- Assis A. K. T. (1994) "Weber's Electrodynamics" Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
 Assis A. K. T. and Chaib J. P. M. C. (2012) Ampère's motor: Its history and the controversies surrounding its working mechanism, American Journal of Physics, Vol. 80, 990-995.
 Assis A. K. T. and Chaib J. P. M. C. (2015) Ampère's Electrodynamics, available under: <http://www.ifi.unicamp.br/~assis/Amperes-Electrodynamics.pdf>, 72-80.
 Chiaverina C. (2004) The simplest motor?, The Physics Teacher 42, 553.
 Featonby D. (2006) Inspiring experiments exploit strong attraction of magnets, Phys. Educ. 41 292.
 Härtel H. (2018) Electromagnetic Induction: An Alternative for Teaching and Understanding. European Journal of Physics Education, 9, 2.

- Maxwell J. C. (1954) A Treatise on Electricity and Magnetism. Dover, New York, 1954. vol. 2, article 528, p. 175.
- Schlichting H. J. and Ucke C. (2004) "A fast, high-tech, low cost electric motor construction," This article is a modified version which was published originally in German in the journal „Physik in unserer Zeit“ 35, 272-273.
- Wong H. K. (2009) Motional Mechanisms of Homopolar Motors & Rollers, The Physics Teacher, 47,463- 465.