

Unipolare Induktion - eine wenig aufgeräumte Ecke des Elektromagnetismus

Ein Beitrag zum Aufräumen.

Hermann Härtel
Gastwissenschaftler am
ITAP –Institut für Theoretische Physik und Astrophysik
Universität Kiel

Zusammenfassung

Es werden Messungen an einem Faraday-Generator vorgestellt, welche die bekannten Theorien bezüglich des Faradayschen Paradoxons als problematisch erscheinen lassen. Dagegen lassen sich alle hier gewonnenen Messergebnisse, sowie alle sonstigen als paradox bezeichneten Vorgänge im Zusammenhang mit dem Faraday Generator widerspruchsfrei auf der Basis der Theorie von Wilhelm Weber erklären

Schlüsselbegriffe: Faradayscher Generator, Unipolare Induktion, Ampèresches Gesetz, Webers Fundamentalgesetz der Elektrodynamik

Historische Entwicklung

Im Jahre 1832 entdeckte Faraday, dass man mit einem rotierenden Magneten eine Gleichspannung induzieren kann, stellte aber gleichzeitig fest, dass sich ein rotierender Magnet im Vergleich zu einem linear bewegten Dauermagneten eigenartig, das heißt für ihn zunächst unverständlich verhält. Es machte keinen Unterschied, ob bei einer rotierenden Scheibe der Dauermagnet um die gleiche Symmetrieachse rotiert oder ob der Magnet ruht. In beiden Fällen beobachtete Faraday einen Induktionseffekt. Weiterhin wunderte er sich, dass bei einer rotierenden Scheibe und einem stationären Magneten eine Spannung induziert wird, ein solches Signal aber im reziproken Fall bei rotierendem Magneten und stationärer Scheibe nicht auftritt. Faraday verwendete für seine Versuche zunächst einen Magneten und eine eigenständige metallische Scheibe, die unabhängig von einander um die gemeinsame Symmetrieachse rotieren konnten. Später ersetzte er die metallische Scheibe durch einen Magneten aus leitfähigem Material, so dass Magnet und Scheibe eine Einheit bilden. Somit ergeben sich die folgende zwei Ausführungen eines sogenannten Faraday-Generators (Abb.1), die beide von Faraday verwendet wurden

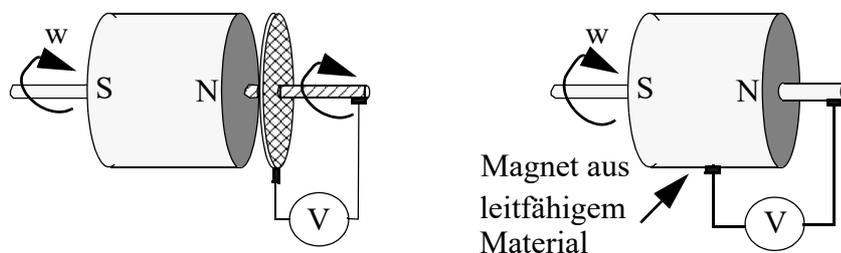


Abb.1: Zwei Ausführungen eines Faradaygenerators

Um die Funktionsweise dieser Generatoren zu erklären, wechselte Faraday von der ursprünglichen Annahme von magnetische Kraftlinien, die mit dem Magneten mitrotieren zu der Annahme, dass das Magnetfeld bei einem rotierenden Magneten stationär bleibt. Nur so

konnte er sich erklären, warum bei einem rotierenden Magneten und stationärer Scheibe keine Spannung induziert wird. Später kehrte er zu seiner ursprünglichen Auffassung von rotierenden magnetischen Kraftlinien zurück mit der Begründung, dass der externe Stromkreis eine wichtige Rolle spielt. Die Teile dieses Leiterkreises werden von den rotierenden Kraftlinien geschnitten, die dadurch hervorgerufene Lorentzkraft bewirkt den gemessenen Induktionsstrom, bzw. bei einem offenen Stromkreis die Induktionsspannung.

Die Frage, ob die Magnetlinien mit einem rotierenden Magneten verbunden sind und mitrotieren oder ob sie von der Rotation unbeeinflusst und damit stationär bleiben, wird in der Literatur bis heute unterschiedlich beantwortet. In diversen Publikationen wurden die verschiedenen durchgeführten Messungen und deren Interpretationen dargestellt (Müller 2014; Montgomery 1999; Miller 1981).

Das zu lösende Problem ist das Folgende: Wenn sich ein Magnet relativ zu einem Leiterkreis auf einer geraden oder gekrümmten Linie bewegt, hängt die auftretende sogenannte Bewegungsinduktion nur von der Relativgeschwindigkeit zwischen den beiden Teilen ab. Der Prozess ist reziprok. Bei einer Drehbewegung ist der Vorgang jedoch nicht reziprok. Ist der Magnet stationär, so tritt an einer rotierenden Scheibe eine Induktionsspannung auf. Bei einem rotierenden Magneten und einer stationären Scheibe ist dies jedoch nicht der Fall.

Um diesen paradoxen Effekt zu erklären, werden die folgenden zwei widersprüchlichen Theorien in der Literatur diskutiert.

1. Die sogenannte N-Theorie besagt, dass das Magnetfeld bei einem rotierenden Magneten stationär bleibt. Die Elektronen im Magneten und in der rotierenden Scheibe rotieren durch dieses stationäre Magnetfeld und werden aufgrund der Lorentzkraft entweder zum Rand oder zur Achse des Magneten bzw. der Scheibe hin beschleunigt. Der Ursprung der Induktion liegt im Magneten oder in der Scheibe.

2. Die sogenannte M-Theorie besagt, dass das Magnetfeld mit dem Magneten mitrotiert. Die induzierte Spannung bewirkt, dass die magnetischen Feldlinien - auch Kraftlinien genannt - die Leiterteile des externen Stromkreises schneiden. Der Ursprung der Induktion liegt im externen Stromkreis.

Die M-Theorie wurde von Kelly (1998) zur Deutung eigener Messung herangezogen. Dagegen folgte Chen (2016) auf Grund eigener Messungen die Gültigkeit der N-Theorie.

Somit ergibt sich der befremdliche Zustand, dass sich der Elektromagnetismus als Teilgebiet der klassischen Physik, trotz aller unübertroffener Erfolge in Theorie und Technik den „Luxus“ erlaubt bzw. es duldet, dass sich diametral widersprechende experimentelle Befunde bezüglich eines vor fast 200 Jahren entdeckten Phänomens ohne größere Widerrede seit dieser Zeit hingenommen werden.

Zielsetzung und pauschale Ergebnisse

In dem Bemühen, einen erhellenden Beitrag zur Klärung dieses mißlichen Zustandes zu liefern, werden in dem vorliegenden Artikel die Ergebnisse eigener, einfacher Experimente dargestellt. Dabei wurde auf die übliche Beschränkung auf ein Gebiet mit überwiegend homogenem Magnetfeld (z.B. vor der Stirnseite des Magneten) verzichtet. Vielmehr werden durch Variation der Scheibengröße und deren Form die sich ergebenden Wechselwirkungen im Außenraum um den rotierenden Magneten herum erkundet. Dabei stellt sich heraus, daß die meisten der durchgeführten Messungen weder mit der N - noch mit der M-Theorie zufriedenstellend zu erklären sind. In einigen Fällen stehen die Meßergebnisse in einem klarem Widerspruch zu den Folgerungen, die sich aus diesen beiden Theorien ergeben. Verwendet man z.B

eine Scheibe, deren Durchmesser etwas größer gewählt wird als der des rotierenden Magneten, so zeigt sich, daß die Induktionsspannung, gemessen zwischen Scheibenrand und Rotationsachse, deutlich anwächst. Für die N-Theorie, bei der ein stationäres, nicht mitrotierendes Magnetfeld angenommen wird, rotiert die etwas größere Scheibe im inneren und im äußeren Bereich durch entgegengesetzt gerichteter Magnetfelder. Für eine Scheibe mit größerem Durchmesser als dem des Magneten sollte sich somit eine abnehmende Induktionsspannung ergeben. Das Gegenteil ist der Fall.

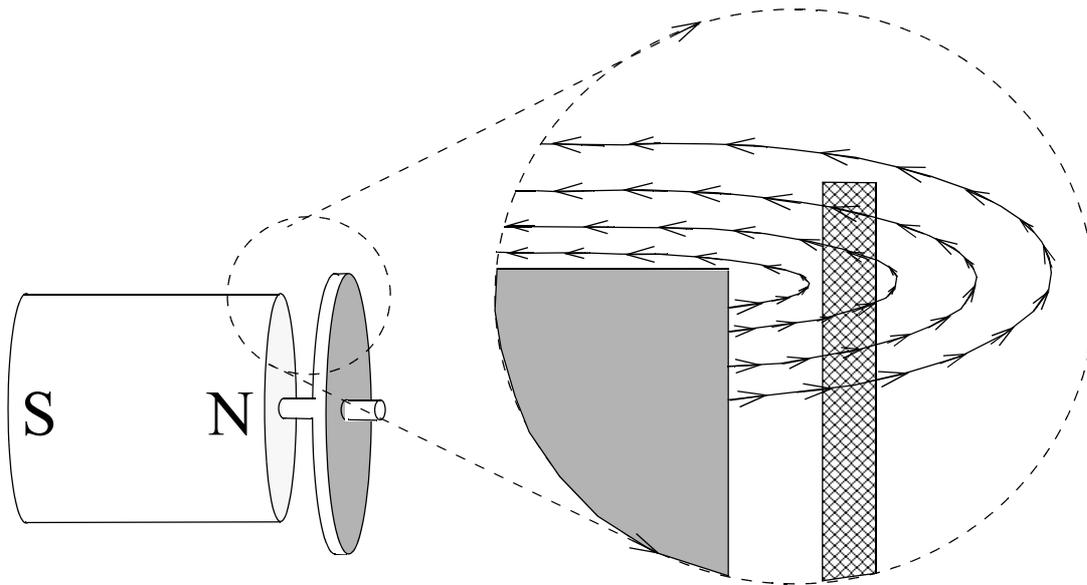


Abb.2: Verlauf der Magnetlinien durch eine Alu-Scheibe mit einem etwas größerem Durchmesser als dem des Magnet.

Für die N-Theorie, bei der die mitrotierenden Magnetlinien den äußeren Stromkreis schneiden und dadurch die Induktionsspannung bewirken sollen, wird das Magnetfeld in aller Regel kleiner bei zunehmendem Abstand des Schleifkontaktes zum Magneten, es wird auf keinen Fall größer. Die Induktionsspannung sollte somit kleiner werden, eventuell gleich groß bleiben, auf keinen Fall ansteigen. Dies ist aber der Fall.

Es gibt weitere Beispiele bei denen die Anwendung der Lorentzkraft zu Ergebnissen führt, die der Messung widersprechen.

Im folgenden wird eine Theorie vorgestellt, die von Ampère ab 1830 entwickelt und später von Wilhelm Weber 1846 zu seinem Grundgesetz der Elektrodynamik ausgebaut wurde.

Alle hier durchgeführten Messungen lassen sich auf Grund qualitativer Überlegungen mit diesem Weberschen Grundgesetz in Übereinstimmung bringen.

Im Anschluß daran werden die durchgeführten Messung im Einzelnen vorgestellt und im Licht dieser Weberschen Theorie analysiert.

Der Ansatz von Weber und Ampère

Nach dem im Jahr 1819 Oerstedt entdeckte, dass es eine Verbindung zwischen dem Phänomen des natürlichen Magnetismus und dem des elektrischen Stromes gibt, begann neben Faraday auch der französische Physiker Ampère, sich auf dieses neue Forschungsgebiet zu konzentrieren. Im Gegensatz zu Faraday ging Ampère von der These aus, dass sämtliche Erscheinungen des Magnetismus durch eine Wechselwirkung zwischen elektrischen Strömen hervorgerufen werden. Darüber hinaus weigerte er sich, eine Kraft wie die Lorentzkraft zu akzeptieren. Viel-

mehr postulierte er, dass es in der Natur zwischen wechselwirkenden Partnern nur abstoßende und anziehende Kräfte geben kann, deren Wirkungslinien mit der jeweiligen Verbindungslinie der beiden Partner übereinstimmen.

Im Jahr 1822 veröffentlichte Ampère ein Gesetz - das ursprüngliche Ampèresche Gesetz - das es ihm ermöglichte, quantitative Aussagen über die Kräfte zwischen einzelnen Stromelementen zu machen (Assis, Chaib, 2012). Die Ampèreschen Arbeiten wurden von Wilhelm Weber in Göttingen aufgegriffen und weiterentwickelt. Im Jahr 1846 veröffentlichte Weber sein Grundgesetz der Elektrodynamik, und wies nach, dass sich von diesem Grundgesetzes sowohl das Ampèresche Gesetz als auch das Faradaysche Flussgesetz ableiten lassen. (Weber 1846) (Assis 1994)

Die Webersche Kraftgleichung stellt eine erweiterte Coulombgleichung dar, die sich auf die Wechselwirkung zweier Punktladungen q_1 und q_2 bezieht. Neu sind zwei additive Glieder, von denen das erste den Faktor $-v^2/c^2$ enthält, das zweite den Faktor $+a/c^2$.

Das Webersche Fundamentalgesetz beschreibt die gegenseitige Kraft $F_{1 \rightarrow 2}$ (Kraft von q_1 auf q_2) und $F_{2 \rightarrow 1}$ (Kraft von q_2 auf q_1) zwischen zwei Ladungsträgern q_1 und q_2 im gegenseitigen Abstand r_{12} und, - wie stets bei Coulombkräften - gerichtet längs der Verbindungslinie der wechselwirkenden Partner. Das Gesetz lautet:

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = \frac{q_1 q_2 r_{12}^0}{4\pi\epsilon_0 r_{12}^2} \left(1 - \frac{v_{12}^2}{2c^2} + \frac{r_{12} a_{12}}{c^2} \right) = -\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$$

Die Größen $v_{12}=dr/dt$ und $a_{12}=d^2r/dt^2$ bedeuten die relative Geschwindigkeit bzw. die relative Beschleunigung zwischen den Wechselwirkungspartnern. Die Größe r_{12}^0 bedeutet den Einheitsvektor in Richtung von q_1 nach q_2 . Die zunächst von Weber eingeführte Konstante c wurde später durch ihn zusammen mit Kohlrausch experimentell bestimmt als übereinstimmend in Dimension und Größe mit der Lichtgeschwindigkeit (Weber, Kohlrausch, 1893). Eine detaillierte Darstellung der Weberschen Theorie der Elektrodynamik findet sich bei Assis (1994).

Die Messungen im Einzelnen

Vorversuch

In einem Vorversuch wurde zunächst festgestellt, dass die an einem rotierenden Dauermagneten gemessenen Induktionsspannungswerte - wie von der Theorie verlangt - eine lineare Abhängigkeit von der Drehzahl aufweisen. Die Abmessungen des verwendeten Magneten sind in Abbildung 3(a), das Messergebnis ist in Abbildung 3(b) dargestellt.

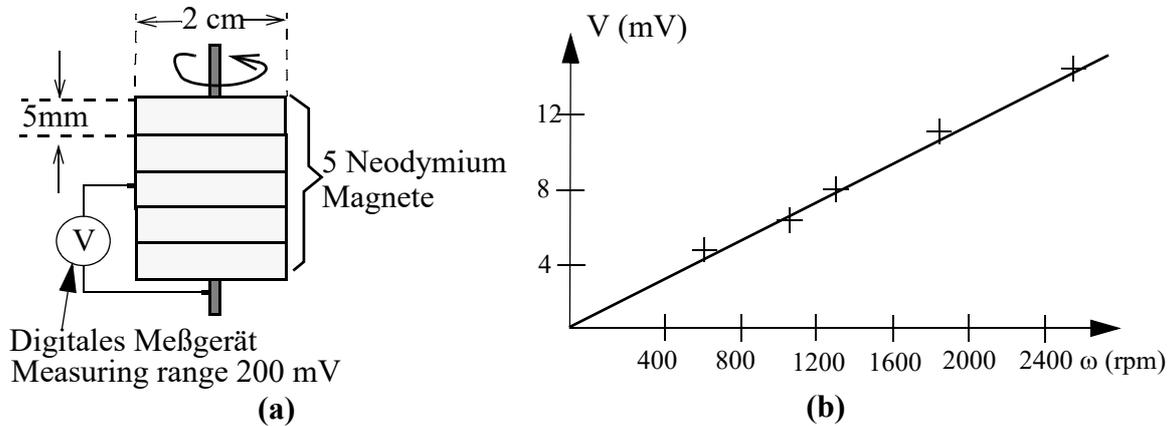


Abb.3: (a) Verwendeter Permanentmagnet (b) $U_{ind} = f(\omega)$

Als Antrieb wurde eine Standbohrmaschine verwendet mit Keilriemenantrieb zur Einstellung unterschiedlicher Winkelgeschwindigkeiten. Die Verbindungen zwischen den Leitern des externen Stromkreises und den rotierenden Teilen erfolgten mit Hilfe von federnden Leitungsdrähten. Die Verwendung von Kohleschleifkontakten erwies sich als problematisch, da sich durch den Abrieb der Kohle der Übergangswiderstand nicht konstant bleibt.

Messung an unterschiedlich großen rotierenden Scheiben

Gemessen wurde in dem Hauptversuch die Induktionsspannung jeweils an zusammen mit dem Magneten rotierenden, unterschiedlich großen Scheiben jeweils im gleichen Abstand zum rotierenden Magneten und jeweils in Abhängigkeit zur Winkelgeschwindigkeit. Das Ergebnis

zeigt Abb.4

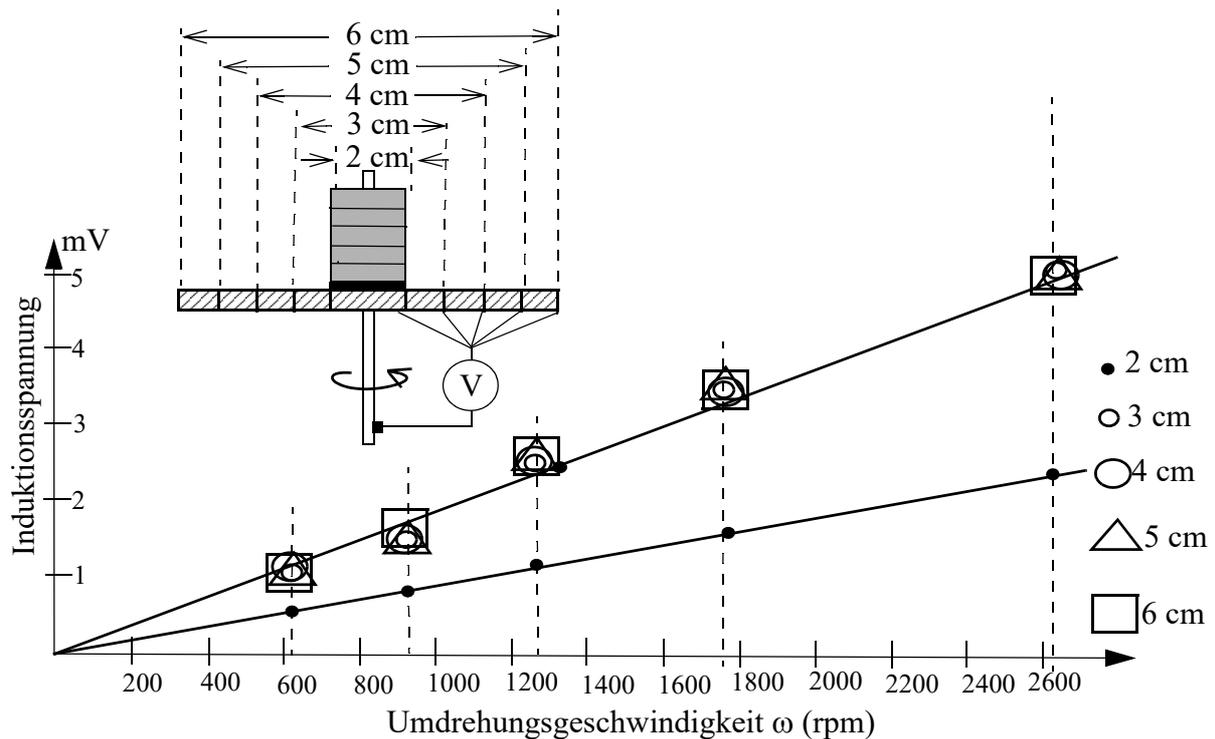


Abb.4: Induktionsspannung als Funktion der Umdrehungsgeschwindigkeit) für unterschiedlich große Scheiben.

Auffällig sind zwei Ergebnisse. Zum einen zeigt sich, dass im Bereich von Scheibendurchmessern zwischen 3 und 6 cm im Rahmen der Meßgenauigkeit stets die gleiche Induktionsspannung auftritt. Auf der Basis sowohl der M- als auch der N-Theorie sollte eine deutliche Abnahme der induzierten Spannung zu erwarten sein.

Das zweite Ergebnis ist noch auffälliger. Zwischen den Scheiben mit 2 und 3 cm Durchmesser zeigt sich ein deutlicher Anstieg der induzierten Spannung. Dies steht, wie schon erwähnt, in einem klaren Gegensatz zu den Erwartungen auf der Basis sowohl der M- als auch der N-Theorie.

Um dies letztere überraschende Ergebnis aufzuklären, wurde der betreffende Bereich (zwischen 2 und 3 cm Scheibendurchmesser) durch den Einsatz entsprechend gestaffelter Scheibe näher untersucht. Zusätzlich wurden Scheiben mit 8 und 10 cm Durchmesser eingesetzt. Das Ergebnis ist in Abbildung 5 dargestellt.

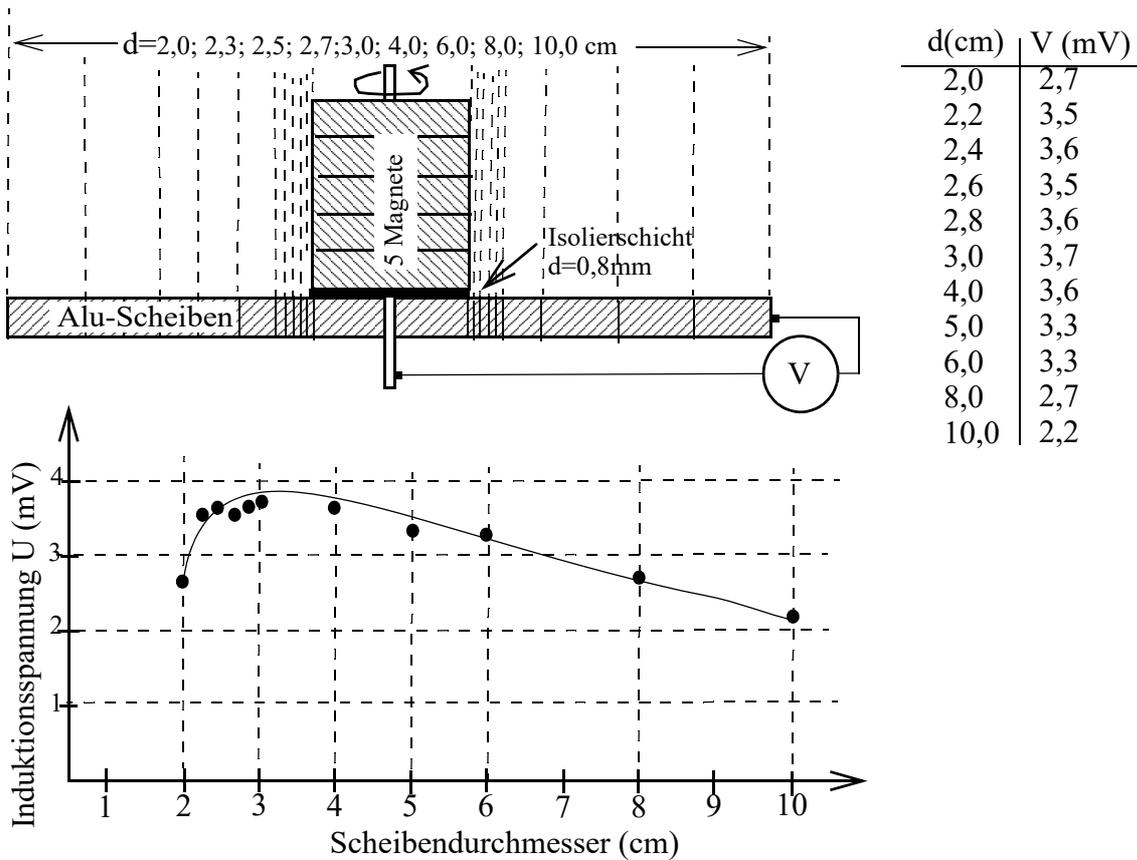


Abb.5: Messung der Induktionsspannung für rotierende Scheiben unterschiedlicher Größe

Das Webersche Gesetz sagt aus, daß magnetische Kräfte nur zwischen Ladungsträgern auftreten, die sich relativ zueinander bewegen oder beschleunigen, oder, pauschal formuliert, bei denen sich der gegenseitige Abstand ändert. Bei der gemeinsamen Rotation des Magneten und der Scheiben tritt keine Abstandsänderung auf. Daher unterliegen sie laut Weber keiner Wechselwirkung. Ersetzt man den Magneten modelhaft durch eine stromführende Spule gleicher Feldstärke, so treten die größten Abstandsänderungen und damit die größten Wechselwirkungskräfte an der Kontaktstelle zwischen Magnet (stromführende Spule) und Schleifkontakt auf, bzw. zwischen den dort vorhandenen Ladungsträgern. Hinzu kommen Anziehungs- oder Abstoßungskräfte durch Ladungsträger in den weiter entfernten Magnetoberflächen.

Von dem Schleifkontakt aus gesehen erscheinen diese entfernteren Magnetoberflächen bei einer 2cm-Scheibe (gleiche Größe wie der Magnet) unter einem sehr ungünstigen Winkel, um eine Kraftkomponente senkrecht zur Scheibenoberfläche beizutragen. Dies ändert sich bei größer werdenden Scheiben, die Kraftkomponenten vergrößern sich auf Grund des sich ändernden

Winkels (Abb.6).

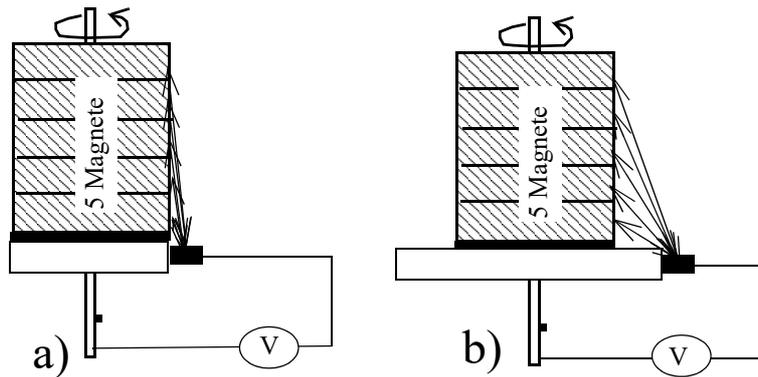


Abb.6: Wechselwirkung zwischen Magnet und Schleifkontakt bei unterschiedlichem Abstand (siehe Text)

Somit kann man vermuten, daß die Zahl und Stärke dieser Kraftkomponenten trotz des größeren Abstandes ein Anwachsen der Wechselwirkung bewirken und kann damit die gemessene Vergrößerung der induzierten Spannungs erklären. Diese Vermutung bedarf noch der Bestätigung durch eine entsprechende Rechnung, die noch aussteht.

Zwei weitere durchgeführte Experimente unterstützen diese Vermutung. Zum einen wurden um einen einzelnen Magneten nacheinander unterschiedliche große ringförmige Alu-Scheiben angebracht und die induzierte Spannung zwischen dem äußeren Rand des Alu-Rings und der Rotationsachse bei konstanter Umdrehungsgeschwindigkeit gemessen (Abb.7)

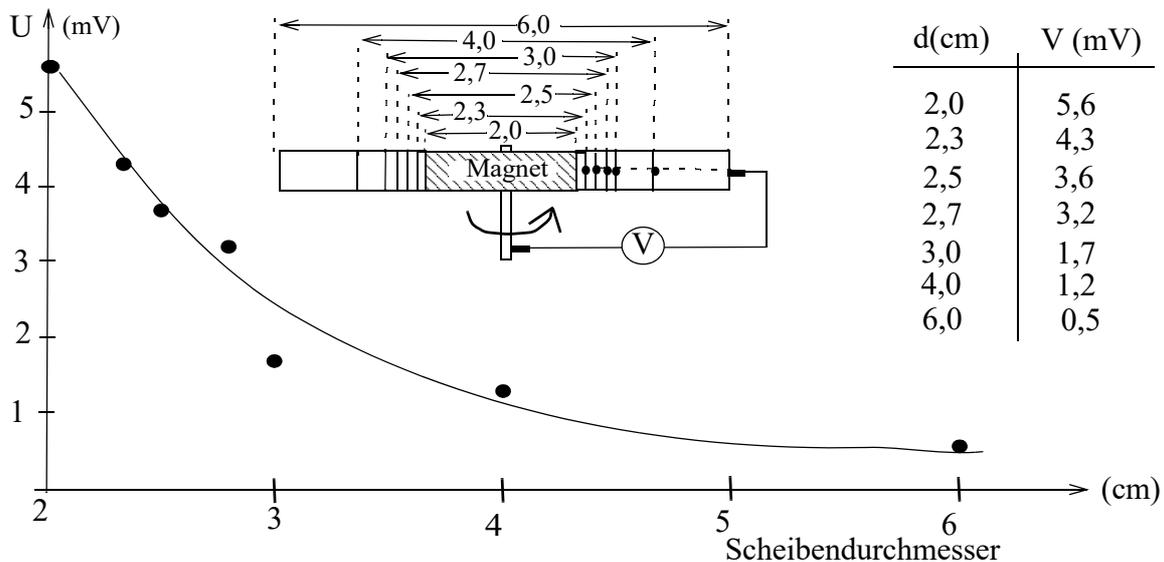


Abb.7: Messung der Induktionsspannung an ringförmiger Alu-scheiben, die gemeinsam mit einem im Innern befindlichen Magneten um eine feste Achse rotieren

Das Ergebnis zeigt, wie zu erwarten, eine kontinuierliche Abnahme der induzierten Spannung mit wachsendem Abstand zwischen Schleifkontakt und Magnet.

Verwendet man jedoch einen ausgedehnteren Magneten so ändert sich das Ergebnis (siehe

Abb. 7).

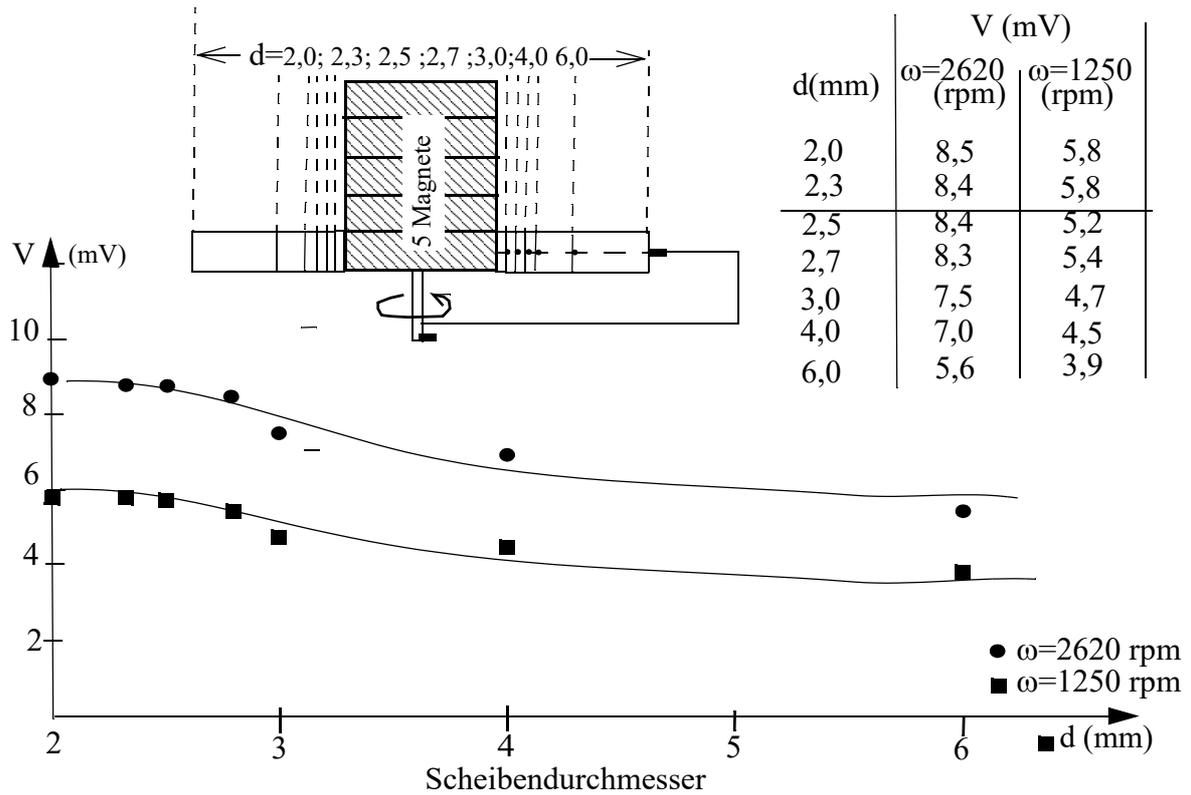


Abb.8: Die gleiche Messung wie in Abbildung 6 mit einem ausgedehnteren Magneten.

Wiederum zeigt sich eine deutliche Zunahme der induzierten Spannung im nahen Bereich außerhalb des Magneten. Dies Ergebnis unterstützt die oben angegebene Vermutung. Bei einer zunehmenden Entfernung des Schleifkontaktes von der Oberfläche des Magneten erscheinen die entfernteren Magnetoberflächen unter einem Winkel, der zu einer Zunahme der Kraftkomponente in Richtung des äußeren Stromkreises führt.

Ein abschließender Versuch verdeutlicht noch einmal die Bedeutung der Position des Schleifkontaktes. An Stelle einer einfachen Scheibe wurde eine solche mit deutlich verbreiteter Oberfläche eingesetzt (Abb.9)

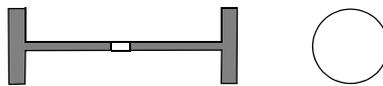


Abb.9: Alu-Scheibe mit vergrößerter äußerer Oberfläche

Die Meßanordnung und die Meßergebnisse sind in Abbildung 10 dargestellt.

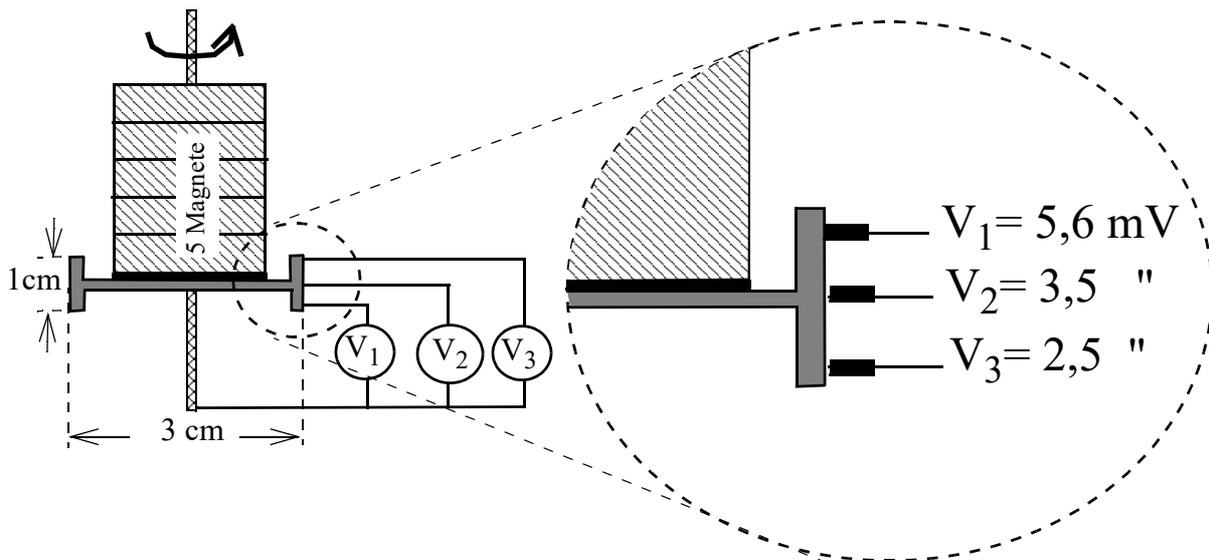


Abb.10: Messung der Induktionsspannung an einer Scheibe mit vergrößerter äußerer Oberfläche

Es zeigt sich, daß nicht der Abstand zwischen Scheibe und Stirnseite des Magneten, sondern die Position des Schleifkontaktes maßgebend ist. Dies ist im Einklang mit der Weberschen Theorie, der zu Folge die Wechselwirkung nur zwischen sich relativ zu einander bewegenden Ladungsträgern auftritt. Es erscheint als wenig erfolgversprechend, dieses Ergebnis auf der Basis der Lorentzschen Theorie erklären zu wollen.

Eine ähnliche Argumentation veröffentlichte Westley (Wesley, 1990) mit Hinweis auf ein Experiment mit einer Z-förmigen Antenne, das nur von der Weberschen Theorie, aber nicht von der Standard-Theorie korrekt vorhergesagt werden kann. In dieser Arbeit findet sich die Aussage:

The interpretation of the magnetic field by Faraday and Maxwell as physically tangible rigid lines of force attached to a source is seen to be physically untenable. The B field, like the A field from which it is defined, is merely a mathematical artifact, a mathematical device, of no particular direct physical significance, used to help solve the problem of how moving point charges affect moving detector charges.

Dem ist nichts hinzuzuführen.

Noch zu klärende Fragen

1. Warum misst man bei einem rotierenden Magneten aus leitfähigen Material und einem ruhenden externen Stromkreis zwischen der Oberfläche des Magneten und der Rotationsachse eine Induktionsspannung, die darüber hinaus deutlich größer ist als die an einer rotierenden Scheibe auftretende Induktionsspannung?
2. Warum tritt bei einem Faraday-Generator keine Induktionsspannung auf, wenn nur der Magnet rotiert, die Scheibe sowie der externe Stromkreis jedoch stationär bleiben?
3. Warum tritt bei einem Faraday-Generator eine Induktionsspannung auf, wenn die Scheibe rotiert, Magnet und der externer Stromkreis jedoch stationär bleiben?
4. In den Fällen 1 und 2 ist zusätzlich zu klären, warum sich die Induktionsspannung umkehrt, wenn entweder die Achse des Magneten oder die Rotationsrichtung umgekehrt wird.

zu 1. und zu 4.

Beim rotierendem Magneten und stationärem externen Stromkreis wird letzterer polarisiert. Es wechselwirken die relativ zum Labor ruhenden freien Elektronen des externen Stromkreises mit den rotierenden positiven Gitterbausteinen v_{Gitter} und den zugehörigen freien Elektronen $v_{\text{Gitter}} + v_{\text{Drift}}$. Letztere heben sich aber bis auf die Driftgeschwindigkeit v_{Drift} der Elektronen gegenseitig in ihrer Wirkung nach außen auf. Es bleibt somit nur die Wechselwirkung zwischen den relativ zum Labor ruhenden freien Elektronen im externen Stromkreis und den mit v_{Drift} sich bewegenden Elektronen im Magneten, letztere entsprechend verstärkt durch die Rotation. Die Relation von v_{Drift} zur Richtung der Rotation bestimmt die Polarisierung der induzierten Spannung.

Wegen der $1/r^2$ -Abhängigkeit der Weberschen Kraft findet die wesentliche Wechselwirkung in der Nähe der Oberfläche des Magneten statt. Form und Ausbreitung des externen Stromkreises haben keinen nennenswerten Einfluß auf die Größe der Induktionsspannung. Der Abstand zwischen Magnet und Schleifkontakt als Verbindung zum externen Stromkreis ist bei der Messung unmittelbar an der Oberfläche des rotierenden Magneten optimal klein und somit die gemessene Induktionsspannung maximal.

zu 2.

Rotiert nur der Magnet und bleiben Scheibe und externer Stromkreis stationär, so werden sowohl die Scheibe als auch der externe Stromkreis polarisiert, allerdings beide in gleicher Weise. Scheibe und externer Stromkreis stellen einen ruhenden geschlossenen Stromkreis dar, auf den durch den Magneten anziehende oder abstoßende Kräfte einwirken, je nach Rotationsrichtung und Orientierung der Polachse. Solche Kräfte können eine Polarisierung der Teile bewirken, aber keine Kreisbewegung der freien Elektronen im ganzen Stromkreis.

zu 3. und zu 4.

Bei einer rotierenden Scheibe und einem stationären Magneten wechselwirken die freien Elektronen der Scheibe mit den fließenden Elektronen im Innern des ruhenden Magneten.

Je nach Orientierung der Polachse des Magneten bewegen sich die letzteren entweder in Richtung der Rotation oder entgegengesetzt. Wie im klassischen Elektromagnetismus folgt auch aus der Weberschen Gleichung, dass in der Regel parallele Ströme sich anziehen und antiparallele Ströme sich abstoßen¹. Dies macht verständlich, warum nicht nur bei einer Umkehrung der Rotationsrichtung eine Umpolung der gemessenen Induktionsspannung auftritt, sondern auch bei einer Drehung der Polachse um 180 Grad.

Didaktische Überlegungen

Solange es die wissenschaftliche Gemeinschaft duldet, dass seit Anbeginn der Forschung auf diesem Gebiet Unklarheiten über die Ursache der Unipolaren Induktion bestehen, kann man es keinem Lehrbuchschreiber verdenken und auch keinem Lehrer, dieses Thema nicht in den zu behandelnden Themenkreis aufzunehmen.

Hinzu kommt, dass das Thema „Elektromagnetische Induktion“ ein sperriges ist, wenn es unterrichtet werden muss. So elegant auch die Rechte-Hand-Regel sowie die mathematischen

1. In der Weberschen Theorie gibt es Ausnahmen zu dieser Regel, die aber bei den hier angesprochenen Vorgängen nicht zur Anwendung kommen.

Formulierungen mit $F_{Lorentz} = qF + (v \times B)$ und $\oint E ds = - d\Phi/dt$ sind, so schwer ist es, den Inhalt dieser Gleichungen und der zu beschreibenden Phänomene zu veranschaulichen bzw. verständlich zu machen. Wie ist es möglich, dass eine Kraft senkrecht zum magnetischen Feld (was immer das auch sei) und senkrecht zur Geschwindigkeit des Ladungsträgers hervorgebracht werden kann? Es fragte einmal ein recht junger Schüler: „Beulen sich die Magnetlinien etwas nach rechts aus, wie Gummibänder, wenn sie das Elektron nach links stoßen?“

Was soll man diesem Schüler antworten?

Welcher Mechanismus könnte erklären, warum durch die Änderung des magnetischen Flusses ein ringförmiges elektrisches Feld induziert wird? Warum sollte die Natur eine Kraft hervorbringen, für die das Newtonsche Prinzip in seiner strengen Form nicht gilt? Die Lorentzkräfte als Aktions- und Reaktionskräfte sind zwar betragsmäßig gleich groß, wirken aber in der Regel in unterschiedlichen Richtungen.

Alles dies bleibt nicht wirklich verständlich oder einsichtig und so könnte dies Thema der Anlass für viele Schüler sein, die Physik entweder als zu schwierig und unverständlich wahrzunehmen oder sich selbst als nicht hinreichend begabt genug einzuschätzen, um in diesem Fach zu bestehen. Der Ansatz von Weber ist dagegen mit der Alltagserfahrung verknüpfbar, es gibt nur anziehende und abstoßende Kräfte, die stets dem 3.Newtonschen Prinzip unterliegen. Für Hinweise, wie Induktionsphänomen mit Hilfe des Weberschen Ansatzes rein qualitativ gedeutet werden können, siehe (Härtel, 2018)

Sollte es keine Alternative zum derzeitigen Lehrstoff geben, so hätte man die bestehende Situation in der Lehre zu akzeptieren. Dann wären gewisse Naturgesetze nicht der Vorstellung zugänglich und man müsste die Beschränkung auf mathematische Formulierungen hinnehmen. Gibt es aber eine Alternative, die wesentlich einfacher und anschaulicher ist, so ist es aus didaktischer Sicht nicht zu verantworten, diese Alternative nicht zur Kenntnis zu nehmen und sorgfältig auf ihre Korrektheit und Anwendbarkeit zu prüfen.

Eine solche Prüfung mit dem Argument zu verweigern, es könne doch nicht sein, dass eine ernst zu nehmende Theorie über Jahrhunderte hinweg vergessen wurde, ist erstens nicht rational und außerdem riskant. Historiker könnten einmal nachweisen, dass es auch in der Physik als Disziplin sehr menschlich zugeht und Theorien nicht unbedingt wegen ihrer Korrektheit, sondern wegen der Berühmtheit ihrer Erfinder verfolgt oder aus anderen, all zu menschlichen Gründen wie Konkurrenz oder Ehrgeiz unterdrückt werden.

Literatur

- Assis A.K.T. (1994) Unipolare Induction and Weber's Electrodynamics, *Frontiers of Fundamental Physics*, Plenum Press, New York, 409-414
- Assis A. K. T. and Chaib J. P. M. C. (2011) *Ampère's Electrodynamics*, Aperion, Montreal.
- Assis A.K.T. (1994) *Weber's Electrodynamics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht,
- Chen K., X.-J. Li and Y.-X. Hui (2016) An Experimental Study on Unipolar Induction, *ACTA PHYSICA POLONICA A*, Vol. 131
- Härtel H. (2018) Electromagnetic Induction: An Alternative for Teaching and Understanding. *European Journal of Physics Education*, 9, 2 p. 1-13
- Härtel H. (2018) Electromagnetic Induction from a new Perspective, *European Journal of Physics Education*, 9, 2 p. 29-36
- Kelly A. G. (1998) *Faraday's Final Riddle; Does the Field Rotate with a Magnet?* Monographs 5 & 6 of the Institution of Engineers of Ireland.

- Miller, A. I. (1981) Unipolar induction: a case study of the interaction between science and technology, *Annals of Science*, 38:2, 155-189, <https://doi.org/10.1080/00033798100200191>
- Montgomery H. (1999) Unipolar induction: a neglected topic in the teaching of electromagnetism, *Eur. J. Phys.* 20 271–280
- Müller F. J. (2014) „Unipolar Induction Revisited: New Experiments and the “Edge Effect” Theory *IEEE transactions on magneticstics*, 50, 1T
- Weber W. (1846) *Elektrodynamische Maassbestimmungen, Über ein allgemeines Grundgesetz der elektrischenWirkung*. Reprinted in *Wilhelm Weber’s Werke*, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, (1893) pp. 25-214
- Weber, W. and Kohlrausch, R. (1856), *Über die Elektrizitätsmenge, welche bei galvanischen Strömen durch den Querschnitt der Kette fließt*. *Annalen der Physik*, 99, pp. 10-25; reprinted in *Wilhelm Weber ’s Werke* , vol. III, Weber, H. ed., Berlin: Springer, 1893, pp. 597-608.
- Wesley, J. P. (1990). *Weber electrodynamics, Part II. Unipolar induction, Z-antenna*. *Foundations of Physics Letters*, 3:471–490