

# Wie universell sind das Faradaysche Flussgesetz und die Lorentz-Kraft?

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

## Zusammenfassung

Die Frage, ob das Faradaysche Flussgesetz universell ist oder ob es Ausnahmen gibt, ist seit langem umstritten. Diese Diskussion schien kürzlich zugunsten der Allgemeinheit des Faradayschen Flussgesetzes zu einem Abschluss gekommen zu sein. Der vorliegende Artikel stellt diese Frage erneut auf der Basis einiger einfacher Messungen, die an einem Faraday-Generator durchgeführt wurden. Die erzielten Meßergebnisse sind überraschend und widersprechen den Erwartungen. Sofern sie nicht mit den Standardtheorien in Übereinstimmung zu bringen sind, stellt sich die Frage nach der Universalität des Faradayschen Flußgesetzes und der Lorentzkraft. Eine alternative Theorie zu diesem Gesetz ist angegeben.

Schlüsselbegriffe: Elektrodynamische Induktion, Faradays Flußgesetz, Lorentz Kraft, Webers Fundamentales Gesetz der Elektrodynamik, Faraday Generator.

## Zum Thema „Elektromagnetische Induktion“

Das Thema "Elektromagnetische Induktion" mit den beiden Grundgesetzen "Faraday'sches Flussgesetz" und "Lorentzkraft" ist - wie jeder erfahrene Lehrer weiß - schwer zu unterrichten und zu verstehen. Auf der Lehrerseite gibt es den Inhalt in Lehrbüchern zu diesem Thema, der oft kritisiert wird. Ist die Vorstellung eines sich bewegenden Magnetfelds akzeptabel, oder sollte man sich auf die Spezielle Relativitätstheorie beziehen, wenn ein sich bewegendes Magnet im Fokus steht? Ist  $v$  bei der Behandlung der Lorentzkraft als  $F = qE + q(v \times B)$  relativ zum Feld, relativ zum Labor oder relativ zum Beobachter? [Assis, Peixoto, 1992]

Auf der Seite der Lernenden: Welche Art von Mechanismus könnte - wenn auch nur in Analogie - erklären, wie die Beziehung zwischen einer zeitlichen Änderung des Magnetflusses in Bezug auf eine Fläche und dem Auftreten eines ringförmigen elektrischen Feldes hergestellt wird, das diese Fläche umschließt? Ebenso ist das Auftreten einer einzelnen Kraft, der Lorentzkraft, ohne direkte Reaktionskraft, die auf einen sich ein Magnetfeld bewegenden Ladungsträger wirkt, ein einmaliger Vorgang ohne Bezug auf einen anderen bekannten Prozess, auf dem die Schüler aufbauen könnten. Zusa et al. (2016) zeigten, dass selbst gute Studenten nach Abschluss eines vollständigen Kurses nicht gut abschnitten, wenn sie gebeten wurden, das Faradaysche Flussgesetz oder die Lorentzkraft auf Versuchsaufbauten anzuwenden, die ihnen zuvor noch nicht erklärt worden waren.

Auf der Seite der wissenschaftlichen Gemeinschaft gibt es einige grundlegende Fragen, bei denen die Wissenschaftler unterschiedlicher Meinung sind. Wenn sich ein Magnet als Teil eines Faraday-Generators um seine Polarachsen dreht, dreht sich das überall betragsmäßig konstante Magnetfeld mit dem Magneten mit oder bleibt es unabhängig von der Drehung des Magneten stationär?

Kelly [1998] veröffentlichte Messungen, die bestätigten, dass sich das Magnetfeld zusammen mit einem rotierenden Magneten mitdreht.

Leus und Taylor [2011] kamen aufgrund ihrer eigenen Messungen zu der gleichen Aussage: Das Magnetfeld dreht sich mit dem Magneten.

Im Gegensatz dazu haben Chen et. al. [2017] anhand eigener Messungen bestätigt, dass sich das Magnetfeld nicht mit dem Magneten dreht, sondern stationär bleibt. Assis und Thober [1994] verfolgten einen völlig anderen Ansatz und wählten die Theorie von W. Weber als Grundlage für die Erklärung der unipolaren Induktion.

Gibt es Ausnahmen vom Faradays-Flussgesetz oder ist dieses Gesetz unter allen Umständen gültig? Feynman [1969], dessen Argumente häufig zitiert werden, hat festgestellt, dass es Situationen gibt, in denen sich der magnetische Fluss ändert und dennoch keine Induktion erfolgt und umgekehrt.

Galili und Kaplan (1997) stellten fest, dass es manchmal problematisch sein kann, das Faradaysche Flussgesetz in seiner integralen Form  $\varepsilon = dF/dt$  und  $\Phi_B = \iint_A B \times dA$

zu verwenden. Als Beispiel verwiesen sie auf die Faraday-Scheibe, die sich in einem konstanten Magnetfeld dreht und ohne eine offensichtliche zeitliche Flußänderung eine Induktion bewirkt.

Solche letzteren Aussagen werden von verschiedenen Autoren kritisiert [Scanlon et al., 1969], [Munley, 2004], [Zengel 2019]. Sie argumentieren, dass der Ursprung der Ausnahmen auf eine unangemessene Wahl des Strompfadens zurückzuführen ist.

Scanlon argumentiert, dass „ein solcher Konflikt aufgrund der mathematischen Identität zwischen  $\varepsilon = \oint (E + v \times B)$  und  $\varepsilon = dF/dt$  für einen bestimmten Stromverlauf niemals entstehen kann“.

Munley zeigt sehr detailliert, wo Feynman versagt, und gibt an, dass bei ordnungsgemäßer Anwendung des Faradayschen Gesetzes dieses verwendet werden kann, um in jeder Situation die induzierte EMK zu berechnen, in der die Lorentz-Kraft angewendet werden kann.

Zengel wählt ein sehr einfaches Modell einer Faradayschen Scheibe, um zu zeigen, wie der Weg des induzierten Stroms gewählt und wie das Faradaysche Gesetz angewendet werden muss, um seine Allgemeinheit aufzuzeigen. Zu diesem Zweck muss bei der Bestimmung einer Fläche  $A$  sowie einer Änderung des Magnetflusses  $dF/dt$  in Bezug auf diese Fläche berücksichtigt werden, dass die Elektronen des induzierten Stroms in einem rotierenden Körper mitgeführt werden und dadurch eine bestimmte Fläche überstreichen. Wenn diese Fläche berücksichtigt wird, kann die allgemeine Gültigkeit des Faradayschen Flussgesetzes mathematisch bewiesen werden, möglicherweise nach Durchführung einer Transformation in ein Nicht-Inertiales Bezugssystem.

Zengels Artikel gipfelt in folgendem Satz: „aber kein Gesetz sollte jemals ein Ergebnis vorhersagen, das nicht mit der Flussregel  $\varepsilon = -\frac{d}{dt}(\iint (B \times dA))$  vereinbar ist.

Dies klingt, als ob die Diskussion über die Universalität des Faradayschen Flußgesetzes zu einer allgemein akzeptierten Lösung gekommen ist.

Die folgende einfachen und einfach zu durchschauenden Messungen, die an einem Faraday-Generator durchgeführt wird, stellen diese Aussage in Frage.

Faraday entdeckte 1832, dass ein rotierender Magnet als Gleichstromgenerator funktionieren kann. Fig. 1a zeigt einen solchen Generator, der aus einem Magneten und einer separaten Metallscheibe besteht, die sich beide frei oder unabhängig von ein-

ander um die Polarachse des Magneten drehen können.

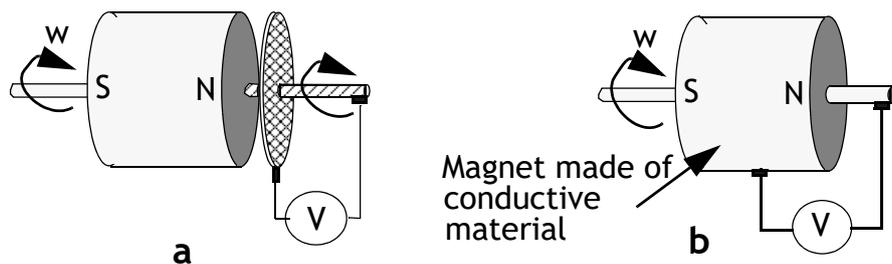


Abb. 1. Zwei Versionen eines Faraday Generators.

Später fand Faraday heraus, dass ein rotierender Magnet, der aus leitendem Material besteht, direkt ohne metallische Scheibe einen Gleichstrom induzieren kann (Abb. 1b).

Die folgenden Fragen stellen sich beim Umgang mit einem Faraday-Generator, die schon Faraday verwirrten:

1. Warum beobachtet man eine Induktion (wie erwartet) mit einer rotierenden Scheibe und einem stationären Magneten, aber nicht mit dem reziproken Prozess: einem rotierenden Magneten und einer stationären Scheibe?
2. Warum wird eine Induktion beobachtet, wenn sich Magnet und Scheibe zusammen drehen? Faraday hatte vermutet, daß eine Relativbewegung zwischen Scheibe und Magnet erforderlich sein müßte

Diese Fragen haben zu zahlreichen Diskussionen geführt. Die Geschichte begann mit Faradays Entdeckung der paradoxen Ergebnisse im Zusammenhang mit seinem Generator im Jahre 1832; Die Diskussionen dauern bis heute an. Die Schlüsselfrage in dieser Diskussion sind die bereits oben erwähnten: Ist das Magnetfeld eines rotierenden Magneten stationär oder dreht es sich mit dem Magneten? Ist Faradays Flussgesetz universell oder nicht?

Die folgenden Messungen wurden sowohl an einem Generator wie in Abbildung 1b dargestellt, als auch an einem System durchgeführt, bei dem sich Magnet und Metallscheibe gemeinsam drehen. Um den Ursprung des induzierten Stroms in diesen Fällen zu erklären, muß man, basierend auf der klassischen Theorie, annehmen, dass das Magnetfeld stationär bleibt und nicht durch die Drehung des Magneten beeinflusst wird.

Ein rotierender Magnet, der aus leitendem Material besteht, dreht sich durch sein eigenes Magnetfeld. Die freien Leitungselektronen schneiden Magnetfeldlinien und werden, abhängig von der Ausrichtung des Magnetfelds, entweder zur Innenseite oder zur Außenseite des Magneten beschleunigt.

Die gleiche Erklärung gilt für die Metallscheibe, die sich gemeinsam mit dem Magneten dreht. Abhängig von der Richtung des Magnetfelds werden Rand und Mittelpunkt der Scheibe je nach der durch  $q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$  vorgegebenen Kraftkomponente entsprechend polarisiert.

### Eine Messung, die Fragen aufwirft

Eine Kontrollmessung zur Beginn der Messungen an dem verwendeten Magneten zeigte, wie zu fordern ist, eine lineare Abhängigkeit der gemessenen induzierten

Spannung von der Drehzahl (Abb. 2).

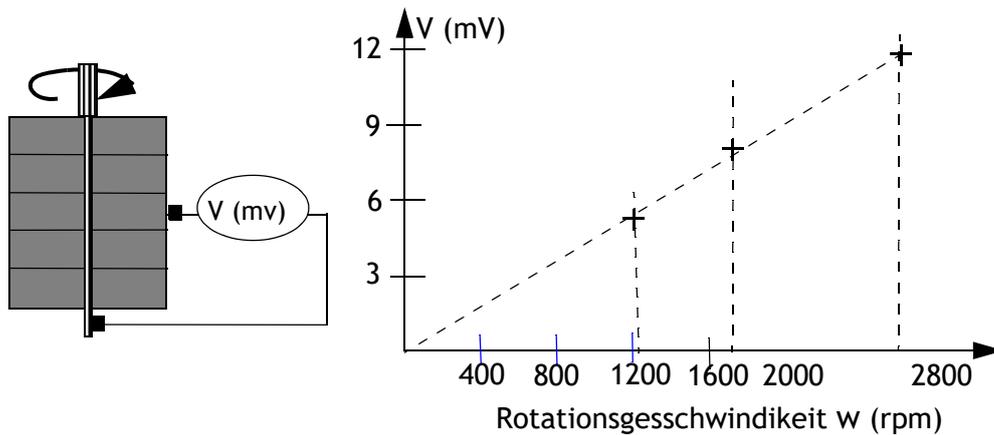


Abb. 2 Induzierte Spannung  $V$  proportional zur Drehzahl  $w$ .

Bei der Durchführung einiger weiterer Messungen und der Verwendung dünner Gleitkontakte (dünn im Vergleich zur Dicke der rotierenden Scheibe) wurde beobachtet, dass die Messwerte deutlich von der Position dieser Gleitkontakte auf dem Rand der rotierenden Scheibe abhängen.

Dieser überraschende Effekt führte zu einer detaillierteren Untersuchung und zu folgendem Versuchsaufbau (Abb. 3):

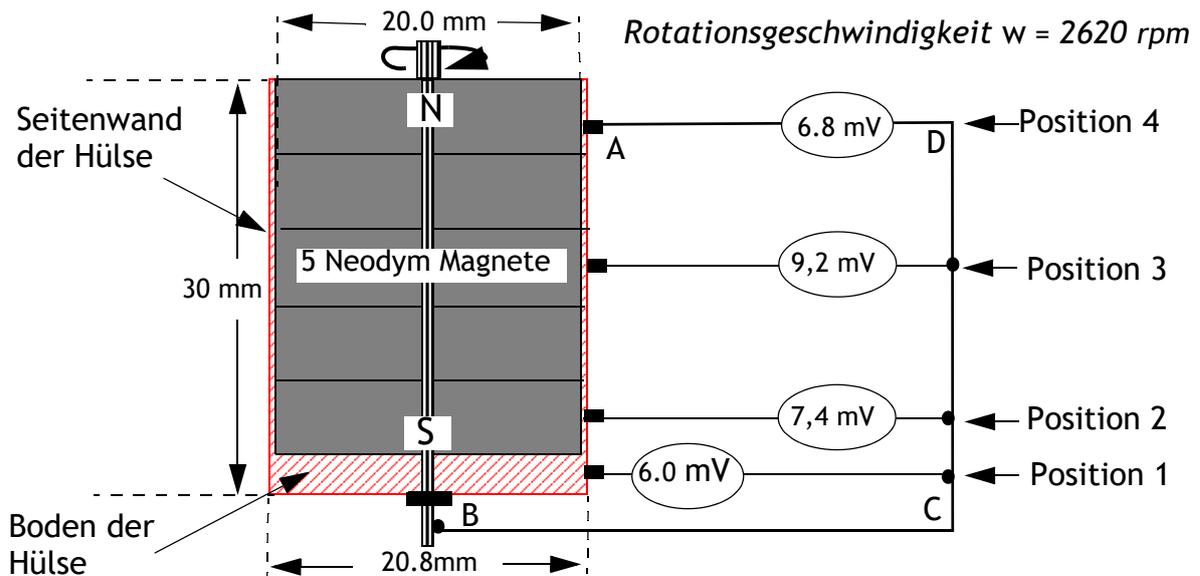


Abb.3 Meßaufbau zur Bestimmung der Induktionsspannung an einem Faraday-Generator, bei dem sich Scheibe und Magnet gemeinsam um dieselbe Achse drehen. Die Form der Scheibe wurde zu einer Hülse erweitert, so dass die induzierte Spannung nicht nur zwischen der Drehachse und dem Boden der Hülse (entspricht dem Rand der Faradayschen Scheibe), sondern auch zwischen verschiedenen Punkten an der Hülse wand und der Drehachse gemessen werden konnte. Federnde Leitungsdrähte dienen als Gleitkontakte für die Verbindung zwischen den Leitern des externen Stromkreises und den rotierenden Teilen.

Neu ist an diesem Experiment, dass die Faraday-Scheibe zu einer Hülse erweitert wurde, in der sich die Magnete befanden, fest mit dem Boden der Hülse verbunden und elektrisch von der Hülse isoliert.

Die Seitenwände der rotierenden Hülse bewegen sich in erster Näherung parallel zu den Magnetfeldlinien. Aus klassischer Sicht ist daher nicht zu erwarten, dass

diese rotierende Hülse einen wesentlichen Einfluss auf die Messergebnisse hat.

Darüber hinaus könnte man erwarten, dass das elektrische Potential längs der Hülse dem am unteren Rand der Hülse entspricht.

Das Gegenteil ist der Fall.

Wie in Abbildung 3 gezeigt, erhöhen sich die Messwerte um mehr als 50%, wenn der Schleifkontakt ausgehend vom Rand der Scheibe (Unterseite der Hülse) entlang der Seitenfläche der Hülse parallel zur Drehachse bewegt wird (Position 1 bis Position 4).

Die Messwerte erreichen ein Maximum bei der Position 3, (auf der Höhe des Zentrums des Magneten) und beginnen nach diesem Punkt wieder abzunehmen. Die Frage ist: Wie kann dieses Messergebnis mit dem Faradayschen Flussgesetz oder der Lorentz-Kraft vereinbar sein?

Durch die Magneten kann kein elektrischer Strom fließen, da sie von der Hülse elektrisch isoliert sind. Wenn Strom fließt, dann nur durch den Stromkreis ABCD (Abb. 3).

Durch das Verschieben des Messpunktes entlang der Hülse sollte sich an der Zahl der durch den Hülseboden geschnittenen Magnetlinien nichts ändern. Gemessen aber werden unterschiedliche induzierte Spannungswerte in Abhängigkeit von der Position des Gleitkontaktes.

Wo sind die freien Elektronen, die laut Zengel bei der Rotation eine bestimmte Fläche überstreichen? Wie können diese Elektronen die Abhängigkeit der gemessenen Spannung von der Position des Gleitkontaktes erklären?

Könnte es sein, dass horizontale Magnetfeldkomponenten den Effekt erzeugen, indem sie die Hülse horizontal schneiden? Dies ist aus zwei Gründen unwahrscheinlich. Zum einen wird aufgrund der geringen Dicke der Hülse (0,25mm) diese nur von einem kleinen Teil des äußeren Magnetfeldes geschnitten. Der größere Teil verläuft außerhalb der Hülse, sowohl beim Austritt aus dem Magneten wie auch beim Wiedereintritt.

Zweitens ist nicht ersichtlich, warum eine mögliche Wechselwirkung zwischen dem Magnetfeld und der rotierenden Hülse ein maximales Signal auf der mittleren Höhe des Magneten erzeugen sollte.

Bei einem unvoreingenommenen Blick auf die hier erzielten Messergebnisse sieht es so aus, als ob die Messwerte durch den Abstand zwischen Gleitkontakt und Magnet bestimmt werden und nicht durch den Abstand zwischen der Scheibe und dem Magneten und der Zahl der geschnittenen Magnetlinien durch den Boden der rotierenden Hülse.

Um diese Idee zu prüfen, wurden die gleichen Messungen mit einem leicht geänderten Aufbau wiederholt. Die Magnete in der Hülse wurden jetzt durch einen 5 mm hohen Distanzblock aus Kunststoff vom Boden isoliert.

Abb. 4 zeigt das Ergebnis und bestätigt die oben genannte Idee: Es scheint der Abstand zwischen Gleitkontakt und Magnet zu sein, der die Messwerte bestimmt.

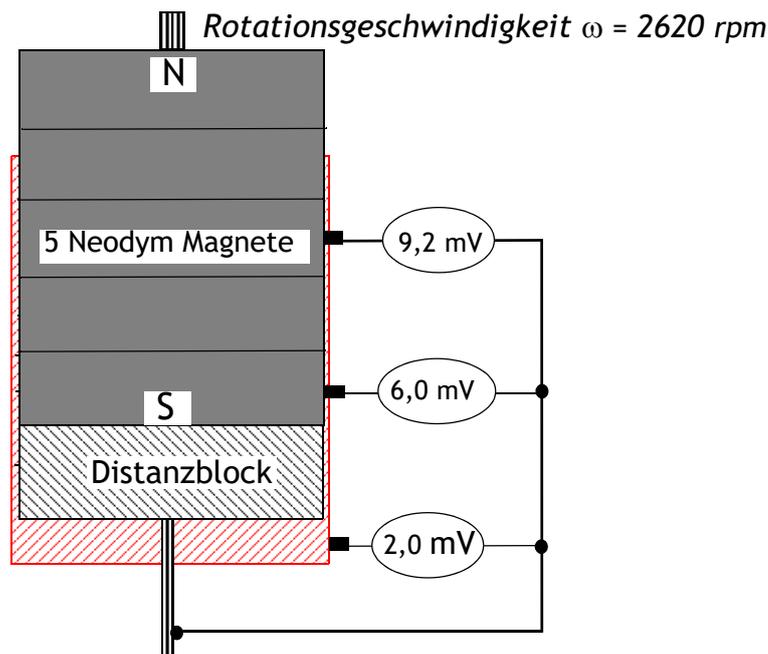


Abb. 4 Geänderter Aufbau im Vergleich zu Abbildung 3 durch Isolieren des Magneten von der Unterseite der Hülse durch einen Distanzblock.

## Diskussion

Der Aufbau wie in den Abbildungen 3 und 4 gezeigt ist zu einfach und die Messergebnisse sind zu auffällig, um als Dreckeffekt vernachlässigt werden zu können. Die Folgen sind allerdings weitreichend.

Die Idee eines stationären Magnetfeldes um einen rotierenden Magneten herum muss aufgegeben werden.

Magnetfeldlinien, die die Faradaysche Scheibe schneiden, verursachen keine Induktion.

Die Messungen stimmen nicht mit der Faradayschen Flussregel  $\varepsilon = -\frac{d}{dt}(\iint (B \cdot P \, dA))$  überein.

Der Abstand zwischen Magnet und Gleitkontakt ist wesentlich.

Kurzum: Die Annahme der allgemeinen Gültigkeit des Faradayschen Flussgesetzes und der Lorentzkraft ist fraglich.

Im Lichte einer alternativen Theorie, der des Grundgesetzes der Elektrodynamik von Wilhelm Weber, werden diese Konsequenzen noch offensichtlicher.

Webers Theorie erklärt all diese Messungen problemlos, „straight forward“ wie man im Englischen sagt. Nach dieser Theorie [Weber, 1846], [Assis, 1994] sind die wichtigen Begriffe „Relativgeschwindigkeit“ und „Relativbeschleunigung“ zwischen den wechselwirkenden Ladungsträgern.

Immer wenn zwischen zwei einzelnen Ladungsträgern eine Relativbewegung vorhanden ist, ändert sich die immer vorhandene Coulomb-Wechselwirkung zwischen diesen Teilchen geringfügig um einen Faktor proportional zu  $1/c^2$  ( $c$ = Lichtgeschwindigkeit).

Werden zwei normale makroskopische Objekte untersucht, so sind zunächst alle möglichen Coulomb-Wechselwirkungen durch die Tatsache ausgeglichen, dass Mate-

rie neutral ist und die gleiche Mengen an positiven und negativen Teilchen vorhanden sind. Wenn sich die Relativbewegung zwischen positiven und negativen Anteilen eines neutralen Körpers unterscheidet, wird dieses Gleichgewicht gestört und der zu  $1/c^2$  proportionale Weber-Faktor wird in Form von Magnetkräften sichtbar.

In Webers Theorie gibt es nur Kräfte, die entlang der Verbindungslinie der wechselwirkenden Teilchen gerichtet sind, es gibt kein  $\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$ .

In dem in diesem Artikel beschriebenen Aufbau sind die wechselwirkenden Ladungsträger, die sich relativ zueinander bewegen, zum einen die negativen leitenden Elektronen innerhalb des Gleitkontakts (in Ruhe relativ zum Labor) und zum anderen die Ampèreschen molekularen Ströme innerhalb des rotierenden Magneten, die seinen Magnetismus verursachen.

Da es keine entsprechende Relativbewegung zwischen den positiven Anteilen gibt, gleichen sich die Coulomb-Kräfte aufgrund des Weber-Faktors nicht mehr aus und es wird eine EMK induziert.

Wird der Gleitkontakt von der Unterseite der Hülse längs der Hülsenwand nach oben bewegt (Abb. 2 und 4), verringert sich der Abstand zwischen dem Zentrum des Magneten und dem Gleitkontakt. Da die Coulomb-Kräfte vom Abstand zwischen den Wechselwirkungspartnern abhängen, gilt dies auch für die induzierte EMK.

Bisher konnten alle bekannten Induktionsvorgänge mit Hilfe der Weberschen Theorie phänomenologisch erklärt werden [Härtel, 2018].

Weitere Informationen finden sich in der Literatur [Assis, 1994].

Es wurde von verschiedenen Experimente berichtet, deren Ergebnisse mit Webers Theorie übereinstimmten. Wesley [1972] berechnete das Verhalten einer Z-Antenne und fand eine Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment nur auf der Grundlage von Webers Theorie. Guala Valverde [2002] entwickelte einen ausgeklügelten Versuchsaufbau, um gemäß Weber zu zeigen, dass zwischen Magnet und externem Stromkreis eine Relativgeschwindigkeit bestehen muss, um eine Induktion zu verursachen.

Es ist erwähnenswert, auf die Ergebnisse von Kellys Experiment [1998] hinzuweisen, wonach sich das Magnetfeld mit dem Magneten mitdreht. Dies widerspricht der Standarderklärung bezüglich eines rotierenden Magneten, der durch sein eigenes stationäres Feld schneidet. Es unterstützt indirekt Webers Ansatz, der eine Relativbewegung zwischen Magnet und externem Stromkreis voraussetzt, um einen Strom zu induzieren.

## Didaktische Überlegungen

Abgesehen von einigen wenigen Fällen kommen die beiden Gesetze, Faradays Flußgesetz und Webers Kraftgesetz bei der Erklärung elektromagnetischer und elektrodynamischer Phänomene zu demselben Ergebnis.

Die fast 200-jährige Geschichte der Physik und Technologie hat gezeigt, dass das Faradaysche Gesetz ausreicht, um diese Entwicklung als Grundgesetz der Natur zu unterstützen. Warum sollte es notwendig oder sinnvoll sein, sich mit einer zweiten Theorie zu befassen?

Das Hauptargument für Webers Theorie ist didaktischer Natur. Das Thema "Elektromagnetische Induktion" findet sich in praktisch jedem Physiklehrbuch und ist, wie jeder Lehrer weiß, ein undankbares Thema mit schlechten Lernergebnissen (Zusa et al., 2016). Viele Lehrer sind zufrieden, wenn ihre Schüler wenigstens die Rechte-Hand-Regel erfolgreich anwenden können.

Ein tieferes Verständnis, warum ein sich ändernder Magnetfluss ein kreisförmiges

elektrisches Feld verursacht, kann nicht erreicht werden. Gleiches gilt für die Lorentzkraft und die Frage, warum es eine Kraft ohne direkte Gegenkraft gibt?

Wenn Schüler scheitern bei dem Versuch, ein tieferes Verständnis zu erlangen, könnten sie zu dem Schluss kommen, dass die Physik zu kompliziert ist und sie könnten das Interesse an diesem Fach verlieren. Oder, und die ist noch negativer zu beurteilen, sie kommen zu dem Schluss, dass ihre intellektuellen Fähigkeiten nicht ausreichen, um Physik zu lernen und zu verstehen. Solche Versagenserlebnisse können wie Gift wirken vor allem für Schüler mit einem schwach ausgebildeten Selbstbewusstsein.

Dagegen ist der Ansatz von Weber wesentlich einfacher zu unterrichten und er ist erfolgversprechender, um ein tieferes Verständnis aufzubauen. In diesem Ansatz gibt z.B. nur anziehende und abstoßende Kräfte, wie sie aus der Alltagserfahrung bekannt sind und die somit stets dem 3. Newtonschen Prinzip unterliegen.

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.

## Anhang

Es sei noch ein Wort gesagt zu Wilhelm Weber, der weitgehend unbekannt ist und über dessen Theorie in oft abwertendem Ton gesagt wird, es sei doch nur eine Fernwirkungstheorie und keine Feldtheorie. Es stimmt, die Webersche Theorie ist eine Fernwirkungstheorie, genau wie das Coulomb-Gesetz oder das universelle Gravitationsgesetz. Was nicht allgemein bekannt ist, ist die Tatsache, dass Weber als erster die Telegraphengleichung aufgestellt hat und nicht nur das. Er hat die Möglichkeit eines Telegraphen nicht nur theoretisch vorhergesagt, sondern realisiert, indem er zwei Drähten über die Dächer von Göttingen gespannt hat, die sein Institut mit dem Institut für Astronomie verbanden und über die er elektrische Pulse senden konnte. In Göttingen steht ein Denkmal, das an dieses Ereignis erinnert. Es zeigt Gauß und Weber und soll an den Moment erinnern, als der erste Telegraph erfunden und realisiert wurde.

(<https://www.atlasobscura.com/places/gauss-weber-telegraph-memorial>)

## Literatur

- Assis, A. K. T. and Peixoto, F. M. (1992), On the Velocity in the Lorentz Force law, *The Physics Teacher*, Vol. 30, pp. 480-483.
- Assis, A. K. T. and Thober, D. S. (1994), Unipolar Induction and Weber's Electrodynamics, in *Frontiers of Fundamental Physics*, M. Barone and F. Selleri (eds.), Plenum Press, New York, pp. 409-414.
- Assis, A. K. T. (1994), *Weber's Electrodynamics* (Kluwer, Dordrecht). Nowadays this book is available through Springer.
- Chen K., X.-J. Li and Y.-X. Hui (2017), An Experimental Study on Unipolar Induction, *Acta Physica Polonica A*, Vol. 131, pp. 271-274.
- Faraday, M. (1832), *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 122, pp. 163-194.

- Feynman, R. P.; Leighton, R. B. and Sands, M. (1969), The Feynman Lectures on Physics, Electromagnetism I, Addison-Westley, 17/3-4.
- Galili, I. and Kaplan, D. (1997), Changing approach to teaching electromagnetism in a conceptually oriented introductory physics course, Am.J.Phys.65, 657.
- Guala-Valverde, J. Mazzoni, P. and Achilles, R. (2002), The homopolar motor: A true relativistic engine, Am. J. Phys. 70, 1052.
- Härtel, H. (2018), Electromagnetic Induction: An Alternative for Teaching and Understanding. European Journal of Physics Education, 9, 2, p. 1-13.
- 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.
- Leus, V. and Taylor, St. (2011), On the motion of the field of a permanent magnet, Eur. J. Phys. 32, 1179.
- Munley, F. (2004), Challenges to Faraday's flux rule, American Journal of Physics 72, 1478.
- Scanlon, P. J.; Henriksen, R. N. and Allen, J. R. (1969), Approaches to Electromagnetic Induction, The American Journal of Physics, Volume 37, 698.
- Weber. W. (1846), Elektrodynamische Maassbestimmungen – Über ein allgemeines Grundgesetz der elektrischen Wirkung. Abhandlungen bei Begründung der Königl. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften am Tage der zweihundert-jährigen Geburtstagfeier Leibnizens, herausgegeben von der Fürstl. Jablonowskischen Gesellschaft (Leipzig), pages 211-378, 1846. Reprinted in Wilhelm Weber's Werke, Vol. 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 25-214.
- English translation: Determinations of electrodynamic measure - concerning a universal law of electrical action, translated by S. P. Johnson, edited by L. Hecht and A. K. T. Assis, 21st Century Science and Technology, posted in March 2007.
- Available at <http://21sci-tech.com/translation.html> and <https://www.ifi.uni-camp.br/~assis>
- Wesley, J. P. (1990). Weber electrodynamics, Part II. Unipolar induction, Z-antenna. Foundations of Physics Letters, 3:471-490
- Zengel, Z. (2019), The history of the Faraday paradox of the unipolar generator, Eur. J. Phys. 40, 055202.
- Zuza, K., De Cock, M., van Kampen, P., Bollen, L. and Guisasola, J. (2016), University students' understanding of the electromotive force concept in the context of electromagnetic induction. European Journal of Physics, 37(6): 065709.