

Die englische Originalfassung dieses Artikels wurde eingereicht bei "The Physics Teacher" und wurde in der März-Ausgabe 2022 Vol. 60 S.218 veröffentlicht.

## Neue Messungen zum Faraday-Generator und neue Fragen zur Induktion

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

### Zusammenfassung

Die Frage, wie die Vorgänge um den Faraday-Generator mit seinem rotierenden Magneten zu deuten sind, ist seit seiner Entdeckung durch Faraday umstritten. Rotiert das Magnetfeld zusammen mit dem rotierenden Magneten oder bleibt es stationär? Umstritten ist auch, ob man zur Deutung induktiver Vorgänge nur das Faradaysche Flußgesetz als ein allgemein gültiges Gesetz benötigt oder ob es Vorgänge gibt, bei denen dieses Gesetz versagt und sich nur mit Hilfe der Lorentzkraft eine zufriedenstellende Erklärung ergibt? Diese Frage schien in letzter Zeit entschieden zu sein zu Gunsten des Faradayschen Flußgesetzes. Es sei ein universelles Gesetz, das ohne Ausnahme auf jeden denkbaren Fall anwendbar sei. Die hier vorgestellten Messungen lassen Zweifel aufkommen ob der Gültigkeit dieser Aussage.

### Einleitung

Ein Faradayscher Generator besteht in der Regel aus einem rotierenden Magneten und einer metallischen Scheibe (Abb.1a), die entweder unabhängig oder gemeinsam mit dem Magneten rotieren kann. Besteht der Magnet aus leitendem Material, so kann die metallische Scheibe entfallen und es ergibt sich die in Abbildung 1b wiedergegebene Form eines Faradayschen Generators

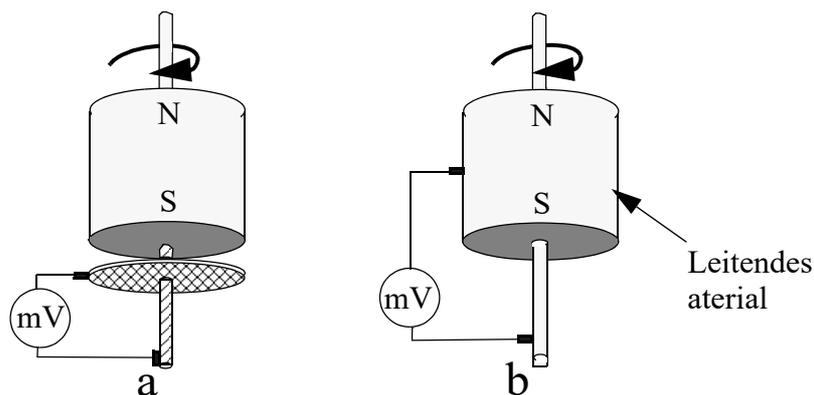


Abb. 1: Zwei Ausführungen eines Faraday-Generators

Die beim Betrieb eines Faraday-Generators auftretenden Fragen lauten:

Warum beobachtet man eine Induktion (wie zu erwarten) bei einer rotierenden Scheibe und einem stationären Magneten, aber nicht bei dem reziproken Vorgang: einem rotierenden Magneten und einer stationären Scheibe?

Warum beobachtet man eine Induktion, wenn Magnet und Scheibe gemeinsam rotieren?

Um die Beantwortung dieser Fragen gibt es eine langandauernde Diskussion. Die Geschichte dieser Diskussion begann mit der Entdeckung der paradoxen Ergebnisse bei einem Faraday-Generator durch Faraday im Jahr 1832 und dauert bis zu unserem heutigen Tage an. Strittig waren vor allem die Frage, ob das Faradaysche Flußgesetz universell ist oder ob, wie Feynman [1964] behauptet, es Ausnahmen gibt, in denen nur die Lorentzkraft eine sinnvolle Erklärung für die auftretenden Meßergebnisse liefern kann. Weiterhin ist strittig, ob das Magnetfeld bei einem rotierenden Magneten mitrotiert (sogenannte M-Theorie) oder ob es trotz des rotierenden Magneten stationär bleibt (sogenannte N-Theorie). Unstrittig ist, dass das Ausmaß des Magnetfeldes im gesamten Bereich eines um seine polare Achse rotierenden Magneten konstant ist. Aber erhält das Magnetfeld durch diese Rotation eine Bewegungskomponente oder ist es von einem stationären Magnetfeld nicht zu unterscheiden?

Auf der Basis eigener Messungen bestätigte Kelly (1998) die M-Theorie. Im Gegensatz dazu bestätigte Chen et. al. (2016) auf der Basis eigener Messungen die Gültigkeit der N-Theorie.

Nimmt man ein stationäres Magnetfeld an, so bewegen sich die Leitungselektronen innerhalb des Magneten und innerhalb der rotierenden Scheibe durch dies stationäre Magnetfeld und werden auf Grund der Lorentzkraft entweder zum Rand oder zur Achse des Magneten bzw. der Scheibe hin beschleunigt. Der Ursprung der Induktion läge innerhalb des Magneten bzw. der Scheibe. Nimmt man an, dass das Magnetfeld mit dem Magneten rotiert (M-Theorie), dann schneidet dies Magnetfeld den äußeren im Labor ruhenden Teil des Stromkreises und bewirkt auf Grund des Faradayschen Flußgesetzes einen Induktionsstrom. Der Ursprung der Induktion läge außerhalb des Magneten bzw. der Scheibe.

Eine kürzlich erschienenen Arbeit von Zengel (2019), in der eine ausführlich Darstellung dieser Diskussion zu finden ist, gipfelt in dem Satz:

In summary, the Lorentz force law and Maxwell's version of Faraday's law describe different phenomena, and may for that reason predict different emf's in certain experiments, but neither law should ever predict a result that is inconsistent with the flux rule, equation

$$\varepsilon = -\frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot d\vec{A}.$$

Zusammenfassend beschreiben das Gesetz bezüglich der Lorentzkraft und Maxwells Version des Faradayschen Gesetzes unterschiedliche Phänomene und können aus diesem Grund in bestimmten Experimenten unterschiedliche EMKs vorhersagen, aber keines der Gesetze sollte jemals ein Ergebnis vorhersagen, das nicht mit der Flussgesetz vereinbar ist. (Übersetzung H.H.)

Damit scheinen diese Fragen endgültig geklärt sein

## Die Messungen

Die folgenden Messungen lassen Zweifel aufkommen ob der Gültigkeit dieses Satzes.

Verwendet wurde ein zylinderförmiger Niodym-Magnet (20 mm Außendurchmesser, Höhe = 5mm; Zentrale Bohrung = 4mm). Als Antrieb diente eine Standbohrmaschine mit Keilriemenantrieb. Im Netz findet sich unter :

<http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/New-Measurements/Messanordnung.htm>

eine detaillierte Darstellung der verwendeten Apparatur mit hilfreichen Hinweisen.

Eine erste Kontrollmessung ergab - wie zu fordern - eine lineare Abhängigkeit der gemessenen

Induktionsspannung von der Rotationsgeschwindigkeit (Abb.2).

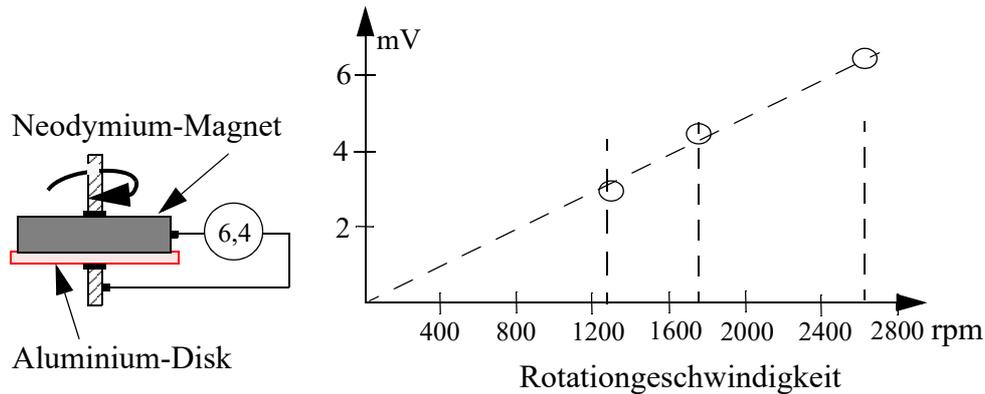


Abb. 2:  $U_{ind} = f(\omega)$

Abbildung 3a zeigt den verwendeten Magneten zusammen mit dem wie üblich durch Linien angedeuteten Magnetfeld, das als rotationssymmetrisch um den Magneten herum zu denken ist.

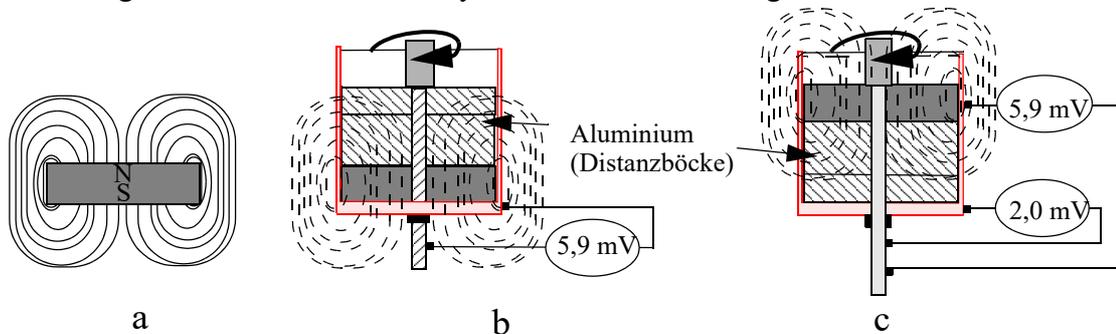


Abb. 3: Darstellung der durchgeführten Messungen. (siehe Text)  
Rotationsgeschwindigkeit: 2620 rpm

Die neuen Messungen, von denen hier die Rede ist, sind in Abbildung 3b und 3c dargestellt. In einem ersten Schritt wurde die Scheibe zu einer Art Hülse mit relativ dünnen Seitenwänden erweitert, der Magnet direkt über dem Boden der Hülse angebracht, und es wurde die induzierte Spannung zwischen Rand des rotierenden Bodens und der Rotationsachse gemessen (Abb. 3b). In einem zweiten Schritt wurde der Magnet innerhalb dieser Hülse in einem großen Abstand vom Boden der Hülse mit Hilfe zweier Distanzblöcke angebracht. Die Messung zwischen dem Boden der Hülse und der Rotationsachse ergab, wie zu erwarten, wegen des dort vorhandenen schwachen Magnetfeldes einen entsprechend kleineren Meßwert für die induzierte Spannung. Welche Auswirkungen sind durch die Seitenwände der rotierenden Hülse zu erwarten? Sie bewegen sich vor allem in der Nähe des Magneten vorwiegend parallel zu den Magnetlinien, so dass kaum ein "Schneiden" derselben vorkommt. In erster Näherung sollte somit kein größerer Einfluss auf das Meßergebnis zu erwarten sein.

Das Gegenteil ist der Fall.

Der Wert der gemessenen Induktionsspannung steigt auf der Höhe des Magneten wieder auf den gleichen Wert an wie derjenige Wert, der am Boden der Hülse, wie in Abbildung 3b dargestellt, gemessen wurde (Abb.3c).

Wie ist dieses Meßergebnis auf der Basis des Faradayschen Flußgesetzes oder der Lorentzkraft zu erklären? Wo ist die Fläche mit einer vergrößerten magnetischen Flußänderung, oder wo ist die vergrößerte Anzahl von "geschnittenen" Feldlinien?

Diese Frage muß, wenn es denn möglich ist, auf der Grundlage des Faradayschen Flußgesetzes geklärt werden, sofern das Flußgesetz ein Naturgesetz ist und nicht nur eine Regel, die meistens

zutritt.

Sofern ein Zugang zu einer Werkstatt besteht, um die notwendigen rotationsymmetrischen Teile herzustellen, könnte es eine interessante Aufgabe sein, mit einer Klasse oder einer Gruppe von Studenten diese Versuche zu wiederholen, zu überprüfen und zu versuchen, eine Antwort auf die obigen Fragen zu finden. Eine zusätzliche Aufgabe wäre es, vorherzusagen, wie sich Hülsen mit dickeren Seitenwänden auswirken würden, und dann die Vorhersage experimentell zu überprüfen..

Betrachtet man dieses Meßergebnis mit unvoreingenommenen Blick, so scheint es, dass zum Auftreten einer Induktionsspannung bei einem Farady-Generator nicht die Scheibe, sondern der Abstand zwischen Schleifkontakt und Magnet von Bedeutung ist. Dies wäre im Einklang mit einer Theorie aus den 19. Jahrhundert, aufgestellt von Wilhelm Weber. In dieser Theorie wird die Coulombkraft als Interaktion zwischen zwei Ladungsträgern oder zwei Gruppen von Ladungsträgern betrachtet, die dadurch beeinflusst wird, dass zwischen diesen eine relative Geschwindigkeit oder/und eine relative Beschleunigung vorhanden ist.

Aber bevor auf diese Erklärungsmöglichkeit näher eingegangen wird, soll zunächst abgewartet werden, ob die vorgestellten Messung als reproduzierbar bestätigt werden und ob eine zufriedenstellende Antwort auf die obigen Fragen gefunden werden kann.

Weiter Informationen zur der Theorie von Weber finden sich in der Literatur (Assis, 1994) (Härtel, 2018):

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 Drähte über die Dächer von Göttingen gespannt hat, die sein Institut mit dem Institut für Astronomie verbunden 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 weltweit erste Telegraph erfunden und realisiert wurde.

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

## Literatur

- Assis A.K.T. (1994) Weber's Electrodynamics, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 055202 (10pp)
- Chen K., X.-J. Li and Y.-X. Hui (2016) An Experimental Study on Unipolar Induction, *Acta Physica Polonica A*, Vol. 131.
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. L. (1964). *The Feynman Lectures on Physics: Electromagnetism and matter (Vol. 2)*. Addison-Wesley Publishing Company
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. L. (1964). *The Feynman Lectures on Physics: Electromagnetism and matter (Vol. 2)*. Addison-Wesley Publishing Company
- 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.
- Zengel, K. (2019) The history of the Faraday paradox of the unipolar generator, *Eur. J. Phys.* **40** (2019, 055202 (10pp))