

Höhere Experimentalphysik I

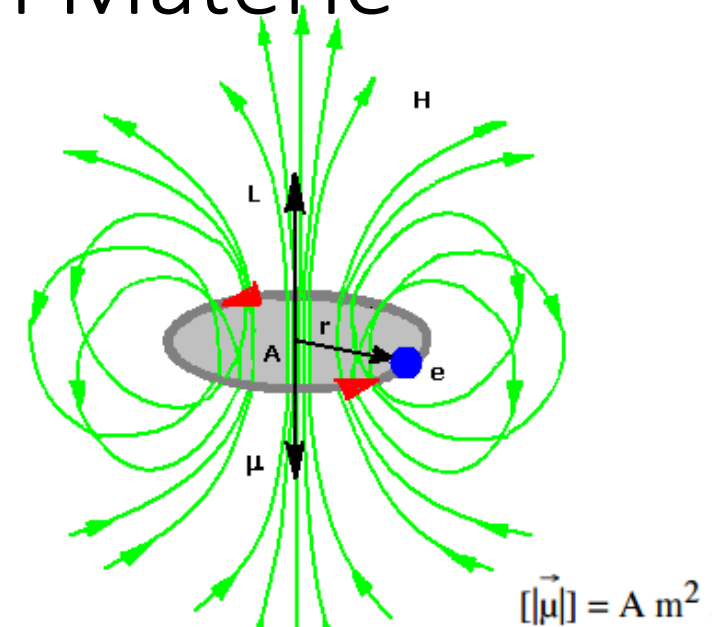
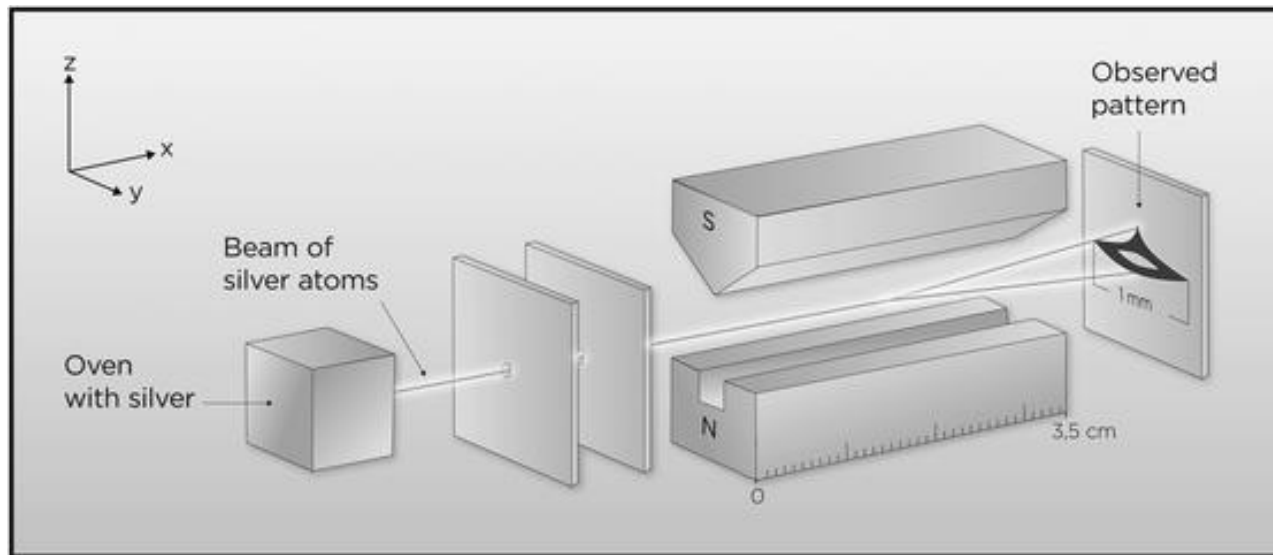
Institut für Angewandte Physik
Goethe-Universität Frankfurt am Main

Wintersemester 2020/21

1. Teil / 8. Vorlesung
29.01.2021

Elektrische und magnetische Felder in Materie

Materie im Magnetfeld - das magnetische Moment



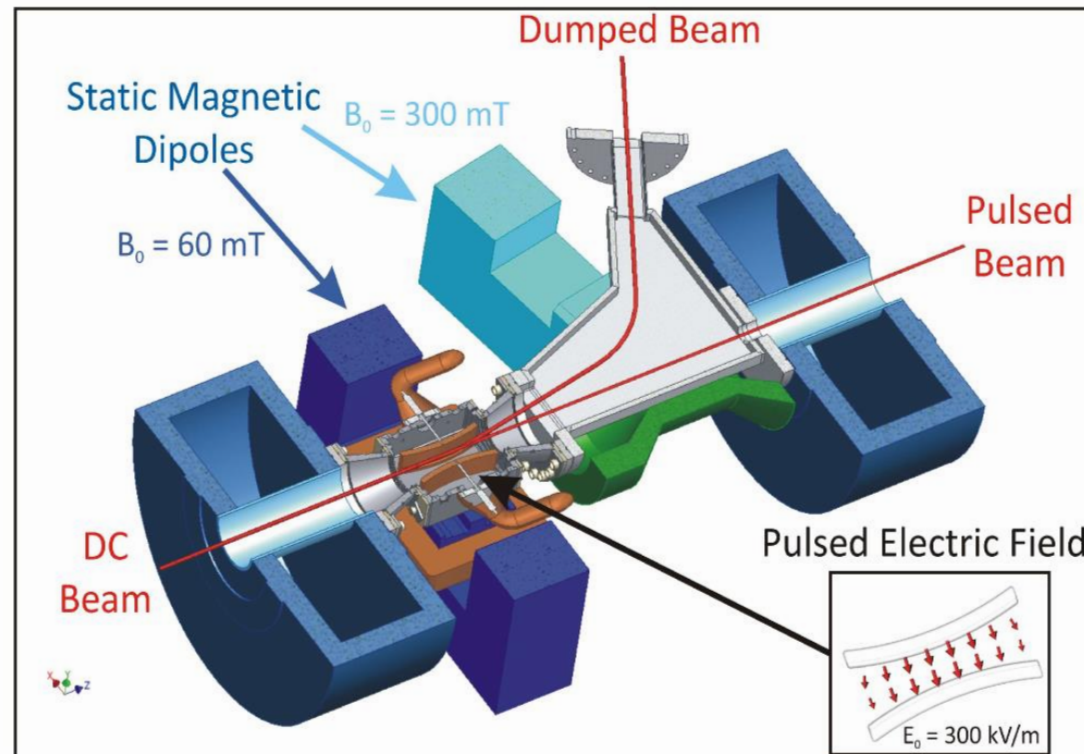
Das magnetische Moment immer gemeinsam mit einem Bahndrehimpuls L auf.

Messung des magnetischen Moments durch das Stern-Gerlach Experiment:

Auf einen magnetischen Dipol wirkt im inhomogenen Magnetfeld eine Ablenkkraft, die ihren größten Wert $F = m \cdot \text{grad } B$ für die Dipole erreicht die antiparallel zum Feld orientiert sind. Daher lässt sich bei bekanntem Feldgradienten aus dem maximalen Ablenkwinkel des Atomstrahls das atomare magnetische Moment bestimmen.

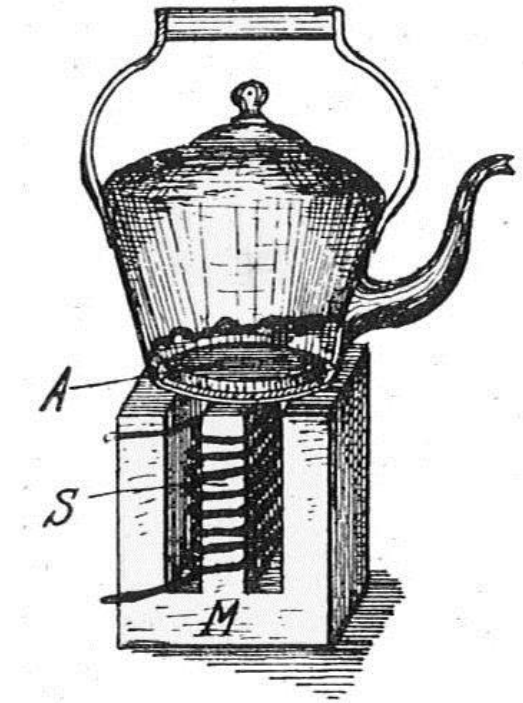
μ -Metall

- Um magnetische Felder besser abschirmen zu können wurde „ μ -Metall“ entwickelt (engl. Mu-Metal or permalloy)



Induktion

- Wenn man mit Strom ein Magnetfeld erzeugt, kann man mit einem Magnetfeld dann auch Strom erzeugen?
 - Ja – wurde bei der Untersuchung der Hysterese bereits angewandt
- Stromdurchflossene Leiterschleife erzeugt magnetischen Fluss
- Änderung des magnetischen Flusses durch eine Leiterschleife erzeugt einen Strom
 - Proportionalitätskonstante L



Faradaysches Induktionsgesetz



M. Faraday, 1831

Ein veränderlicher magnetischer Fluss durch eine Oberfläche induziert ein elektrisches Feld in jeder Grenzfläche dieser Oberfläche, und ein veränderliches Magnetfeld induziert ein zirkulierendes elektrisches Feld.

$$\oint_{\partial A} \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \int_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A} \Leftrightarrow U = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad \Phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

$$\text{rot} \vec{E} = - \dot{\vec{B}}$$

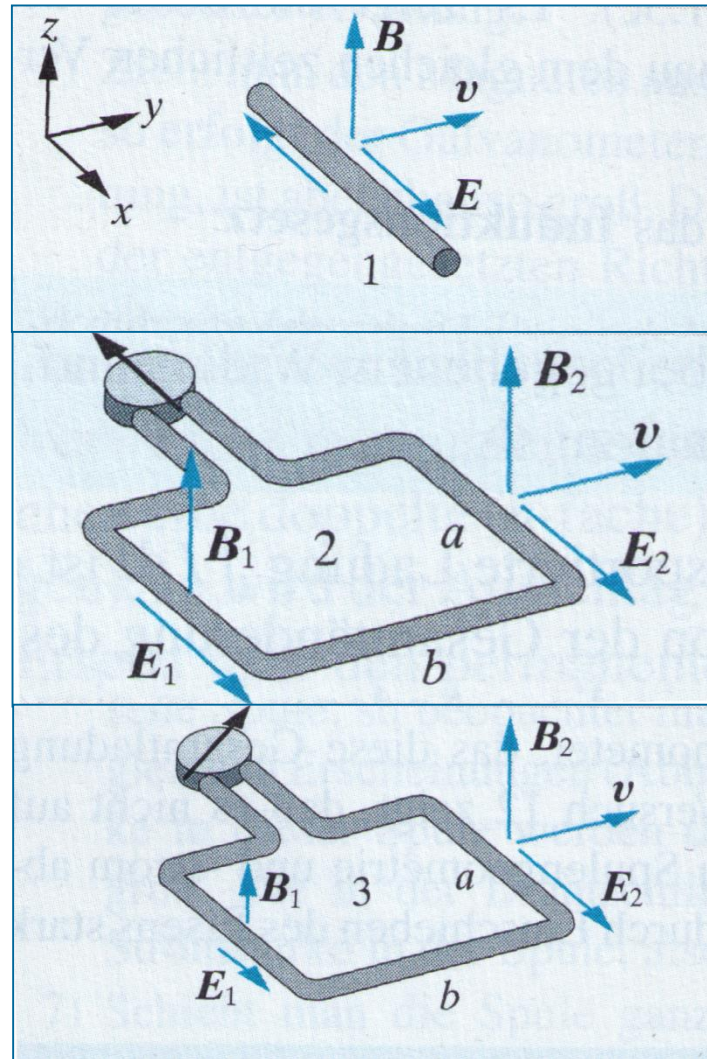
Faradaysches Induktionsgesetz

Laborsystem

Ein Draht fliegt durch ein B-Feld und die Lorentz-Kraft treibt Ladungen nach rechts bis ein Gegenfeld : erzeugt wird.

Die Drahtschleife durch ein homogenes B-Feld. Die E-Felder in den beiden zweigen kompensieren sich. Es entsteht keine Gesamtspannung.

Die Drahtschleife durch ein inhomogenes B-Feld. Die E-Felder in den beiden zweigen kompensieren sich nicht. Es entsteht eine Gesamtspannung:



Bezugssystem

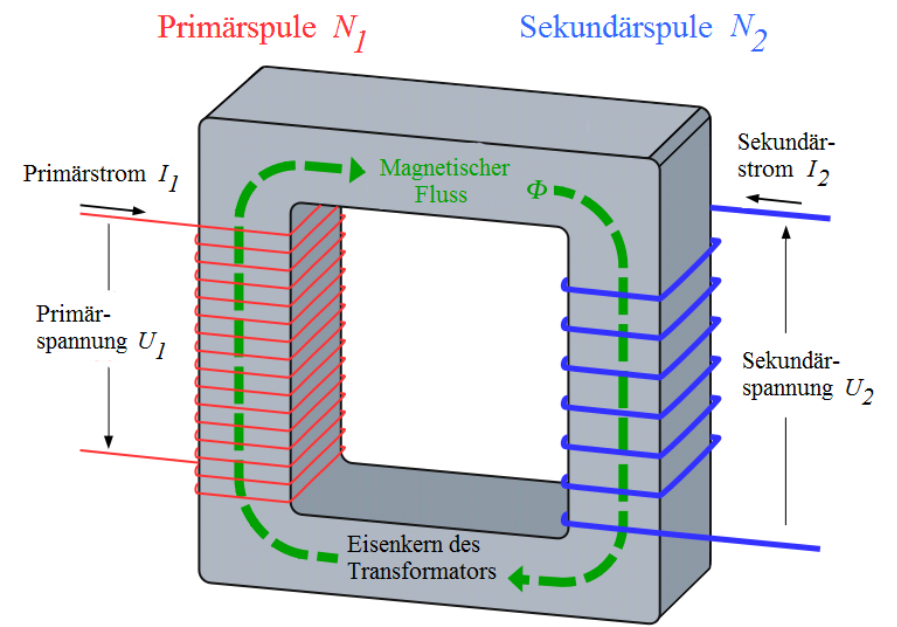
Es herrscht ein Feld B , quer dazu ein Feld das dadurch kompensiert wird.

Es herrscht ein B-Feld, quer dazu ein E-Feld, beide sind homogen. Ein Voltmeter schlägt nicht aus.

B steigt zeitlich an. Es entsteht eine Spannung:

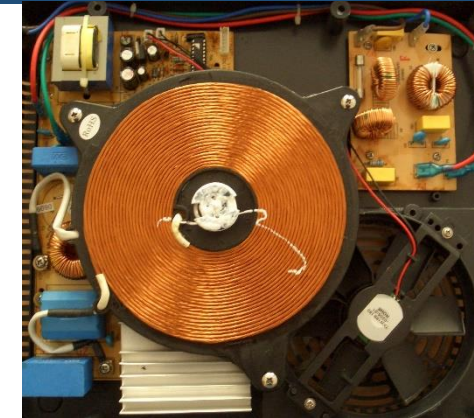
Anwendungen

Der Transformator



Dieser Effekt kann vielfach genutzt werden:
Betatron, Transformator, Generator (Dynamo),
Wirbelstrombremse, Induktionskochfeld, Tonabnehmer,
Mikrofone, Signal- & Ampel-Anforderungen, RFID, ...

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1f/Induktionskochfeld_Spule.jpg



https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:2007-03-21_B_59_n_-_6.JPG

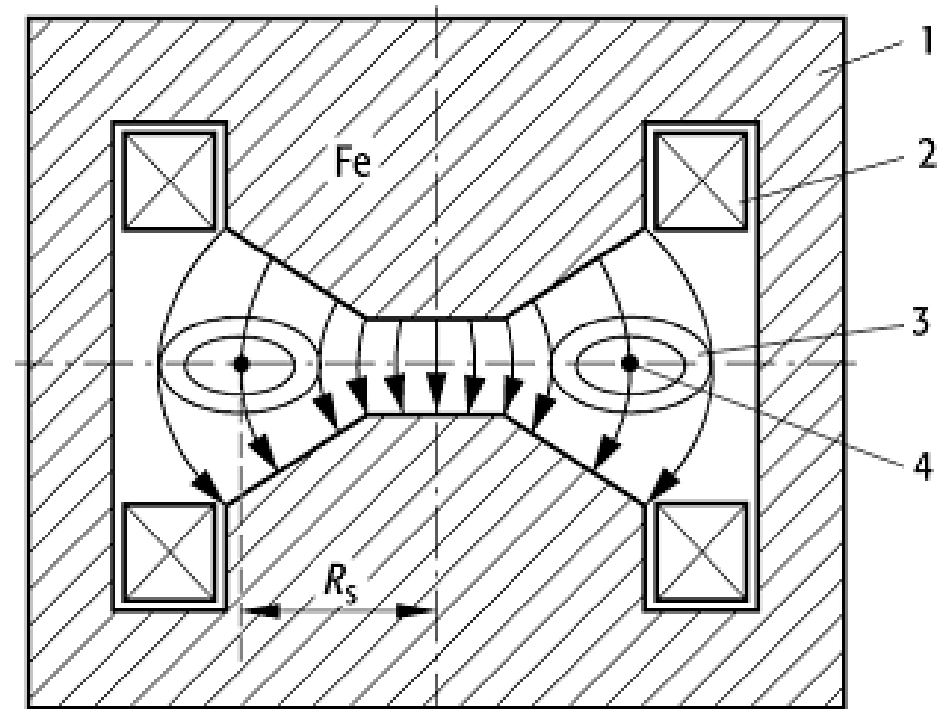
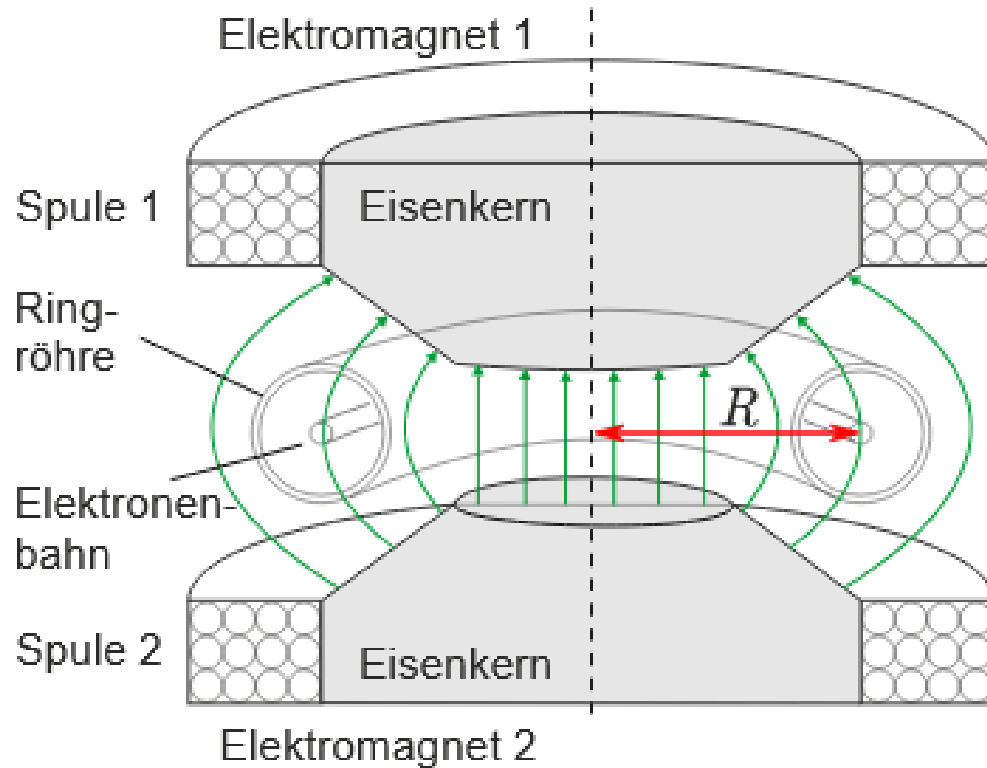
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0e/Goliath_Brakes.jpg



https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Wirbelstrombremse_aktiv.jpg

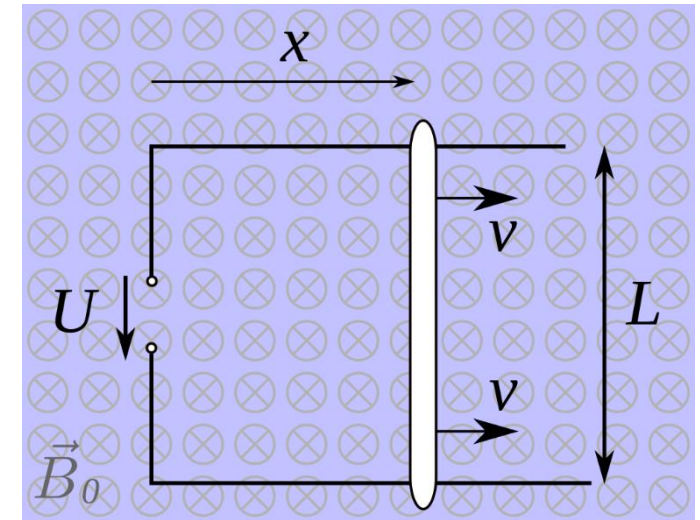


Betatron



Unipolarinduktion

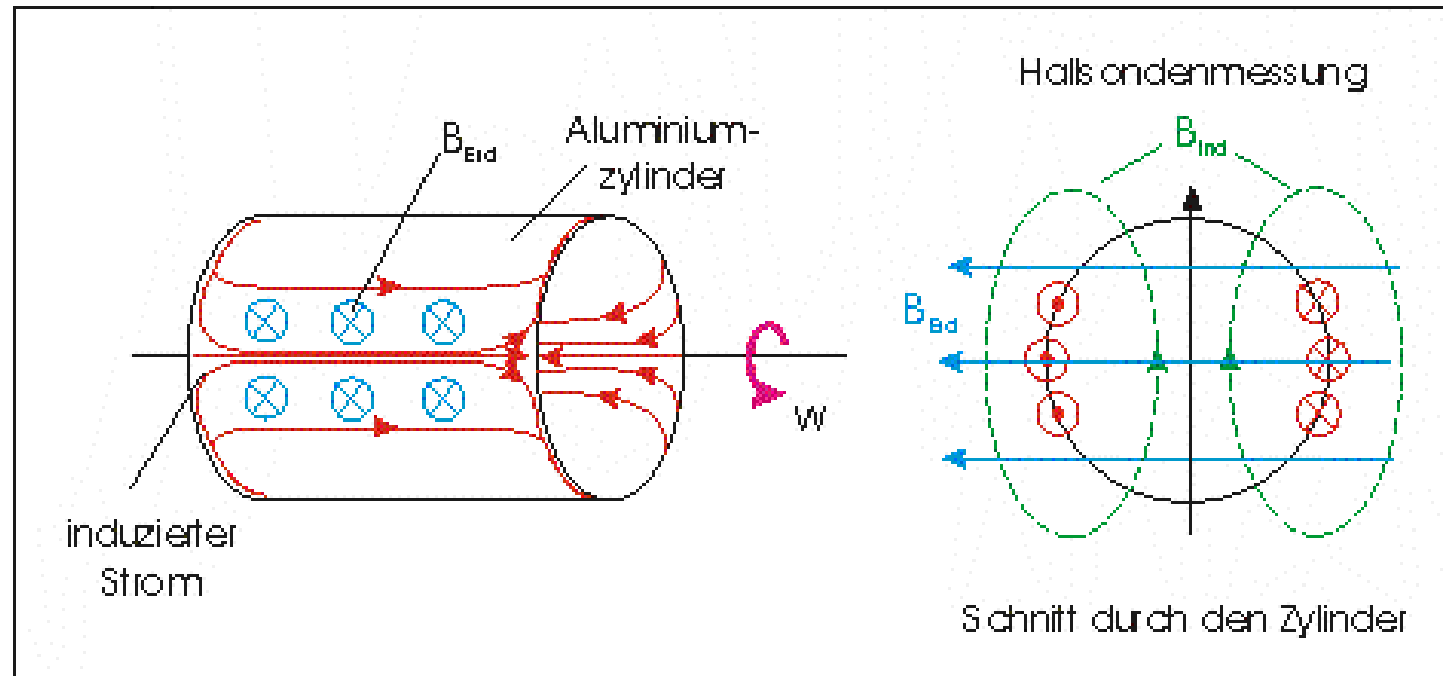
- Bewegung eines Leiters in einem homogenen Magnetfeld
- Lorentzkraft verursacht eine Ladungstrennung bis zum Gleichgewicht mit der Coulombkraft
- In Ruhe gleicht sich die Ladungstrennung wieder aus



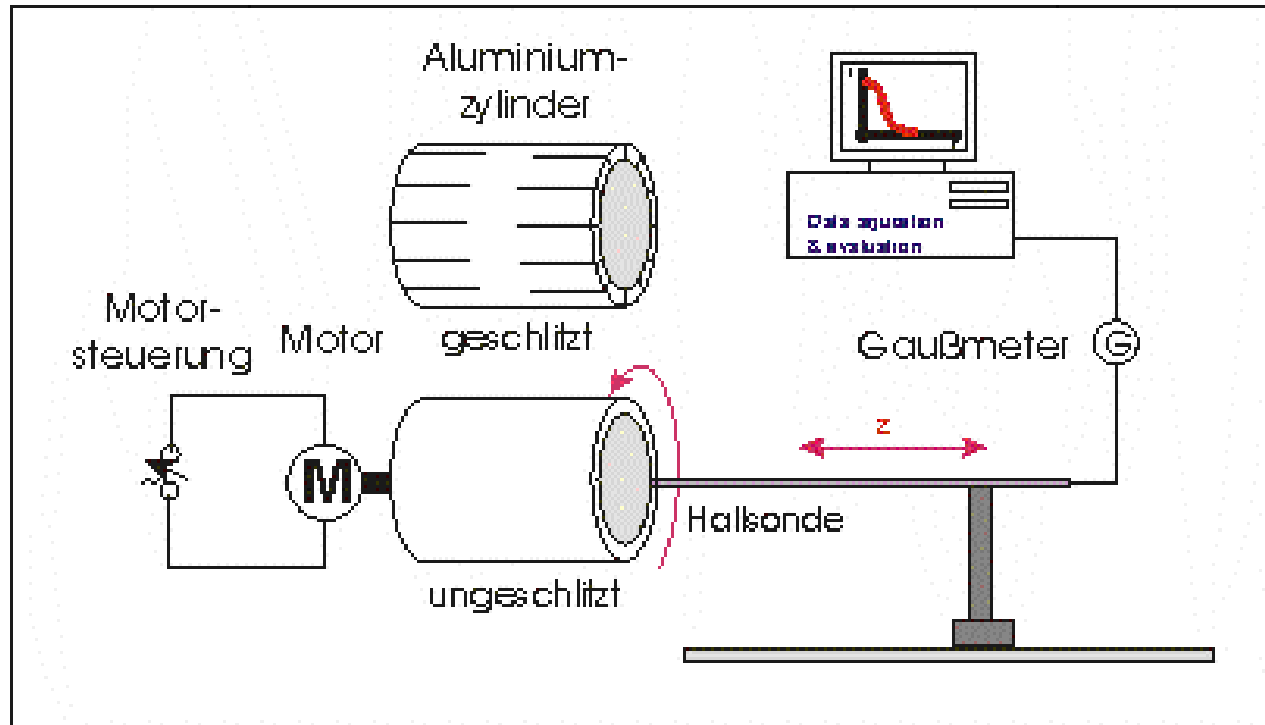
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/ea/Bewegter_Leiter_im_Feld.svg/999px-Bewegter_Leiter_im_Feld.svg.png

Versuch: Induktion

Wirbelfeld auf einem rotierenden Zylinder im Erdmagnetfeld



Versuch: Induktion



für ein Flächenelement $d\vec{A}$ auf dem Zylinder ergibt sich der magnetische Fluß:

$$\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

$$\phi = \vec{B}_{\text{Erd}} \cdot \vec{A} \cdot \cos\Theta$$

$$\dot{\phi} = -\omega \cdot \vec{B}_{\text{Erd}} \cdot \vec{A} \cdot \sin\omega t$$

$$U_{\text{ind}} = \omega \cdot \vec{B}_{\text{Erd}} \cdot \vec{A} \cdot \sin\omega t = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

daraus resultiert der induzierte Wirbelstrom:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$$

Das gemessene Erdmagnetfeld hatte eine Stärke von: $B_{\text{Erd}} = 5.6 \text{ mT}$.

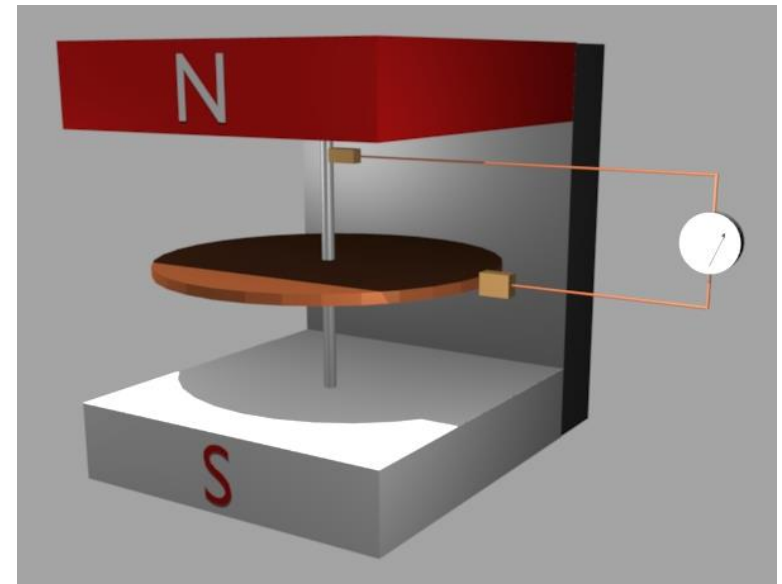
Im ungeschlitzten Zylinder wurde ein Magnetfeld von $B_{\text{Ind}} = 0,006 \text{ mT}$ erzeugt.

Im geschlitzten Zylinder baute sich kein Magnetfeld auf, da die Wirbelströme durch die Schlitze unterbrochen wurden.

Unipolarmaschine

- Weiterentwickelte Idee zur Nutzung der unipolaren Induktion

- 3 Fälle:
 - Scheibe rotiert, Rest ruht
 - Alles rotiert
 - Scheibe, Kabel und Voltmeter rotieren, Magnet ruht bzw. nur Magnet rotiert



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/36/Faraday_disc.jpg

Zusammenfassung bisher

- Ruhende elektrische Ladungen erzeugen elektrische Felder, deren Feldlinien in den Ladungen beginnen oder enden:

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} \, da = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0} \qquad \vec{\nabla} \times \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

- Der Gesamtfluss durch eine geschlossenen Oberfläche ist Null.

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \, da = 0 \qquad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

- Ströme d.h. bewegte Ladungen, erzeugen Magnetfelder, deren geschlossenen Feldlinien die Ströme umkreisen

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 \cdot I \qquad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

- Sich ändernde Magnetfelder erzeugen elektrische Felder, deren geschlossene Feldlinien die Änderungsrichtung des Magnetfeldes umkreisen

$$\oint_s E \cdot ds = - \oint_s \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dA \qquad \vec{\nabla} \times \vec{E} = \frac{-\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Das Amperesche Gesetz

Im Ampereschen Gesetz wird ausgesagt, dass jeder Leitungsstrom I von magnetischen Feldlinien umgeben ist:

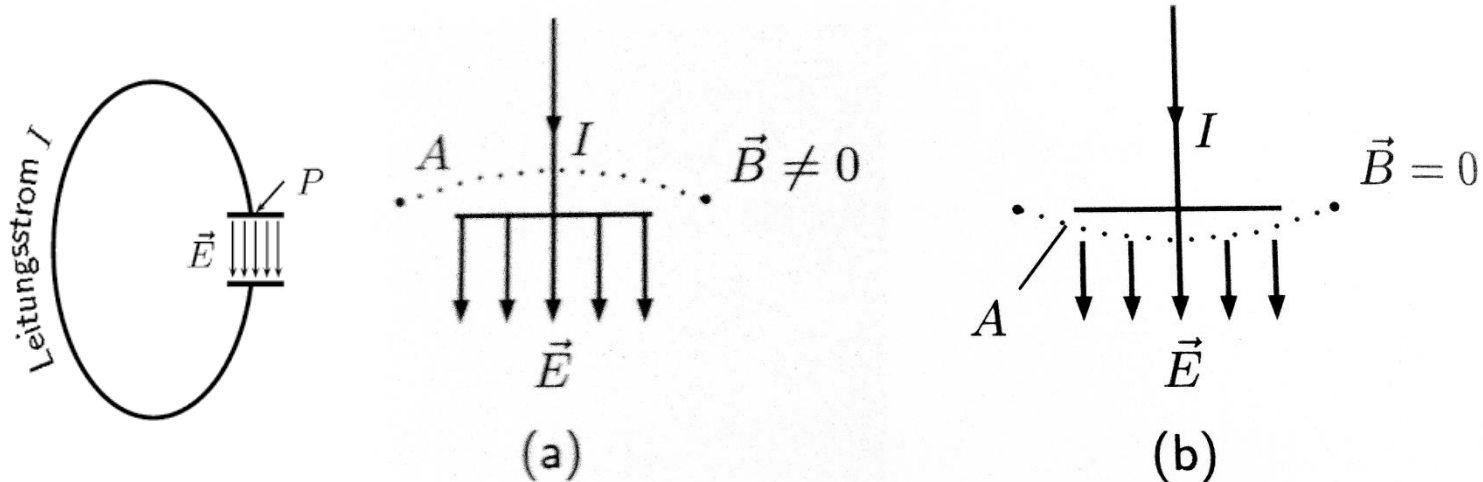
$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 \cdot I \quad \text{Erweiterung durch Maxwell 1850}$$

Das bedeutet, das Linienintegral $\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$ über einen beliebigen, geschlossenen Integrationsweg C ist gleich μ_0 mal dem vom Integrationsweg eingeschlossenen Strom I :

Magnetfelder werden von bewegter Ladung erzeugt.

Maxwell wies als Erster darauf hin, dass das Gesetz in dieser Form bei Wechselstromkreisen mit Kondensatoren keine eindeutigen Werte liefert.

Das Amperesche Gesetz - Erweiterung



$$E = \frac{Q/A}{\epsilon_0} \Rightarrow Q = A \cdot \epsilon_0 \cdot E$$

Leitungsstrom in den Kondensator:

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I$$

Wenn man nun auf der rechten Seite von $I = \frac{\partial Q}{\partial t} = A \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial E}{\partial t}$ den von der elektrischen Feldstärke abhängigen sogenannten Verschiebungsstrom addieren, erhalten wir in beiden Fällen dieselbe magnetische Feldstärke.

Der Verschiebungsstrom ist allgemein gegeben durch Integration über $\mathbf{E} \, d\mathbf{A}$:

$$I = \epsilon_0 \cdot \frac{d}{dt} \int_A \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A}$$

Das Ampere-Maxwellsche Gesetz

Ein elektrischer Strom oder ein veränderlicher elektrischer Fluss durch eine Oberfläche produziert ein zirkulierendes magnetisches Feld um jeden Pfad der diese Fläche begrenzt.

Integralform:
$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \left(I + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \right)$$

Differentielle Form:
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$$

Das Ampere-Maxwellsche Gesetz

Ein veränderliches elektrisches Feld erzeugt ein veränderliches Magnetfeld auch wenn keine Ladungen vorhanden sind und kein Strom fließt. Durch diesen Mechanismus (d.h. veränderliche elektrische Felder induzieren Magnetfelder, veränderliche Magnetfelder induzieren elektrische Felder usw.) können elektromagnetische Wellen selbst durch ein perfektes Vakuum propagieren.

Das Einbeziehen des Verschiebungsstroms in das Amperesche Gesetz war der bedeutende Schritt, der es Maxwell erlaubte die bekannten elektromagnetischen Gleichungen zu einer Wellengleichung zu kombinieren und somit „*eine dynamische Theorie des elektromagnetischen Feldes*“ zu entwickeln.

Das Magnetfeld einer freien elektromagnetischen Welle rührt nur vom Verschiebungsstrom!

Elektromagnetische Wellen

Nachdem Maxwell die Existenz von elektromagnetische Wellen vorhergesagt hatte, gelang um 1860 Heinrich Hertz erstmals die Erzeugung von Radiowellen und der Nachweis, dass sie sich mit der Lichtgeschwindigkeit

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 299\,793 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

ausbreiten.

Schönes Wochenende!