

1.2.10 Gegenüberstellung von elektrostatischem und magnetischem Feld

Elektrostatistisches und magnetisches Feld

Elektrostatistisches und magnetisches Feld zeigen einige Analogien:

	elektrisches Feld	magnetisches Feld
Energiedichte	$w = 1/2 \cdot E \cdot D$	$w = 1/2 \cdot B \cdot H$
Grundgleichung	$D = \epsilon \cdot E$	$B = \mu \cdot H$

Vertiefte Auffassung der Induktion

Zwischen elektrischem und magnetischem Feld bestehen weitere Verbindungen:

Nach dem Induktionsgesetz wird in einem zeitlich veränderlichen Magnetfeld eine Spannung an den Enden einer darin befindlichen Leiterschleife mit dem Flächeninhalt A induziert:

$$U_{\text{ind}} = -n \cdot \frac{d\Phi}{dt},$$

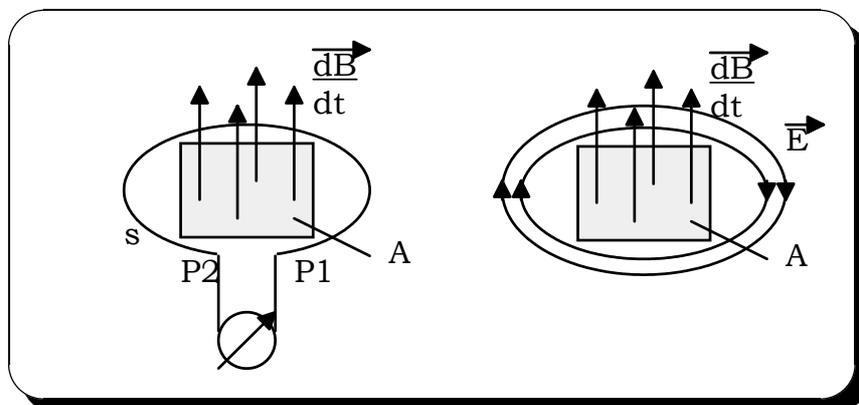
die direkt mit einem Voltmeter oder indirekt über den in der Leiterschleife fließenden Induktionsstrom nachweisbar ist. Für diese Spannung ist die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A}$ durch die Leiterschleife verantwortlich.

Die in der Leiterschleife vorhandenen Leitungselektronen der Ladung e erfahren eine Kraft $\vec{F} = e \cdot \vec{E}$, die eine Verschiebung dieser Elektronen bewirkt. Zwischen den Endpunkten P_1 und P_2 der Leiterschleife wird die Spannung

$$U_{\text{ind}} = - \int_{P_1}^{P_2} \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

aufgebaut.

Skizze:



Diese Beziehung gilt auch, wenn die Leiterschleife nicht aufgeschnitten ist. Dann fallen P_1 und P_2 zusammen. Die Leiterschleife wird bei der Integration

einmal ganz im positiven Umlaufsinn durchlaufen. Um dies zu verdeutlichen, werden keine Integrationsgrenzen mehr angegeben und ein Kreis in das Integralzeichen eingezeichnet:

$$U_{\text{ind}} = -\oint \vec{E} \cdot d\vec{s}.$$

Im Innern der Leiterschleife muß also ein elektrisches Feld E vorhanden sein, wobei der wesentliche Unterschied zu den bisher betrachteten Feldern darin besteht, daß die Feldlinien, die bei der Änderung des magnetischen Flusses entstehen, weder Anfang noch Ende besitzen, sondern in sich geschlossene Feldlinien darstellen.

Ein solches Feld heißt elektrisches Wirbelfeld. Dieses Feld existiert unabhängig von den zu seinem Nachweis in dieses Feld gebrachten Ladungen in der Leiterschleife. Diese ist lediglich ein Nachweisgerät für das elektrische Feld.

Diese Überlegungen können durch folgenden Versuch bestätigt werden:

V.: Eine mit einem He-Ne-Gasgemisch gefüllte Entladungsröhre ist von einer Ringspule umschlossen. Durch Anlegen einer hochfrequenten Wechselspannung wird ein hochfrequentes Magnetfeld erzeugt.

E.: In der Entladungsröhre kann man einen hell leuchtenden Ring beobachten.

Erklärung: Das magnetische Wechselfeld umgibt sich mit einem elektrischen Wechselfeld. Frei bewegliche Elektronen werden in der Entladungsröhre beschleunigt und regen die Neonatome zum Leuchten an. In der Röhre besteht also ein elektrisches Feld, obwohl keine Spannung an der Röhre anliegt.

Zusammenfassung: Ein sich änderndes Magnetfeld ist von geschlossenen elektrischen Feldlinien umgeben.

Anmerkung:

Es ist charakteristisch für dieses elektrische Wirbelfeld, daß - im Gegensatz zum elektrischen Potentialfeld (Quellenfeld) - der Wert des Linienintegrals nicht Null ist.

Grundzüge der Maxwell'schen Theorie

Dem schottischen Physiker James Clerk Maxwell (1831 - 1879) gelang es, Faradays Ideen von der Verknüpfung elektrischer und magnetischer Felder in einem umfassenden Gleichungssystem zusammenzufassen.

Im vorherigen Absatz wurde bereits die 2. Maxwell-Gleichung formuliert, die besagt, daß ein sich änderndes Magnetfeld von geschlossenen elektrischen Feldlinien umgeben ist:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt}(\vec{A} \cdot \vec{B})$$

Die 1. Maxwell- Gleichung besagt, daß auch jedes sich zeitlich ändernde elektrische Feld mit ringförmig geschlossenen magnetischen Feldlinien, einem magnetischen Wirbelfeld, umgeben ist.

Für die magnetische Feldstärke in der Nähe eines geradlinigen stromdurchflossenen Leiters gilt die Beziehung

$$B = \mu_0 \cdot \frac{I}{2r\pi}$$

als Sonderfall von

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \cdot I.$$

Denkt man sich in den stromdurchflossenen Leiter einen Kondensator eingefügt, wird dieser, so lange Strom fließt, aufgeladen. Außerdem baut sich im Kondensator ein elektrisches Feld auf. Dabei besteht zwischen der elektrischen Feldstärke E und der felderzeugenden Ladung Q des Kondensators die Beziehung

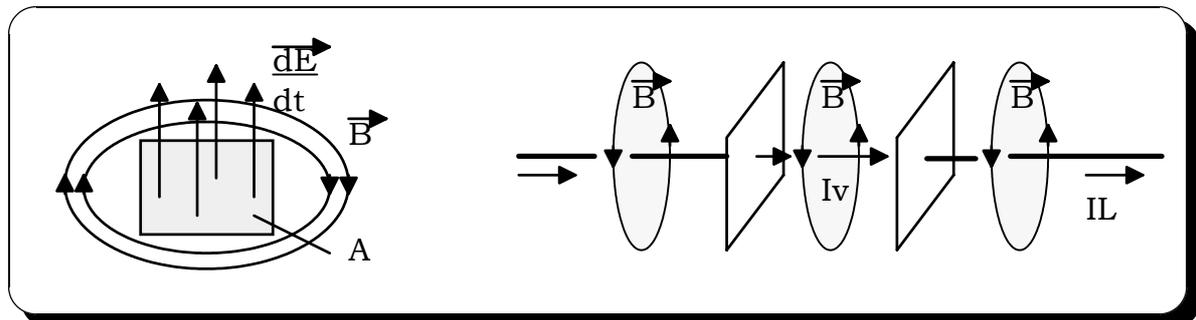
$$\frac{Q}{A} = \epsilon_0 \cdot E \Rightarrow Q = \epsilon_0 \cdot E \cdot A.$$

Daraus folgt durch Differentiation nach t

$$\frac{dQ}{dt} = I_v = \epsilon_0 \cdot \frac{d(\vec{E} \cdot \vec{A})}{dt}.$$

Es war Maxwells Idee, daß das magnetische Wirbelfeld nicht an den Kondensatorplatten endet. Auch zwischen den Platten ist das sich zeitlich ändernde elektrische Feld von einem magnetischen Wirbelfeld umgeben.

Skizze:



Dort, wo der Leiter unterbrochen ist und keine Strom fließt und statt dessen ein veränderliches elektrisches Feld vorhanden ist - nämlich im Kondensator -, ersetzt der "Verschiebungsstrom"

$$I_v = \epsilon_0 \cdot \frac{d(\vec{E} \cdot \vec{A})}{dt}$$

den Leitungsstrom I_L .

Mit Berücksichtigung des Verschiebungsstroms lautet die 1. Maxwellsche Gleichung so:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \cdot I + \mu_0 \cdot I_v = \mu_0 \cdot I + \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{d(\vec{E} \cdot \vec{A})}{dt}.$$

Wenn im leeren Raum kein Strom, sondern nur ein zeitlich veränderliches elektrisches Feld vorhanden ist, entfällt auf der rechten Seite der Term $\mu_0 \cdot I$, und es gilt die 1. Maxwell-Gleichung im Vakuum

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{d(\vec{E} \cdot \vec{A})}{dt}.$$

Zusammenfassung:

1. Maxwell-Gesetz: Elektrische Ströme und zeitlich veränderliche elektrische Felder sind von magnetischen Wirbelfeldern umschlossen (Durchflutungsgesetz).
2. Maxwell-Gesetz: Zeitlich veränderliche magnetische Felder sind von elektrischen Wirbelfeldern umschlossen (Induktionsgesetz).

Zur Ergänzung:

1. Gaußscher Satz:

$$Q = \varepsilon_0 \cdot \oint \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

Elektrische Ladungen sind Quellen eines elektrischen Flusses.

2. Satz vom magnetischen Fluß:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

Magnetische Felder haben keine Quellen; es gibt keine "Magnetladungen".