1 Das elektrische Feld

1.1 Ladungen

Es gibt **positive** und **negative** Ladungen.

Ein Körper ist **neutral** geladen, wenn er gleichviele positive wie negative Ladungen besitzt. Ein Körper mit **Elektronenmangel** ist **positiv** geladen. Ein Körper mit **Elektronenüberschuss** ist **negativ** geladen.

Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab und **ungleichnamige Ladungen** ziehen sich an.

Die Einheit der Ladung ist das **Coulomb** (C) und das Größensymbol ist das kleine q oder große Q. $[Q] = 1\,\mathrm{C} = 1\,\mathrm{As}$

In einem **elektrischen Leiter** können sich Ladungen frei bewegen.

Die gerichtete Bewegung von Ladungen bezeichnet man als **elektrischen Strom**. Die Einheit der **elektrischen Stromstärke** ist das **Ampere** (A) und das Größensymbol ist I.

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \qquad [I] = 1\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{s}} = 1\,\mathrm{A}$$

In einem I-t-Diagramm findet man die Ladung als die Fläche unter dem Graphen.

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I(t)\mathrm{d}t$$

Die Ableitung der Ladungs-Zeit-Funktion $Q(t)$ ist die Stromstärke.

$$I(t) = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = \dot{Q}(t)$$

1.2 Felder

In einem **homogenen Feld** ist die Feldstärke in Richtung und Betrag überall gleich. Ändert sich die Feldstärke nur mit dem Abstand von der Punktquelle (Radius), dann redet man von einem **radialsymmetrischen Feld**. In einem **stationären Feld** ist die Feldstärke in Richtung und Betrag zeitlich konstant. Ändert sich die Feldstärke periodisch mit der Zeit, dann redet man von einem **Wechselfeld**.

1.2.1 E-Feld

Das **elektrische Feld** ist der Bereich, in dem auf einen geladenen Körper eine elektrische Kraft wirkt. Ein elektrisches Feld existiert um jeden **geladenen Körper** und auch im **Vakuum**.

Wirkt auf einen Leiter ein elektrisches Feld, so kommt es in dem Leiter zu einer **räumlichen Ladungstrennung**. Dies bezeichnet man als **elektrische Influenz**.

Das Innere eines **Faraday-Käfigs** ist **feldfrei**.

1.2.2 G-Feld

Das **Gravitationsfeld** ist der Bereich, in dem auf eine Masse eine Gravitationskraft wirkt. Ein Gravitationsfeld existiert um jede **Masse** und auch im **Vakuum**.

Das Innere einer **Hohlkugel** ist **feldfrei**.

1.2.3 M-Feld

Das **magnetische Feld** ist der Bereich, in dem auf einen Magneten oder einen magnetischen Körper eine magnetische Kraft wirkt. Ein Magnetfeld existiert um jeden **Magneten** und auch im **Vakuum**.

1.3 Elektrische Feldstärke

Eine **Probeladung** ist ein elektrisch geladener Körper, dessen Ladung so klein ist, dass er das umgegebende elektrische Feld nicht beeinflusst.
Die **elektrische Feldstärke** ist der Quotient aus der auf eine positive Probeladung wirkenden elektrischen Kraft $\vec{F}$ und deren Ladung q.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \qquad \vec{F} = \vec{E} \cdot q$$

1.4 Entstehung von Gewittern

- Normales elektrisches Feld der Erde: ca. 100 N/C; Erde negativ geladen
- Wolkenhöhe 5 - 12 km
- Influenz von Tropfen, Hagelkörnern, Eiskristallen u.s.w. (negative Ladungen oben, positive Ladungen unten)
- Fallende schwere Tropen und Hagelkörner ziehen negative Ionen nach unten mit.
- Aufsteigende leichte Staubteilchen und Eiskristalle ziehen positive Ionen nach oben mit.
- $\Rightarrow$ Verstärkung des elektrischen Feldes
- Durchschlagfeldstärke: ca. 10 kN/C
- Blitz: $Q \approx 10\,\mathrm{C}$, $t \approx 0{,}1\,\mathrm{ms}$, $I \approx 100\,\mathrm{kA}$

1.5 Radialsymmetrische Felder

Die Feldstärke im radialsymmetrischen Feld nimmt mit dem Quadrat des Abstands ab.

$$E \sim \frac{1}{r^2} \qquad g \sim \frac{1}{r^2}$$

1.5.1 Gravitationsfeld einer Punktmasse

Gravitationsbeschleunigung einer Punktmasse M.

$$g = \gamma \frac{M}{r^2}$$

mit der **Gravitationskonstante** $\gamma = 6{,}674 \times 10^{-11}\,\frac{\mathrm{Nm}^2}{\mathrm{kg}^2}$

Gravitationskraft zwischen zwei Massen M und m.

$$F_g = \gamma \frac{M \cdot m}{r^2}$$

1.5.2 Elektrische Feld einer Punktladung

Die **Flächenladungsdichte** σ ist proportional zur Feldstärke E. Für die Flächenladungsdichte auf einer Kugel mit der Oberfläche A im Abstand r von der Punktladung Q gilt:

$$\sigma = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{4\pi r^2} = \epsilon_0 E$$

Elektrische Feldstärke einer Ladung Q.

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{r^2}$$

mit der **elektrischen Feldkonstante** $\epsilon_0 = 8{,}8542 \times 10^{-12}\,\frac{(\mathrm{As})^2}{\mathrm{Nm}^2}$

Coulombsches Gesetz: Die Coulombkraft zwischen zwei Massen M und m.

$$F_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Qq}{r^2}$$

1.6 Elektrische und Magnetische Feldlinien im Vergleich

	Magnetisches Feld	Elektrisches Feld
	Die MFL beschreiben den Weg einer Kompassnadel vom Nordpol- zum Südpol.	Die EFL beschreiben den Weg von einer positiven zu einer negativen Ladung, den man erhält, wenn man dem Richtungsvektor der Kraft auf einer positiven Probeladung folgt.
1.	MFL starten am Nordpol und enden am Südpol.	EFL starten an einer positiven Ladung und enden an einer negativen Ladung.
2.	MFL kreuzen sich nie.	EFL kreuzen sich nie.
3.	MFL wollen so kurz wie möglich sein.	EFL wollen so kurz wie möglich sein.
4.	MFL wollen den größtmöglichen Abstand zu benachbarten MFL haben.	EFL wollen den größtmöglichen Abstand zu benachbarten EFL haben.
5.	Die Dichte der MFL ist proportional zur Feldstärke.	Die Dichte der EFL ist proportional zur Feldstärke.
6.		EFL stehen auf Leiteroberflächen immer senkrecht.

1.7 Energie im elektrischen Feld

Bei einer Bewegung senkrecht zu den Feldlinien wird keine Energie aufgenommen oder abgegeben.

1.7.1 Homogenes Feld

Die elektrische Kraft auf eine Probeladung q ist im homogenen Feld E überall gleich. $F = q \cdot E$

Eine Probeladung q, die parallel zu den Feldlinien die Strecke s zurücklegt, nimmt eine Energie von $W = q \cdot E \cdot s$ auf.

Den Quotienten aus Energie W und Ladung q bezeichnet man als **Potential**. Üblicherweise wird festgelegt, dass die negative Platte das Potential null besitzt. Es gilt

$$\varphi = \frac{W}{q} \qquad [\varphi] = 1\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}} = 1\,V$$

Die **Potentialdifferenz** zwischen zwei Punkten P_1 und P_2 mit dem Abstand s bezeichnet man als **elektrische Spannung** U.

$$U = \frac{\Delta W}{q} = \Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = E \cdot s \qquad [U] = 1\,\mathrm{V} = 1\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}} = 1\,\frac{\mathrm{kg\,m^2}}{\mathrm{As^3}}$$

Die Energie, die ein Teilchen aufnimmt, wenn es eine Spannung U durchläuft:

$$W = q \cdot U$$

Spannung im Plattenkondensator mit dem Abstand d und der Feldstärke E:

$$U = E \cdot d$$

1.7.2 Radialsymmetrisches Feld

Energieaufnahme einer Probeladung q im Feld einer Punktladung Q, die den Abstand von r_1 auf r_2 verändert hat.

$$W = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0}\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right)$$

Potentielle Energie einer Probeladung q, die sich aus dem Unendlichen einer Ladung Q auf den Abstand r genähert hat.

$$W(r) = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r}$$

Potential im Abstand r einer Ladung Q, wenn das Potential im Unendlichen null beträgt.

$$\varphi(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r}$$

Im radialsymmetrischen Feld sind die Äquipotentialflächen Kugelflächen. Die Feldlinien stehen senkrecht auf den Flächen.

1.8 Kondensator

Die **Kapazität** eines Kondensators ist der Quotient aus der positiven Ladung Q und der an den Platten anliegenden Spannung U.

$$C = \frac{Q}{U} \qquad [C] = 1\,\mathrm{F} = 1\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{V}} = 1\,\frac{\mathrm{A^2 s^4}}{\mathrm{kg\,m^2}}$$

Für einen Plattenkondensator mit Platten der Fläche A und dem Plattenabstand d gilt:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

Für die elektrische Feldstärke in dem Plattenkondensator bei angelegter Spannung U gilt:

$$E = \frac{U}{d}$$

Für die in einem Kondensator mit der Kapazität C bei der angelegten Spannung U gespeicherten Energie gilt:

$$W = \frac{1}{2} C U^2$$

Die Energiedichte beträgt in diesem Falle:

$$\rho_e = \frac{W}{V} = \frac{W}{A \cdot d} = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2$$

1.8.1 Dielektrikum

Ein Dielektrikum vergrößert die Kapazität eines Kondensators

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

wobei die **relative Dielektrizitätszahl** ϵ_r eine Stoffkonstante ist.

Dementsprechend gilt dann: $$\rho_e = \frac{1}{2}\epsilon_r\epsilon_0 E^2$$

1.8.2 Lade- und Entladevorgang

Bei der Aufladung und Entladung eines Kondensators C über einen Stromkreis mit dem Widerstand R gilt für die Stromstärke: $$I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{1}{RC}t} \qquad \text{mit} \quad I_0 = \frac{U_0}{R}$$
Für die Spannung U_C über dem Kondensator gilt:

Ladevorgang $$U_C(t) = U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{RC}t}\right)$$ Entladevorgang $$U_C(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{1}{RC}t}$$

Der Entladestrom und die Entladespannung sind dem Ladestrom und der Ladespannung entgegengesetzt.

Für die Halbwertszeit gilt: $T_H = RC \ln 2$

2 Das magnetische Feld

2.1 Magnetfeld

Auf einen stromdurchflossen Leiter, der senkrecht zu den Feldlinien eine Magnetfelds steht, wirkt eine Kraft, dessen Richtung senkrecht zum Leiter und senkrecht zum Feld zeigt.

Drei-Finger-Regel: Daumen, Zeigefinger und Mittelfinger werden so gehalten, dass sie alle senkrecht zueinander stehen. Der Daumen zeigt dabei in Stromrichtung und der Zeigefinger in Feldrichtung. Aufgepasst: Wird die **physikalische** Stromrichtung (bzw. bewegte negative Ladungen) angewendet, wird die **linke** Hand benutzt. Wird dagegen die **konventionelle** Stromrichtung (bzw. bewegte positive Ladungen) angewendet, dann wird die **rechte** Hand benutzt.
Wirkt auf den Leiter der Länge l, der vom Strom I durchflossen wird, die Kraft F, dann hat das magnetische Feld die Feldstärke $$B = \frac{F}{Il}$$

Die Einheit der Feldstärke heißt *Tesla*. $$[B] = 1\,\mathrm{T} = 1\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A\,m}} = 1\,\frac{\mathrm{V\,s}}{\mathrm{m}^2}$$

2.2 Lorentz-Kraft

Auf bewegte Ladungen im magnetischen Feld wirkt die **Lorentz-Kraft** F_{L}.

- F_{L} ist senkrecht zur durch Bewegungsrichtung und Feldstärke aufgespannten Ebene.
- F_{L} ist am größten, wenn Feld und Bewegung senkrecht zueinander stehen.
- Drei-Finger-Regel gibt die Richtung an.

Auf einen Draht der Länge l, der vom Strom I durchflossen wird und senkrecht zum magnetischen Feld B steht, wirkt die Kraft $$F = l \cdot I \cdot B$$
Auf eine Ladung q, die sich mit der Geschwindigkeit v senkrecht zum magnetischen Feld B bewegt, wirkt die Lorentzkraft $$F_{\mathrm{L}} = q \cdot v \cdot B$$
Da F_{L} senkrecht zu v steht, ändert sich die Richtung, aber nicht der Betrag der Geschwindigkeit.

2.3 Hall-Effekt

Um die Stärke eines Magnetfeldes zu messen, wird ein dünner Halbleiterquader der Dicke d in Längsrichtung von einem Strom I durchflossen.

Wenn das Magnetfeld B jetzt senkrecht zur Stromrichtung und parallel zur dünnen Seiten den Quader durchdringt, dann wird senkrecht zur Stromrichtung und zur Magnetfeldrichtung die **Hall-Spannung** U_{H} gemessen. Es gilt

$$U_{\mathrm{H}} = R_{\mathrm{H}} \frac{I\,B}{d}$$

R_{H} ist die materialabhänge Hall-Konstante. Sie läßt sich aus der Ladungsträgerdichte $N_{\mathrm{V}} = N/V$ berechnen, wobei N die Anzahl der beweglichen Ladungen und V das Volumen ist. Es gilt

$$R_{\mathrm{H}} = \frac{1}{N_{\mathrm{V}}\,e}$$

2.4 Elektronenwaage

Wird ein durch eine Spannung U_{B} beschleunigtes Elektron senkrecht in ein homogenes Magnetfelder der Stärke B geschossen, so beschreibt es eine Kreisbahn mit dem Radius r. Für die spezifische Ladung aus Masse m_{e} und Elementarladung e gilt:

$$\frac{e}{m_{\mathrm{e}}} = \frac{2U_{\mathrm{B}}}{B^2 r^2} = 1{,}76 \times 10^{11}\,\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{kg}}$$

Die durch den Milikan-Versuch bestimmte Elementarladung e beträgt $1{,}602 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$. Damit beträgt die Masse eines Elektrons $m_{\mathrm{e}} = 9{,}11 \times 10^{-31}\,\mathrm{kg}$.

2.5 Magnetfeld eines geraden Leiters

Fließt durch einen geraden Leiter ein elektrischer Strom I, so entsteht um den Leiter ein Magnetfeld B, dessen Feldlinien in konzentrischen Kreisen um den Leiter angeordnet sind. Für die Richtung des Feldes gilt die **Rechte-Hand-Regel**: Zeigt der aufgerichtete Daumen in die konventionelle Stromrichtung, dann zeigen die gekrümmten Finger die Richtung des Magnetfeldes an.

Für die Stärke des Magnetfeldes B im Abstand r gilt:

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

mit der **magnetischen Feldkonstante**

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}} = 1{,}26 \times 10^{-7}\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}}$$

2.6 Magnetfeld einer langen Spule

Als lange Spule wird eine Spule bezeichnet, der Länge l deutlich größer ist als der Durchmesser d.

Das Magnetfeld B im Inneren einer langen Spule mit der Windungszahl n ist homogen. Für seine Stärke gilt:

$$B = \mu_0\, I\, \frac{n}{l}$$

2.7 Induktion

Ändert sich das Magnetfeld in einer Spule, so wird eine **Induktionsspannung** U_{ind} induziert, die in einem geschlossenen Stromkreis zu einem **Induktionsstrom I_{ind}** führt.

Durch Induktion kann mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt werden.

2.7.1 Lenzsche Regel

Der Induktionsstrom ist immer so ausgerichtet, dass er seiner Ursache entgegenwirkt.

2.8 Induktionsspannung

Die Induktionsspannung U_{ind} ist proportional zur zeitlichen Änderung der Stärke des verursachenden Magnetfelds B.

$$U_{\mathrm{ind}} \sim \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

Ändert sich zeitlich das Magnetfeld B, das senkrecht zur Querschnittsfläche A einer Spule mit n Windungen steht, dann wird eine Spannung U_{ind} induziert.

$$U_{\mathrm{ind}} = -n\,A\frac{\Delta B}{\Delta t}$$

Ändert sich zeitlich die Querschnittsfläche A einer Spule mit n Windungen, die senkrecht zu den Feldlinien eines Magnetfelds B steht, dann wird eine Spannung U_{ind} induziert.

$$U_{\mathrm{ind}} = -n\,B\frac{\Delta A}{\Delta t}$$

2.9 Magnetischer Fluss

Der **magnetische Fluss** Φ ist das Produkt aus der zum Magnetfeld B senkrecht durchtretenen Fläche A und dem Magnetfeld B:

$$\Phi = B\,A$$

Die Einheit des magnetischen Fluss ist das Weber: $[\Phi] = 1\,\mathrm{V\,s} = 1\,\mathrm{Wb}$

2.10 Faradaysches Induktionsgesetz

Ändert sich der magnetische Fluss Φ in einer Spule mit n Windungen zeitlich, so tritt eine Induktionsspannung U_{ind} auf:

$$U_{\mathrm{ind}} = -n\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -n\dot{\Phi}$$

2.11 Selbstinduktion

Ändert sich der Strom in einer Spule, so ändert sich der magnetische Fluss dieser Spule. Diese Änderung führt wiederum zu einer Induktion einer Spannung. Nach der Lenzschen Regel ist diese Spannung der Stromänderung entgegengesetzt. Diesen Vorgang bezeichnet man als **Selbstinduktion**.

2.12 Schwingkreis

Werden eine Induktivität L und eine Kapazität C zu einem Ring zusammengeschlossen, so bilden diese einen Schwingkreis. Für die Frequenz f eines solchen Schwingkreises gilt:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$