Protokoll der Physikdoppelstunde am 05.11.2001

Protokollant: Alexander Rudyk

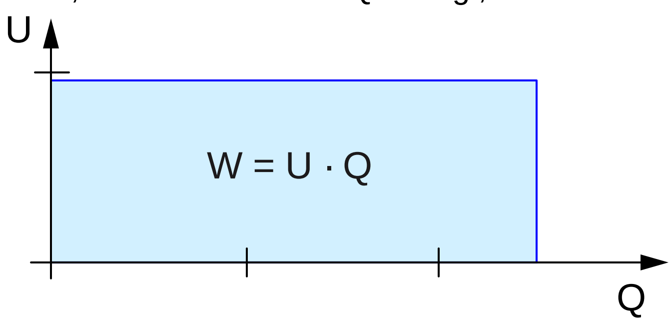
Zu Beginn der ersten Stunde haben wir ausführlich die zu erledigenden Aufgaben im Buch besprochen. Anschließend haben wir den Versuch, der bereits am Ende der vorhergehenden Stunde gezeigt wurde, noch einmal wiederholt: Ein Blockkondensator wurde mit etwa 300V aufgeladen, anschließend mit einem Schalter verbunden und durch Umlegen desselben dann entladen. Dabei bildete sich ein deutlich erkennbarer Blitz an der Kontaktstelle.

Dieser Versuch zeigte erneut, das ein Kondensator auch Energie speichern kann. Die Berechnung an der Tafel ergab, dass die gespeicherte Energie bei einem Kondensator mit 10 µF und einer Spannung von 300 V nur etwa $W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = 0{,}45\,J$ beträgt. Diese wird jedoch in einer sehr kurzen Zeitspanne frei, so dass die gebrachte Leistung trotzdem beträchtlich ist. Wird die Energie von 0,45 J etwa in 1 ms frei, entspricht dies einer Leistung von immerhin 450 W.

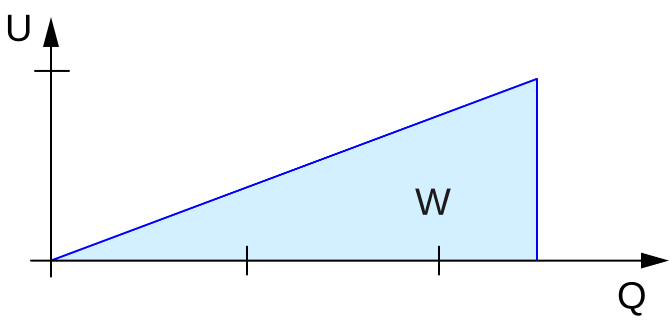
Anschließend haben wir uns mit der Herleitung der oben bereits angewendeten Gleichung $W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$ beschäftigt. Zuerst haben wir die im Physik-Buch beschriebene Herleitung wiederholt: Bei konstanter Spannung gilt für die Energie:

$$U = \frac{W}{Q} \quad \Rightarrow \quad W = U \cdot Q$$

Stellt man dies graphisch dar, indem man U über Q abträgt, erhält man folgenden Graphen:



Die Energie entspricht hierbei gerade der Fläche des Quadrats mit den Seitenflächen U und Q. Anschließend werden diese Zusammenhänge auf den Kondensator übertragen: Hier ist U nicht konstant, die Zuordnung Q } U ist jedoch linear, da $Q = C \cdot U$ gilt. Daher ergibt sich folgender Graph:



Die Fläche unterhalb des Graphen, die die Energie angibt, entspricht aber gerade einer Dreiecksfläche, und für diese gilt unter Berücksichtigung der entsprechenden Variablen des Graphen $W = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot U$. Weiterhin gilt $Q = C \cdot U$, setze ich dies in unsere Gleichung ein, erhalte ich die gesuchte Formel:

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

Alternativ kann man diese Formel auch über die Integration uns bereits bekannter Gleichungen herleiten. Diesen Weg haben wir anschließend gewählt:

Allgemein gilt für die elektrische Arbeit zu einem bestimmten Zeitpunkt:

$$W = U(t) \cdot I(t) \cdot t$$

Um die Arbeit des Kondensators beim Aufladevorgang zu bestimmen, integrieren wir W für 0 bis unendlich (mathematisch gesehen der Zeitpunkt, an dem der Kondensator komplett aufgeladen ist) und formen entsprechend um:

$$W = \int_0^{\infty} U(t) \cdot I(t)\, dt$$

$$W = \int_0^{\infty} U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t}\right) \cdot I_0 \cdot e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t}\, dt$$

$$W = U_0 \cdot I_0 \cdot \int_0^{\infty} \left(e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t} - e^{-2 \cdot \frac{1}{R \cdot C} \cdot t}\right) dt$$

Wir bilden die Stammfunktion:

$$W = U_0 \cdot I_0 \cdot \left[-R \cdot C \cdot e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t} + \frac{1}{2} \cdot R \cdot C \cdot e^{-2 \cdot \frac{1}{R \cdot C} \cdot t} \right]_0^{\infty}$$

Setzen wir für t unendlich ein, geht der Term der e-Funktion und damit der gesamte Ausdruck gegen 0. Er fällt daher weg. Geht t gegen 0, geht der Exponent der e-Funktion dagegen gegen 0, das bedeutet, der gesamte Term der e-Funktion geht gegen 1. Daraus ergibt sich folgende Gleichung:

$$W = U_0 \cdot I_0 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot R \cdot C - R \cdot C \right)$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot U_0 \cdot I_0 \cdot R \cdot C$$

Hier setzen wir jetzt $U = R \cdot I$ ein. (Diese Formel kann für U_0 und I_0 angewendet werden, da es sich bei I_0 um den durch U_0 und R begrenzten Anfangsstromfluss handelt.)

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_0^2$$

Weiterhin haben wir uns mit der Energie, die ein elektrisches Feld bietet, beschäftigt. Wir stellten fest, dass die Energie nicht in den Ladungsträgern gespeichert ist, sondern dass die Energie im gesamten Feldvolumen zur Verfügung steht. Dies zeigt sich dadurch, dass beim Auseinanderziehen zweier isolierter Kondensatorplatten die verfügbare Energie ansteigt (weil Arbeit am Feld verrichtet wurde), ohne dass sich die Menge der Ladungsträger verändern würde. Im Buch wurde dies durch das Beispiel von Radiogeräten, die ohne Stromquelle ihre Energie aus dem Feld der Radiowellen beziehen, illustriert. Wir ergänzten dies um die Berichterstattung von Schrebergärten in der Nähe des Frankfurter Sendeturms, die die von diesem Turm abgestrahlte Feldenergie nutzten, um ihre Beleuchtung mit Strom zu versorgen. Dies ist verboten, aber bei ausreichender Feldenergie problemlos möglicht und zeigt erneut, dass die Energie im Feld vorliegt. Zur Beschreibung dieses Zusammenhangs haben wir anschließend analog zum Buch die Formel zur Bestimmung der Energie eines Feldes hergeleitet:

Wir nutzen die Formel $W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_0^2$ und setzen in diese folgende Formeln ein:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{D}$$

$$E = \frac{U}{d} \quad \Rightarrow \quad U = E \cdot d$$

Daraus folgt folgende Formel:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E^2 \cdot V$$

Daraus lässt sich auch eine Energiedichte berechnen, die eine Aussage über die Energie pro Volumen trifft:

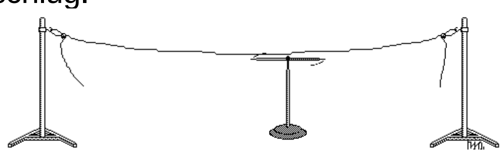
$$\rho_{el} = \frac{W}{V} = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E^2$$

Anschließend haben wir das Thema des elektrischen Feldes soweit abgeschlossen und begannen damit, uns mit dem **magnetischen Feld** zu beschäftigen.

Dazu haben wir anhand verschiedener Versuche die bereits in der Mittelstufe behandelten Grundlagen wiederholt:

Versuch 1: Kompassnadel (Oersted-Versuch)

Dieser Versuch ist nach Hans Christian Oersted benannt, einem in Kopenhagen tätigen Wissenschaftler, der 1819 durch Zufall die magnetische Wirkung eines stromdurchflossenen Drahtes entdeckte: Er experimentierte mit Elektrizität und stellte fest, dass eine in der Nähe stehende Kompassnadel ausschlug.

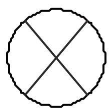


Durchführung: Die Kompassnadel wird unter den Draht gestellt, der mit einer Stromquelle verbunden ist und durch den wir Strom leiten. Anschließend befestigen wir die Kompassnadel über anstatt unter dem Draht.

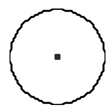
Beobachtung: Sobald Strom durch den Draht fließt, schlägt die Kompassnadel aus. Positionieren wir die Kompassnadel über dem Draht, schlägt diese in die umgekehrte Richtung aus.

Auswertung: Wird ein Draht von Strom durchflossen, bildet sich um diesen Draht ein Magnetfeld. Dieses Magnetfeld ist kreisförmig, es besteht aus konzentrischen Kreisen um den Draht. Diese Ergebnisse werden von der „Rechte Faust-Regel“ abgedeckt: Drehe ich meinen Daumen in Richtung der konservativen Stromrichtung zeigen mir meine Finger, in welche Richtung die konzentrischen Feldlinien verlaufen. Die Richtung der Feldlinien wird dabei bestimmt von der Richtung, in der sich eine Kompassnadel in diesem Feld ausrichten würde.

Symbole für die Angabe der Stromrichtung bei einem Drahtquerschnitt:

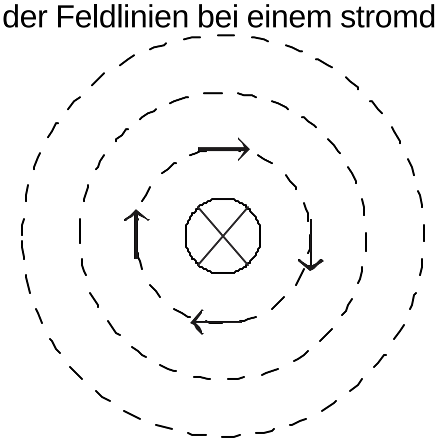


Strom fließt
nach hinten

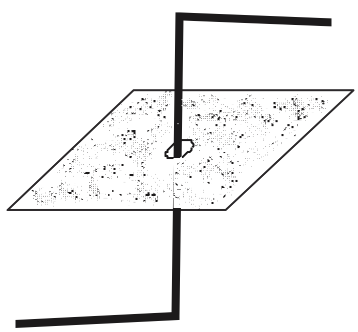


Strom fließt
nach vorne

Hier ein Beispiel für den Verlauf der Feldlinien bei einem stromdurchflossenen Draht:



Versuch 2: Eisenspäne und das magnetische Feld

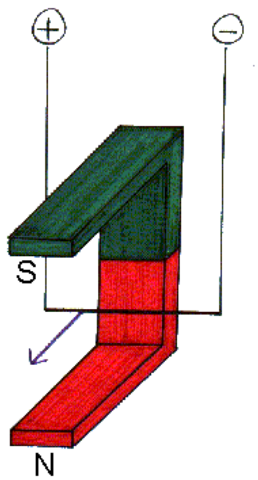


Durchführung: Eine Glasplatte mit einem Loch in der Mitte, durch welches ein Kabel führt, wird mit Eisenspänen bestreut. Anschließend lässt man Strom (mit etwa 10 A) durch den Draht fließen und lockert die Eisenspäne ein wenig.

Beobachtung: Angedeutet lässt sich erkennen, dass sich die Eisenspäne in konzentrischen Kreisen um den Draht ausrichten. Man erkennt hier den ungefähren Verlauf der magnetischen Feldlinien, die durch den Stromfluss hervorgerufen werden.

Versuch 3: Leiterschaukelversuch

Durchführung: Die Leiterschaukel wird von den verschiedenen Seiten mit einem Hufeisenmagneten umgeben und die Spannungsquelle, mit der die Leiterschaukel verbunden ist, wird aktiviert.



Beobachtung: Wird die Leiterschaukel im horizontal liegenden Hufeisenmagnet platziert, schlägt sie entweder nach außen oder nach innen aus, abhängig von der Orientierung des Magneten. Stellen wir den Hufeisenmagneten senkrecht über die Leiterschaukel, wackelt diese bei Aktivierung des Stroms nur geringfügig durch Unsymmetrien, allerdings beugen sich ihre Verbindungsdrähte leicht aus.

Auswertung: Bei der Analyse dieses Phänomens helfen uns die Eigenschaften der Feldlinien: Durch ihre Feldkräfte streben Feldlinien danach, sich in Längsrichtung zu verkürzen und sich in Querrichtung abzustoßen. Betrachten wir uns also das magnetische Feld im Inneren des Hufeisenmagneten:

Hier wollen sich die durch das Magnetfeld der Leiterschaukel ausgebeulten Feldlinien verkürzen und drängen die Leiterschaufel nach außen. Diese Zusammenhänge fasst man in der Drei-Finger-Regel zusammen, auch UVW-Regel genannt (für Ursache, Vermittlung und Wirkung): Ausgehend von der rechten Hand müsste für unseren Fall der Daumen in Richtung der konservativen Stromrichtung des Stromflusses durch den Leiter zeigen, der Zeiger müsste vom Nord- zum Südpol des Magneten (in Richtung der Feldlinien) zeigen und der Mittelfinger würde uns letztlich angeben, wohin die Schaukel bewegt wird.

Zu Hause sollten wir diese Zusammenhänge anhand des Buches (S. 54 ff) wiederholen.

<u>Bildquellen:</u>
Oersted-Versuch: http://zebu.uoregon.edu/1999/ph161/l3.html
Leiterschaukel: http://www.gym-don.de/aktuell/physik/seite1.htm