

EI PH3 2011-12	PHYSIK Zusammenfassung E-Lehre	Zusammenfassung
-----------------------	---	------------------------

Hier gibt es eine (nicht vollständige, sicher nicht überall richtige) Zusammenfassung der Elektrizitätslehre. Die für euch „älteren“ Teile, die nicht mehr direkt in der Klausur abgefragt werden, habe ich in einer kleineren Schriftgröße vorangestellt. Ihr solltet sie aber in etwa wissen!

Ladungen

Es gibt zwei Ladungssorten; positive und negative Ladungen. Dabei stoßen sich gleichnamige Ladungen ab und ungleichnamige Ladungen ziehen sich an (*elektrische Kraft*, siehe unten). Im **Milikan-Versuch** (http://www.leifiphysik.de/web_ph12/versuche/01millikan/millikan.htm) kann nachgewiesen werden, dass es eine kleinste Ladung im Atom gibt; die sogenannte **Elementarladung e**. Sie beträgt etwa $1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Coulomb ist die Einheit der Ladung und wird mit C abgekürzt. Wie wir heute wissen, ist e gar nicht elementar. Es gibt Bausteine der Kernteilchen (Protonen und Neutronen), die **Quarks**, und sie tragen $1/3$ bzw. $2/3$ von e. Elektronen tragen $-e$, Protonen tragen $+e$.

Ladung wird weder erzeugt, noch vernichtet

Ladung scheint (wie Energie) weder erzeugt, noch vernichtet werden zu können. Daher spricht man auch von der Ladungserhaltung. Man vermutet, dass die Gesamtladung im Universum Null ist.

Die Elektrische Kraft ist viel stärker als die Gravitationskraft

Die elektrische Kraft (auch **Coulomb-Kraft** genannt) ist viel stärker als die uns bereits bekannte Gravitationskraft und kann anders als diese auch abstoßend wirken. Vergleicht man die anziehende Gravitationskraft mit der abstoßenden elektrischen Kraft bei Protonen, dann ist die **elektrische Kraft etwa 10^{36} -mal stärker als die Gravitationskraft**. Das ist unvorstellbar viel mehr. *Wieso können Atomkerne stabil sein?! Es muss eine noch stärkere Kraft geben und das ist die Kernkraft. Sie beschäftigt uns in der kommenden Einheit.*

Strom ist fließende Ladung

Bewegt sich Ladung, dann spricht man von einem Ladungsstrom oder von einem (elektrischen) Strom. Fließt viel Ladung in kurzer Zeit, dann entspricht das einem hohen Strom. Man definiert also $I = Q/t$ (I für die Stromstärke, Q für Ladung und t für Zeit). Die Einheit der **Stromstärke** ist **Ampere** oder kurz A.

Strom ist nicht das gleiche wie Stromstärke

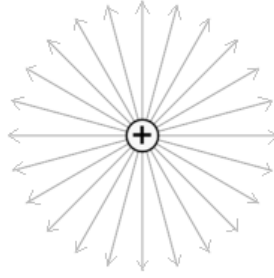
Man muss aufpassen: die Stromstärke ist eine Eigenschaft des elektrischen Stroms. Dieser hat aber auch eine Richtung usw. Daher sind sie nicht dasselbe. Die Stromstärke ist aber meist die uns interessierende und daher beschreibende Größe eines Ladungstransportes, nichts anderes ist ja der elektrische Strom.

Strom in elektrischen Leitern – Influenz

In Metallen fließt elektrischer Strom sehr gut. Daher sind unsere Kabel im Alltag aus Kupfer, welches besonders **leitfähig** ist. Das liegt daran, dass in Metallen die Idee von einem Gerüst aus Atomen, die wiederum aus einem Kern und umkreisenden Elektronen bestehen, nur bedingt richtig ist: Einige der Elektronen je Atom sind frei beweglich (**delokalisiert**) und können so zur Ladungsverschiebung beitragen. Der Einfachheit halber kannst du elektrische Leiter mit Metallen gleichsetzen. Nichtmetalle sind fast immer Isolatoren und deren Leitfähigkeit ist viel schlechter (siehe unten).

Elektrische Felder durchdringen alles

Elektrische Ladungen sind von elektrischen Feldern umgeben. Das elektrische Feld ist eine theoretische Idee, die eine „was wäre, wenn“-Frage beantwortet: Was wäre, wenn sich unserer ortsfesten Ladung (bspw. ein Atomkern) ein Proton nähert. Die **Feldlinien** geben hier an, wie sich dieses Proton verhalten würde. Sie sind in der folgenden Abbildung als Pfeile mit Richtung (wegen der **positiven Probeladung!**) eingezeichnet:



Dabei ist diese eingezeichnete Pfeilrichtung völlig willkürlich. **Man zeichnet nach einer Konvention die Pfeile immer so, wie sich eine positive Ladung in diesem Feld bewegen würde.** In unserem Fall würde ein anderes Proton ja abgestoßen, daher die Pfeile nach außen. Elektrische Felder können sich überlagern („**Superpositionsprinzip**“). Das meint eigentlich nur folgendes: wenn man bspw. eine weitere Ladung, sagen wir eine negative, irgendwo im Raum platziert, dann erfährt unsere positive Probeladung sowohl eine (abstoßende) Kraft von der alten Ladung, als auch eine anziehende Kraft durch das neu platzierte negative Teilchen. Insgesamt „spürt“ es mehr als vorher!

Die elektrische Feldstärke gibt an, wie stark ein elektrisches Feld ist

Genauso wie beim elektrischen Strom möchte man auch für das elektrische Feld eine Stärke angeben können. Man definiert daher die elektrische Feldstärke als „Kraft pro Ladung“, sprich, wie stark ist die Kraft, die mein Feld auf eine positive Probeladung ausüben kann? Daher liegt die Formel **$E=F/q$** nahe (E = Feldstärke, F = wirkende (Coulomb-)Kraft auf die Ladung q). Kennt man die Feldstärke und die Ladung, kann man die wirkende Kraft $F=Eq$ berechnen. Um eine der beiden Formeln merken zu können (die ja durch Umformen ineinander übergehen), merke sie dir mit $q=e$ (also ist die Ladung im Feld gerade eine Elementarladung), denn dann ist sie $F=Eq$ oder kurz „**Fee**“:



Eine eigene Einheit der Feldstärke gibt es nicht. Wegen F/q ist sie Newton/Coulomb bzw. kurz N/C.

Spannung

Ladungen werden zwar nicht erzeugt oder vernichtet, sie lassen sich aber gegen die dann anziehend wirkende Coulombkraft trennen. **Werden Ladungen voneinander getrennt, entsteht eine Spannung.** Das ist eigentlich nichts anderes wie beim Gravitationsfeld der Erde: Auch hier kann man Massen „trennen“: Du hebst einen auf dem Boden liegenden Stein gegen seine Gewichtskraft hoch. Lässt du ihn los, bewegt er sich wieder Richtung Boden zurück. Genauso verhalten sich Ladungen; verbindest du getrennte Ladungen mit einem Leiter können sie sich „ausgleichen“. Spannung beschreibt also die Fähigkeit, sich in Bewegung zu setzen. Daher definiert man **Spannung als Arbeit pro Ladung**. Sie beschreibt also, wieviel Arbeit eine Ladung verrichten kann. Das ist analog zu unserem Stein; er kann ja auch Arbeit verrichten, weil er beim Herunterfallen bspw. einen anderen Gegenstand hochheben könnte. In eine Formel gepresst ist das dann $U=W/q$ (mit U =Spannung, W =Arbeit bzw. Energie und q =Ladung). Die Einheit der Spannung ist also Joule/Coulomb und weil sie so wichtig ist, gibt es dafür einen eigenen Namen: **Volt** oder kurz V.

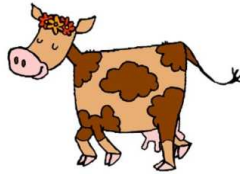
In Kondensatoren lassen sich Ladungen trennen und damit Energie speichern

Orte, wo Ladungen „getrennt gespeichert“ werden können, nennt man Kondensatoren. Sie speichern damit auch Energie; eine Analogie ist diese: Die Lageenergie eines hochgehobenen Steines wird durchs Festhalten „gespeichert“. Kondensatoren speichern elektrische Energie und zwar nach der Formel **$W=0,5 \cdot Q \cdot U$** bzw. oft praktischer für Berechnungen nach dieser Formel: **$W=0,5 \cdot C \cdot U^2$** , wobei C die Kapazität (s.u.) ist und U die angelegte Spannung.

Kapazität

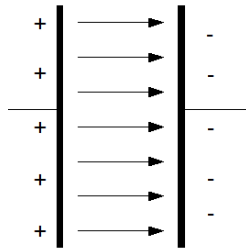
Die Kapazität eines Kondensators ist die Fähigkeit, getrennte Ladungen zu speichern. Die Einheit ist das Farad, kurz F. Die Kapazität hängt von vielen Größen ab. Wird sie überschritten, kommt es zu unkontrollierten Überschlüssen („Blitze“). Unsere Hand kann ja auch keinen beliebig schweren Stein halten. In einer Formel lässt sich die Kapazität als Faktor zwischen Spannung und Ladung beschreiben: **$Q=C \cdot U$** (Q =Menge der getrennten Ladung, C =Kapazität und U =Spannung). Denn man erwartet im einfachsten Fall bei doppelter Ladungsmenge eine

doppelte Spannung. Also ist die Kapazität $C=Q/U$. Die erste Formel kann man sich besser merken, denn da steht „Kuh=Kuh“:



Der Plattenkondensator als Spezialfall eines Kondensators

Besonders einfach sind die neu eingeführten Begriffe an einem Plattenkondensator zu verstehen. Ein Plattenkondensator besteht aus zwei gleichgroßen Platten mit einer Plattenfläche A auf jeder Seite, die mit einem festen Abstand d voneinander getrennt sind.



Nehmen wir einmal an, wir haben auf unserem Plattenkondensator Ladungen gespeichert. Was passiert jetzt? Zuerst einmal hat sich ein elektrisches Feld gebildet, denn auf beiden Seiten sind elektrische Ladungen. Die Feldlinien sollten direkt von einer zur anderen Platte gehen (rechtwinklig zur Platte und parallel zueinander; siehe Zeichnung). Man spricht bei einem so regelmäßigen Feld von einem **homogenen Feld**. An den Plattenrändern kommt es allerdings zu Verzerrungen.

Im Plattenkondensator ist die Feldstärke sehr einfach bestimmt

Die Feldstärke im Inneren eines Plattenkondensators hängt nur von der aufgetragenen Ladung Q und der Plattenfläche A ab. Eigentlich von der „Ladungsdichte“ Ladung pro Flächeneinheit, denn A hast du mehr Fläche, kann sich eine gleiche Ladung Q besser „verteilen“. Der einfachste Zusammenhang wäre $E=c \cdot Q/A$ mit einer Konstanten c , die historisch $1/\epsilon_0$ ist mit ϵ_0 als **elektrische Feldkonstante**.

Im Plattenkondensator ist auch die Kapazität sehr einfach bestimmt

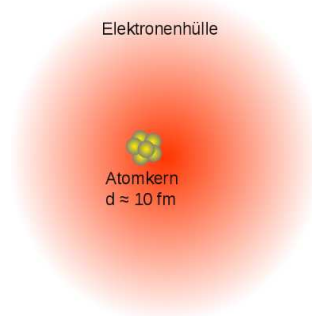
Die Kapazität des Plattenkondensators hängt wieder nur von zwei einfachen Größen ab. Von der Plattenfläche A und vom Abstand der Platten d . Man findet auch hier einen sehr einfachen Zusammenhang: $C=\epsilon_0 \cdot A/d$. Wieder taucht die elektrische Feldkonstante auf.

Die Spannung eines Plattenkondensators

Außerdem ist eine Spannung entstanden. Stell dir ein frei bewegliches Proton in der Nähe der positiv geladenen Platte vor; es würde stark abgestoßen und gleichzeitig stark von der negativ geladenen Platte angezogen. Es „fällt“ also auf die negativ geladene Platte (wie unser Stein, den wir im Anziehungsfeld der Erde fallen lassen). Dabei wird das Proton durch die elektrische Kraft beschleunigt. Der Zusammenhang zwischen Spannung und elektrischem Feld ist im Plattenkondensator sehr einfach: $U=E \cdot d$. Sprich, doppeltes Feld, doppelte Spannung oder halber Abstand, halbe Spannung. Hier taucht nicht einmal mehr eine Konstante auf.

Nicht-Leiter (Isolatoren) und Polarisation

In Nicht-Metallen stimmt die Idee vom Atomgerüst mit fest zugehörigen Elektronen ganz gut. Daher ist dort keine Influenz (s.o.) möglich und die Leitung von elektrischem Strom ist entsprechend schlecht. Es gibt allerdings „Influenz im Kleinen“: Befindet sich ein Isolator in einem elektrischen Feld (wie unsere Grieskörner), so werden die Elektronen eines Atoms leicht verschoben:



Auch hier bildet sich ein kleines elektrisches Feld aus, das dem eigentlichen Feld genau entgegengesetzt wirkt und dieses abschwächt.

Mit Isolatoren lässt sich die Kapazität eines Kondensators erhöhen

Befindet sich zwischen den Platten eines Plattenkondensators ein Isolator, so erhöht sich die Kapazität mit einem Faktor zu $C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A/d$. Ein Beispiel: Für Glas gilt $\epsilon_r = 9$.

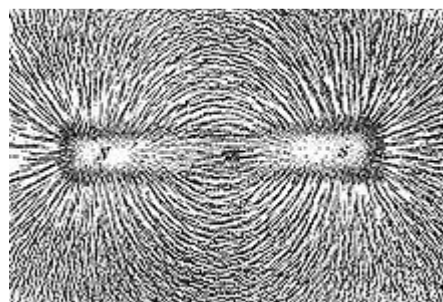
Neben Massen und Ladungen hat man schon sehr früh magnetische Pole entdeckt. Deren Entdeckung und das **Magnetfeld der Erde** ermöglichten die antike Seefahrt (**Kompass**). In der modernen Physik hat sich herausgestellt, dass sie Aspekte von Ladungen bzw. elektrischen Feldern sind. Das haben wir am daher so wichtigen **Oersted-Versuch** (http://www.leifiphysik.de/web_ph10/geschichte/08oersted/oersted.htm) gesehen! Wegen der hilfreichen Anschauung für statische Effekte wird das Modell der magnetischen Ladung in der Schule weiterhin verwendet.

Magnetpole, magnetische Kraft und magnetische Felder

Es gibt ähnlich wie bei den Ladungen zwei verschiedene magnetische **Pole**, Nord- bzw. Südpol. Gleichnamige Pole ziehen sich an, ungleichnamige stoßen sich ab; wir kennen das bereits. Es wirkt wie bei Ladungen die Coulombkraft eine magnetische Kraft. Trotzdem gibt es mehrere Unterschiede der Modelle:

- **Es gibt keine Monopole!** Anders als bei den Ladungen gibt es KEINE einzelnen Pole, sie treten immer paarweise auf. Das liegt daran, dass bei Permanentmagneten Spins diese Pole erzeugen und bei sich bewegenden Ladungen Magnetfelder erzeugt werden.
- **Magnetische Feldlinien enden nicht in den Polen, sie sind immer geschlossen.**

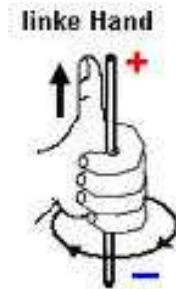
Das Sichtbarmachen eines Magnetfeldes ist viel einfacher als bei elektrischen Feldern, daher wird dieses schon in den unteren Klassen gezeigt. Man nimmt einfach Eisenspäne, die sich besonders gut magnetisieren lassen:



Hier sieht man, dass die magnetischen Feldlinien den elektrischen Feldlinien sehr ähneln. Auch hier wird eine Richtung definiert (von Nord nach Süd wie bei Ladungen von Plus zu Minus) und die Feldlinienrichtung gibt an, wie sich ein kleiner Kompass mit seiner Nordspitze ausrichten würde.

Für die in der Schule untersuchten magnetischen Effekte hilft das **Elementarmagnete-Modell** weiter. Dabei stellt man sich Materie aus lauter kleinen Kompassen aufgebaut vor, die sich in einem Magnetfeld ausrichten. Dadurch lassen sich Dauermagneten erklären und auch, wieso **hohe Temperaturen** diese zerstören (weil sich ja alle Teilchen in einem Körper bei höherer Temperatur schneller wild bewegen und Ordnung verloren geht), genauso wie **feste Schläge** (Zerstörung der Ordnung durch Erschütterung).

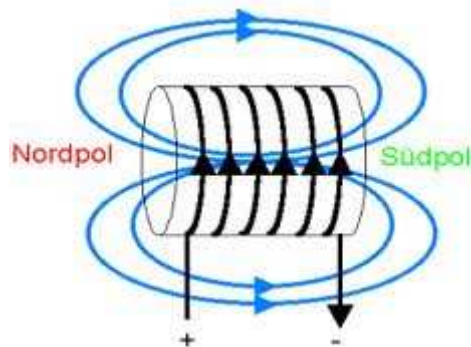
Einige Effekte lassen sich aber nicht damit erklären. Der Oersted-Versuch (s.o.) zeigt, dass um einen stromdurchflossenen Leiter ein Magnetfeld herrscht. Dabei gilt die **Linke-Faustregel**:



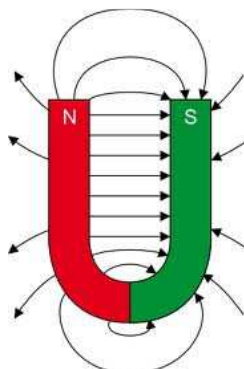
Das entstehende Magnetfeld baut sich so auf, wie die gekrümmten Finger der linken Hand angeben, wenn der Daumen in Richtung des Elektronenflusses zeigt.

Eine Spule erzeugt ein größeres Magnetfeld

Wenn man stromdurchflossenen Draht aufwickelt (wie bspw. im Alltag eine Kabeltrommel), dann addieren sich diese kleinen Ringfelder zu einem größeren magnetischen Feld:



Das sollte man sich einmal klar machen, indem man sich die linke Hand verrenkt. Man nennt diese Aufwicklung eine **Spule** und diese ist ein wichtiges technisches Bauteil, ähnlich dem Kondensator. Außerdem zu bemerken ist hier, dass die Spule im inneren ein **homogenes Feld** besitzt. Das bedeutet, dass dort fast parallele Feldlinien wie im Inneren eines Hufeisenmagneten vorliegen. Hier zum Vergleich:



Das Feld sieht praktisch gleich aus und damit ist klar, dass eine Spule einen Magneten „ersetzen“ kann. Das ist dann ein sogenannter **Elektromagnet**.

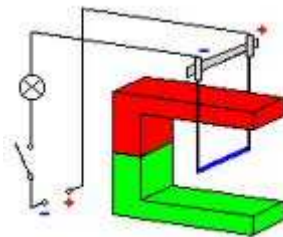
Spulen speichern magnetische Energie

Wie beim Kondensator Energie im elektrischen Feld gespeichert ist (mit $W=0,5CU^2$, siehe oben), ist auch in Magnetfeldern Energie gespeichert. In Spulen über die Formel **$W=0,5LI^2$** , wobei I die Stromstärke ist (ohne Strom verliert die Spule ihr Magnetfeld) und L die **Induktivität** der Spule, was der Kapazität der Kondensators entspricht. Verschiedene Spulen bauen eben verschieden „gut“ Magnetfelder auf, wie auch verschiedene Kondensatoren verschieden „gut“ getrennte Ladungen speichern können.

Wie das Elektrische Feld kann man auch das Magnetische Feld der Stärke nach beschreiben; anders als die elektrische Feldstärke E (s.o.) wird hier die **magnetische Flussdichte B** verwendet. Ihre Einheit ist das **Tesla**. Sie wird über **$B=F/(Is)$** definiert: Die magnetische Flussdichte wird über die Kraftwirkung F auf einen stromdurchflossenen Leiter der Länge s bei Stromstärke I beschrieben. Für Rechenzwecke merkt man sich **$F=IBs$** über den Hund „FIBs“!



Wir haben diese Kraftwirkung an der „**Leiterschaukel**“ gesehen und haben die Kraft „**Lorentzkraft**“ genannt:



Dabei war zu sehen, dass die Richtung der Kraft über die (linke) Dreifingerregel bestimmbar ist:



In der Schaukel oben ist die Magnetfeldrichtung (von N-S) von oben nach unten, daher zeigen wir mit dem Zeigefinger nach unten. Die Elektronen fließen von „vorne nach hinten“ und unser Mittelfinger zeigt jetzt in Richtung der offenen Seite beim Hufeisenmagneten (siehe obige Abbildung). Dahin wirkt die Kraft und im Versuch wurde der Leiter wie von Geisterhand nach außen gedrückt. Umpolen bewirkt, dass er in den Magneten hineingezogen wird.

Wer das noch einmal genauer lesen möchte, der kommt ggf. mit http://www.schule-bw.de/unterricht/faecher/physik/online_material/e_lehre_1/induktion/rollstab.htm zurecht.

(Zusatz: Mit der Leiterschaukel kann man die Formel $B=F/(Is)$ motivieren.)

Wie stark ist nun aber die Lorentzkraft F_L ?

Die Kraft, die auf einen stromdurchflossenen Leiter wie unsere Leiterschaukel in einem homogenen Magnetfeld wirkt, gehorcht der Formel $F_L=qv_sB$. Dabei bezeichnet v_s die Geschwindigkeit der Ladungen q im Leiter (so schnell sind die in der Realität übrigens nicht und es ist noch $q=e$ in Leitern).

Während Ladungen, die sich bewegen (=Strom) mit einem Strommessgerät bzw. Spannungen mit einem Spannungsmessgerät (gelbes Kombigerät, das im Praktikum verwendet wird) relativ leicht zu messen sind, ist das bei Magnetfeldern schwieriger. Dazu kann man eine **Hall-Sonde** verwenden. Ihr Prinzip ist hier erläutert (=Zusatz):

http://www.leifiphysik.de/web_ph12/zusatzaufgaben/02magfeld/halleff97/halleffekt97.htm,

wobei die Lösung unten links weiterhilft.

Mit der Hall-Sonde haben wir dann noch einige Spulen ausgemessen und festgestellt, dass die von ihnen erzeugte magnetische Flussdichte B über diese **Formel für Spulen** bestimmt ist:

$$B=\mu_0 \cdot I \cdot n/l$$

Dabei ist I wieder die Stromstärke (mehr Strom, mehr Magnetfeld, klingt logisch) und n/l die „Wicklungszahldichte“ ist. Das ist interessant; es kommt nicht alleine auf die Anzahl der Wicklungen an, sondern auch darauf, wie dicht sie beieinander liegen. Daher sind die vielen Spulen, die ihr so seht, immer ganz eng gewickelt! Wenn ihr mal einen Lautsprecher aufmacht, schaut ihr nach. Dazu sei gleich noch dieser Link angegeben:

http://www.leifiphysik.de/web_ph10/umwelt-technik/09lautsprech/lautsprech_l.htm

Wir haben bisher aus irgendwelchen Quellen elektrische Energie bezogen. Damit haben wir stromdurchflossene Leiter, die bspw. eine Glühbirne zum Leuchten bringen und um diese entstehen Magnetfelder. Befindet sich ein solcher Leiter „zufällig“ im Magnetfeld eines Hufeisenmagneten, dann folgt eine Kraftwirkung auf den Leiter. Schön und gut, aber kann man da auch andersherum gedacht vorgehen? Und zwar so:

Wir stellen uns einen Dauermagneten hin. Wir bauen die Leiterschaukel auf, aber ohne Spannungsquelle, sondern mit einem Spannungsmessgerät. Nun bringen wir die Kraft selbst auf und bewegen den Leiter im Magnetfeld. Und es passiert; wir messen eine Spannung! Wir haben das **Induktionsprinzip** entdeckt! Wir optimieren das noch schnell:

Bewegt man eine mehrfach gewickelte Leiterschleife (=Spule) sehr schnell in einem starken homogenen Feld (wir haben keinen Hufeisenmagneten sondern einen künstlichen Magneten aus Helmholtzspulen gewählt), dann erzeugt man große (naja, im Vergleich zu vorher!) Spannungen. Dabei rotiert man die Leiterschleife und dadurch ändert sich ständig die im Feld befindliche Fläche (wegen ihrer Schrägstellung). **Hier wird die Induktion durch eine Bewegung des Leiters durch ein homogenes Magnetfeld verursacht.**

Man kann auch die Leiterschleife, durch die noch kein Strom fließt, ortsfest lassen und den Magneten drehen. Das ist das gleiche Prinzip, es kommt auf die Relativbewegung an.

Bei unserem künstlichen Magnetfeld (durch die Helmholtzspulen) konnte man aber noch eine andere Variante der Induktion sehen; **wenn man das Magnetfeld ändert (indem man die Stromstärke in den Spulen verändert), wird auch ohne Bewegung des Rähmchens eine Spannung induziert.**

Es gibt also zwei Wege der Induktion; entweder ändert sich die magnetische Flussdichte B oder es ändert sich die sich im Magnetfeld befindliche Leiterfläche A . Man findet für die induzierte Spannung U_{ind} folgende Formeln (bei einer Spule mit n Windungen):

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

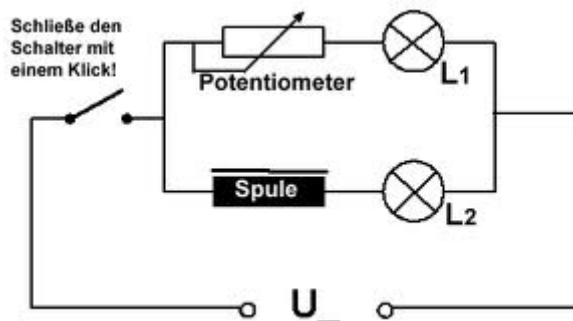
Dabei ist der vordere Fall der, dass sich das Magnetfeld B , welches senkrecht durch die Fläche A unseres Rähmchens durchgeht, ändert und der hintere Fall der, dass sich die Fläche im konstanten B -Feld (bspw. durch drehen) ändert. **Beide Effekte können sich addieren, indem das Rähmchen rotiert und das B -Feld sich ändert.**

Die Lenz'sche Regel erhält die Energie!

Die Induktionsspannung ist dabei so gepolt, dass sie durch ihren Strom ihrer Ursache entgegengewirkt. **Daher ist in der obigen Formel ein Minus notiert.**

Wir haben uns die Lenz'sche Regel angeschaut, indem wir einen Ringmagneten an einer elektrisch leitenden Stange herunterrutschen ließen und dieser dabei abgebremst wurde.

Wirklich spannend wird es, wenn man sich folgenden Stromkreis anschaut:



Hier geht es zum passenden Applet: <http://www.ulfkonrad.de/physik/ph-10-selbstind.htm>

Zu beobachten ist, dass zuerst Lampe $L1$ aufleuchtet und dann Lampe $L2$. Man nennt dies **Selbstinduktion**. Wieso ist das so?

Im Einschaltmoment baut sich in der Spule ein Magnetfeld auf. Denn: Dass eine stromdurchflossene Spule ein Magnetfeld hat, wissen wir bereits. Dass eine nicht-stromdurchflossene Spule keins hat, wissen wir auch. Wenn wir sie unter Strom setzen, wächst also B von Null auf den Maximalwert und damit baut sich offensichtlich ein Magnetfeld auf. Gleichzeitig wird nach dem Induktionsgesetz eine Spannung induziert (nach $U_{ind} = -n \cdot A \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t}$), die der Ursache (=Versorgungsspannung) entgegengerichtet ist. Das Lämpchen kann erst losleuchten, wenn das Magnetfeld der Spule ganz aufgebaut ist. Denn dann ändert sich B ja nicht mehr und die Induktionsspannung verschwindet ;-). Wenn man in Widerständen denkt, dann ist die Spule am Anfang ein sehr hoher Widerstand (sie „frisst“ ja einen Großteil der Außenspannung mit ihrer Gegenspannung). Dieser Widerstand verschwindet aber wieder, wenn

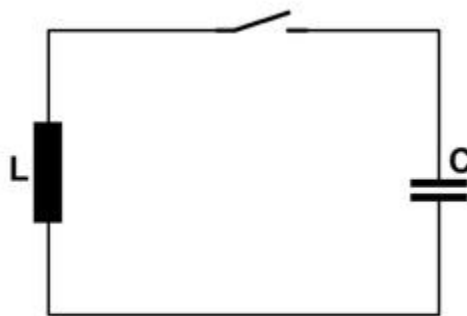
das Magnetfeld aufgebaut ist. Damit kann man sich auch klar machen, wieso Spulen Energie speichern; ohne Spule hätte die Lampe geleuchtet. Tut sie aber nicht gleich. Wohin ist die entsprechende Energie?! Sie ist im Magnetfeld der Spule.

Daher wiederholt sich der Vorgang der Selbstinduktion bei Ausschalten der Spule mit veränderten Vorzeichen: Das Ausschalten und damit die Unterbrechung des Stromflusses ändert das Magnetfeldes der Spule. Die Lampe L2 kann länger leuchten, denn die aus dem Magnetfeld freiwerdende Energie kann von ihr „verbraucht“ werden. Ein Applet für den Ein- wie den Ausschaltvorgang findest du hier:

<http://jakobvogel.net/legacy/index.php?url=physics/induction/selfinduction/index.xml>

Elektrischer Schwingkreis

Wenn man diesen Aufbau betrachtet, wird es noch lustiger:



Hier haben wir unsere beiden Lieblingsbauteile, einen Kondensator (mit Kapazität C) und eine Spule (mit Induktivität L) verbaut. Angenommen, der Kondensator ist geladen und der Schalter ist offen. Es passiert – nichts. Schließen wir aber den Schalter, dann kann die Ladung vom Kondensator abfließen (angenommen, oben waren die überschüssigen Elektronen, dann wandern sie über Draht und Spule zur unteren Platte). Beim Durchwandern der Ladungen durch die Spule baut sich ein Magnetfeld auf. Wenn die Ladungen sich ausgeglichen haben, ist das elektrische Feld zwischen den Kondensatorplatten verschwunden, aber das Magnetfeld der Spule maximal. Dieses hat aber nach Lenz eine der vorherigen Spannung entgegengesetzte Spannung aufgebaut. Diese treibt nun die Ladungen in die entgegengesetzte Richtung zurück! Dabei fließt der Strom in umgekehrter Richtung, das Magnetfeld wird abgebaut. Gleichzeitig bauen wir aber wieder das elektrische Feld des Kondensators auf und der Vorgang wird sich (bis auf Reibungsverluste) wiederholen. Wir haben eine Schwingung!