

Die I07-Elektronik-AG

Kapitel 6 – Spulen und Induktivitäten

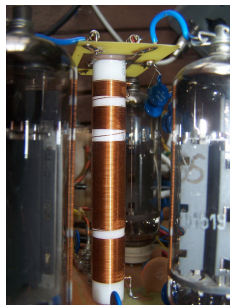
Lars-Chr. Schulze, DC0BM Ulrich Biester, DK7AU

Version 1.0

Die Spule

Wir kommen jetzt zu dem letzten Grundbauelement, welches wir für unsere Schaltungen benötigen, der Spule.

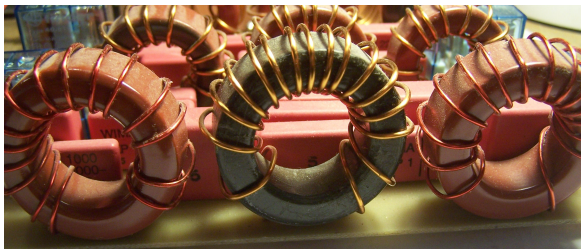
- Viele Bastler haben Spulen gegenüber eine gewisse Abneigung.
- Dabei ist die Spule das einzige Bauteil, welches wir selbst herstellen können.
- In den meisten Fällen ist eine Spule nur ein aufgewickelter Draht.



Die Spule I

Was ist eine Induktivität II

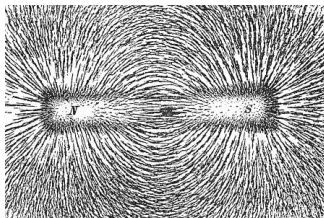
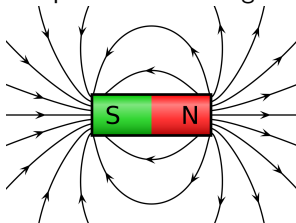
- Die Abneigung von Bastlern gegenüber Spulen liegt vielleicht auch daran, dass sie relativ schwierig zu berechnen sind.
- Die entspr. Gleichungen sind kompliziert [4] und meist nicht geschlossen lösbar, d. h. dass man oft Vereinfachungen machen oder mit Näherungen arbeiten muss.
- Im Studium gab es mal eine Übungsaufgabe: "Gegeben ist ein 1m langer Draht mit einem 90°-Knick in der Mitte. Berechnen Sie seine Induktivität."
- Und da stellt sich dann die Frage: was ist eigentlich diese **Induktivität**?



Die Spule

Was ist eine Induktivität III

- Die **Induktivität** ist ein Maß für die **Menge an Energie**, die eine Spule speichern kann, ähnlich wie die Kapazität bei einem Kondensator.
- Die Spule ist praktisch die Schwester des Kondensators und verhält sich in vielerlei Hinsicht, auch mathematisch, spiegelbildlich zum Kondensator.
- Bei einem **Kondensator** wird die Energie in Form eines **elektrischen Feldes** gespeichert.
- Eine **Spule** speichert die Energie in Form eines **magnetischen Feldes**.

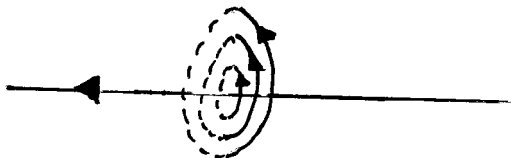


Bilder von Wikipedia [5, 6]

Die Spule

Was ist eine Induktivität IV

- Wie bereits im Kapitel über den Kondensator erwähnt, können wir die Feldlinien nicht sehen.
- Magnetische Feldlinien lassen sich aber durch das Experiment mit den Eisenfeilspänen sichtbar machen.
- Wenn wir **Strom** durch einen Draht schicken, baut sich um diesen Draht herum ein **magnetisches Feld** auf. Das lässt sich nicht verhindern.
- Auch ein Stück **Draht** besitzt daher bereits eine **Induktivität!**



Die Spule

Was ist eine Induktivität V

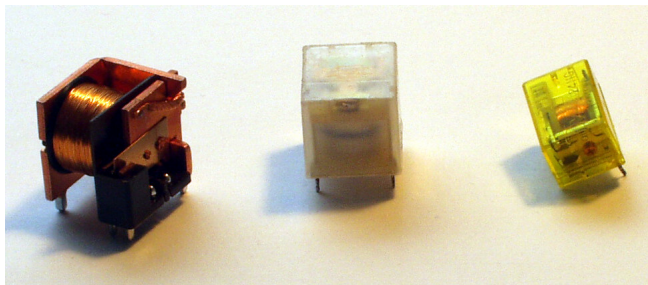
- Wickelt man diesen Draht zu einer Spule, so werden dadurch das magnetische Feld und die Induktivität verstärkt.
- Das magnetische Feld entspricht dann dem eines Stabmagneten.
⇒ Wir haben einen Elektromagneten gebaut.
- Eine weitere Verstärkung¹ des Magnetfeldes lässt sich z. B. dadurch erreichen, dass man die Spule um einen Eisenkern wickelt.
- Die Induktivität von Drähten muss auch beim Entwurf von Schaltungen für hohe Frequenzen wie Satellitenempfänger oder Computerplatinen berücksichtigt werden.
- In der Digitaltechnik werden oft kleine Kondensatoren direkt an die Stromversorgungsanschlüsse der ICs gelötet.
- Bei schnellen Schaltvorgängen kann – bedingt durch die Induktivität der Leitung – der Strom oft nicht schnell genug nachfließen. Die Kondensatoren liefern dann für den Umschaltmoment den Strom.

¹Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass es auch Stoffe gibt, die das magnetische Feld abschwächen.

Die Spule

Was ist eine Induktivität VI

- Eine Anwendung für so einen Elektromagneten ist z. B. ein **Relais**.
- Ein Relais ist ein **elektrisch betätigter Schalter**.
- Dabei wird ein Strom durch eine Spule geschickt. Dadurch entsteht ein Magnetfeld, welches einen Eisenbügel anzieht.
- Dieser Eisenbügel betätigt dann einen Schalter.
- Der Vorteil eines Relais ist, dass es **keine elektrisch leitende Verbindung** zwischen dem Schaltstromkreis und dem Lastkreis gibt.



Schaltsymbole und Einheit

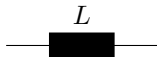
- Die Induktivität von Spulen wird in der Einheit **Henry** angegeben, zu Ehren des amerikanischen Physikers **Joseph Henry**.
- Abgekürzt wird die Einheit Henry mit H .
- Das Formelzeichen für die Induktivität ist L , zu Ehren des russischen Physikers **Emil Lenz**.
- Emil Lenz entwickelte auch die nach ihm benannte *Lenz'sche Regel*.
- Wie das Farad ist auch das Henry ist eine relativ große Einheit, so dass die Induktivität von Spulen meist in μH oder mH angegeben wird.

Die Spule

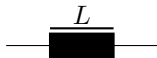
Schaltsymbol und Einheit der Spule II

- In Schaltplänen werden für eine Spule eine Reihe unterschiedlicher Symbole verwendet, je nach Anwendungsfall.

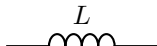
Drossel- oder Filterspule:



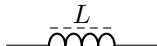
Spule mit Eisenkern:



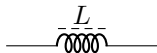
Spule im Hochfrequenzbereich:



HF-Spule mit Ferrit-Kern:



„American Style“, mit Schlaufen:

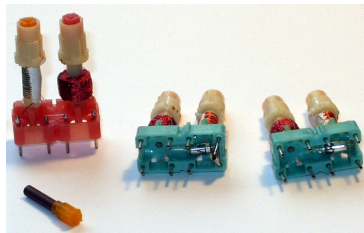
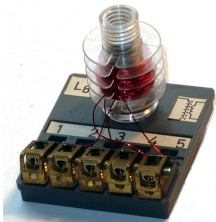


- Beispiel: Schaltplan eines realen (analogen) Funkempfängers.

Die Spule I

Aufbau einer Spule I

- Spulen gibt es ähnlich wie Kondensatoren in vielen unterschiedlichen Bauformen für ganz unterschiedliche Anwendungen. Eine Spule kann als ausgeführt sein als
 - **Luftspule**,
 - auf einen **Spulenkörper** oder
 - auf einen **Eisen- oder Ferritkern²** gewickelt sein.



² **Ferrit** besteht aus gemahlenem und zusammengeklebten Eisenpulver. Der Sinn dahinter ist, dass in dem Eisenkern so das Auftreten sog. **Wirbelströme** verhindert wird. Es würden sonst in dem Eisenkern Ströme fließen. Und wo ein Strom fließt, gibt es Verluste durch Erwärmung. Dies wird durch den Klebstoff verhindert.

Die Spule

Das elektrische Verhalten einer Spule I

Das elektrische Verhalten einer Spule

Die Induktion

- Um das elektrische Verhalten einer Spule zu untersuchen, schauen wir uns den abgebildeten Schaltplan an.
- Über einen Schalter verbinden wir zwei Glühlampen mit einer Spannungsquelle. Bei einer der Glühlampen ist noch eine Spule in Serie geschaltet.
- Wenn wir jetzt den Schalter betätigen, geschieht etwas Merkwürdiges.
- Eine Spule besteht ja im Prinzip nur aus einem Draht, stellt also eigentlich einen Kurzschluss dar.

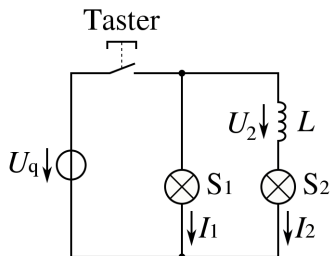


Bild von Wikipedia [8], modifiziert.

Die Spule

Das elektrische Verhalten einer Spule II

- Wenn wir jetzt aber den Schalter schließen, werden wir feststellen, dass die Lampe S_1 sofort leuchtet, die Lampe S_2 aber erst mit Verzögerung.
- Es fließt sofort ein Strom I_1 durch die Lampe S_1 .
- Der Strom I_2 steigt aber nur langsam an. Dies liegt an der **Induktivität** der Spule L .
- In dem Moment, in dem der Schalter geschlossen wird, baut sich um die Spule herum ein **Magnetfeld** auf.
- Jetzt wissen wir aber, dass ein sich **veränderndes magnetisches Feld** ein **elektrisches Feld** erzeugt. Diesen Vorgang nennt man **Induktion**.

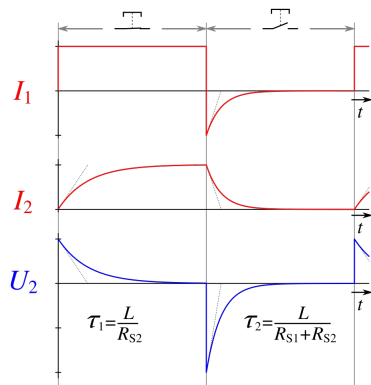
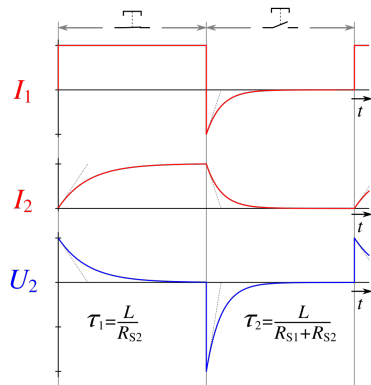


Bild von Wikipedia [9]

Die Spule

Das elektrische Verhalten einer Spule III

- Dadurch wird in der Spule ein **elektrisches Feld**, also eine Spannung, aufgebaut.
- Diese Spannung hat die **gleiche Polung**, wie die an der Spule angelegte Spannung, wodurch sich der **Unterschied relativ zur Batteriespannung** verringert.
- Man kann dies vergleichen mit einer Rutsche, bei der man das untere Ende anhebt.
- Die Neigung der Rutsche ist dann nicht mehr so hoch und man rutscht langsamer.
- Es fließt zunächst also nur ein **geringer Strom** und die Kurve für I_2 steigt nur langsam an.
- In gleichem Maße, wie der Strom I_2 ansteigt, nimmt die Spannung U_2 über der Spule langsam ab.



Der stabile Zustand

- Nach einer Weile ist das Magnetfeld dann vollständig aufgebaut, und es gibt keine Induktion mehr.
- Damit gibt es aber auch **nichts** mehr, was den fließenden Strom **bremsen** könnte!
- Der Strom nimmt also immer mehr zu. Nur der Widerstand des Drahtes begrenzt jetzt noch den Strom.
- Da dieser bei den meisten Spulen relativ gering ist, muss man hier Vorkehrungen treffen, um einen **Kurzschluss** zu **vermeiden**.
- Aus diesem Grund sind Relaispulen z. B. auch aus relativ dünnem Draht gewickelt, um einen ausreichende hohen ohmschen Widerstand zu erhalten.
- Bei unserer Schaltung übernimmt die Glühbirne diese Funktion.
- Dieses Verhalten der Spule ist genau **gegensätzlich zum Kondensator**, bei dem im ersten Moment nach dem Anlegen der Spannung der Strom am größten ist!

Die Spule

Das elektrische Verhalten einer Spule V

Die Gegeninduktion

- Wenn jetzt der Strom durch Öffnen des Schalters abgeschaltet wird, brennen beide Glühlampen zunächst weiter. Wieso?
- Wenn der Schalter geöffnet wird, beginnt das Magnetfeld, sich abzubauen.
- Dadurch wird aber wieder eine **Spannung induziert** (U_2), die jetzt aber gegenüber der **ursprünglich** an der Spule liegenden **Spannung** genau die **entgegengesetzte Polarität** hat. Dies ist die **Lenz'sche Regel**.
- Dieser Effekt wird daher als **Gegeninduktion** bezeichnet.
- Die induzierte Spannung lässt den Strom durch beide Glühlampen weiterfließen.

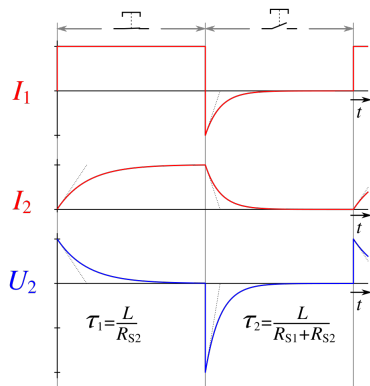


Bild von Wikipedia [9]

Die Spule

Das elektrische Verhalten einer Spule VI

- Der Strom I_1 durch die Birne S_1 ändert seine Richtung, was man aber bei einer Glühbirne nicht bemerkt.
- Der Strom I_2 durch die Birne S_2 nimmt langsam ab.
- Die an der Spule anliegende Spannung U_2 hat ihre Polarität gewechselt.
- Man erkennt außerdem, dass die durch die Gegeninduktion erzeugte Spannung deutlich höher ist als die ursprünglich angelegte Spannung.
- Wenn der Stromfluss durch das plötzliche Öffnen des Schalters schnell unterbrochen wird, können sich durch die Gegeninduktion teilweise sehr hohe und **gefährliche Spannungen** aufbauen!

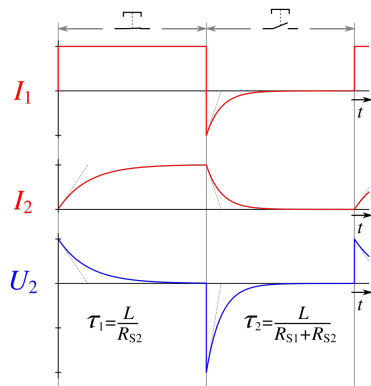


Bild von Wikipedia [9]

Versuche:

Verhalten des einer Spule bei Wechselspannung.

Messung des Frequenzgangs einer RL-Kombination.

Hinweis: Auf das Pendant zur Messung der Lade- und Entladekurve verzichten wir hier und behandeln das theoretisch. Bei den dafür benötigten großen Induktivitäten könnten gefährlich hohe Spannungen entstehen.

Die Spule und Wechselstrom

- Wenn wir jetzt, wie beim Kondensator die **Wechselspannung** so schnell umpolen, d.h. die Frequenz so hoch einstellen, dass sich die **Polarität ändert**, bevor sich das **Magnetfeld vollständig, aufgebaut** hat, wird der Strom praktisch **ständig** durch die Spule **begrenzt**.
- Wenn wir die Frequenz immer weiter erhöhen, stellen wir fest, dass der Strom immer geringer wird.
- Spulen stellen für **Wechselstrom** einen **frequenzabhängigen Widerstand** dar, der mit **steigender Frequenz** immer **größer** wird.
- Wie beim Kondensator wird dieser Widerstand als **Scheinwiderstand** oder **induktiver Blindwiderstand** X_L bezeichnet.
- Auch dieser Widerstand ist kein Widerstand im Sinne des Ohmschen Gesetzes.

Vergleich von Kondensator und Spule

In der folgenden Tabelle sind die grundlegenden Eigenschaften von Kondensator und Spule noch einmal gegenüber gestellt.

| | Kondensator | Spule |
|----------------------------|---|--|
| Verhalten bei Gleichstrom | Unterbrechung (nach Abschluss des Aufladevorgangs) | Kurzschluss (wenn Magnetfeld voll aufgebaut) |
| Verhalten bei Wechselstrom | Mit der Frequenz sinkender Blindwiderstand | Mit der Frequenz steigender Blindwiderstand |
| Berechnung | $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$ | $X_L = 2\pi f L$ |

Anwendungen der Induktion

Der Generator

- Ein Anwendung findet die Induktion beim **elektrischen Generator**.
- Hier wird ein Magnet in einer Anordnung von Spulen gedreht.
- Durch die Drehung ändert sich in den Drähten der Spulen permanent die Stärke des magnetischen Feldes.
- Dadurch wird in den Spulen ein elektrisches Feld induziert und eine Spannung aufgebaut. Es fließt ein Strom.

Die Zündspule

- Bei Verbrennungsmotoren (außer beim Diesel) muss über die Zündkerzen zum richtigen Zeitpunkt ein Funke erzeugt werden, welcher den Kraftstoff in den Zylindern entzündet.
- Dieser Funke wird – zumindest bei älteren KZF – durch eine große Spule erzeugt, durch die ein relativ großer Strom geschickt wird, der dann plötzlich abgeschaltet wird.
- Durch die Induktion entstehen Spannungen von mehr als 1000 V (!), wodurch an der Zündkerze der Funke überspringt.

Vorsichtsmaßnahmen

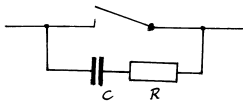
Die Funkenlöschbrücke

- Aus der Gegeninduktion resultiert auch ein Effekt, der in der Praxis beachtet werden muss.
- Wir haben gesehen, dass ein Strom, der einmal fließt, weiterfließen will!
- Und wenn man versucht, ihn aufzuhalten, passieren „unschöne“ Dinge.
- Auch dies kann man wieder mit Wasser vergleichen.
- Wenn ein Fluss fließt, dann fließt er.
- Versucht man ihn, z. B. durch einen Damm, aufzuhalten, steigt der Pegel bis der Damm u. U. bricht.
- Im Falle des elektrischen Stroms baut sich eine hohe Spannung auf und ggf. springt ein Funke über, wie bei einer Zündkerze.
- Dies führt sowohl bei der Zündkerze als auch bei Schaltern zu Kontaktbrand.

Die Spule

Anwendungen der Induktion IV

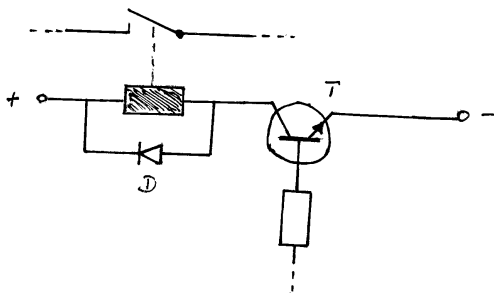
- Viele Schalter sind daher mit einer sog. **Funkenlöschbrücke** ausgestattet.



- Dies ist eine einfache RC-Serienschaltung, welche den Strom noch einen Moment weiterfließen lässt.
- Dadurch wird verhindert, dass sich eine hohe Spannung aufbaut.
- Allerdings hat im Falle von Wechselspannung diese Funkenlöschbrücke den Effekt, dass das zu schaltende Gerät nicht 100%-ig vom Netz getrennt ist!.
- Dies sieht man manchmal auch bei Geräten mit Glimmlampe als Funktionsanzeige.
- Die Glimmlampe glimmt auch in „ausgeschaltetem“ Zustand noch schwach vor sich hin.

Die Freilaufdiode

- Der Effekt der Gegeninduktion tritt auch bei kleinen Spulen auf, z. B. auch bei Relaisspulen.
- Wenn man also ein Relais mit einem Transistor ansteuert muss man als „Lebensversicherung“ für den Transistor eine Diode, die sog. **Freilaufdiode** in Sperrichtung parallel zur Relaiswicklung schalten.



Die Spule

Anwendungen der Induktion VI

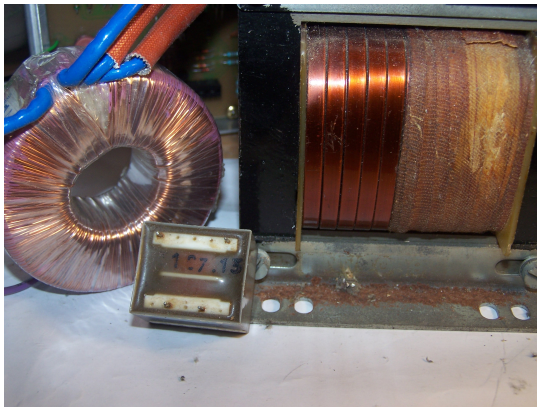
- Im normalen Betrieb beeinflusst die Diode die Schaltung nicht.
- Wird jetzt das Relais abgeschaltet, tritt die Gegeninduktion auf und will einen Strom in der entgegengesetztem Richtung treiben
- Für diesen Strom ist die Diode jetzt aber in Durchlassrichtung geschaltet und ermöglicht, dass der Strom fließen kann, ohne dass sich hohe Spannungen aufbauen.

Vorsicht vor der Sättigung

- Bei Elektromagneten und Spulen aller Art muss man allerdings aufpassen, dass man den Eisenkern nicht in die **Sättigung** fährt.
- Die Sättigung ist ein Zustand, bei dem sich der Eisenkern auch bei **steigendem Strom nicht mehr weiter magnetisieren** lässt.
- Wegen der dann fehlenden Induktion wäre die Spule wieder mehr und mehr ein Kurzschluss, und der Strom würde stark ansteigen, was zu einer **Überhitzung** der Spule führt.

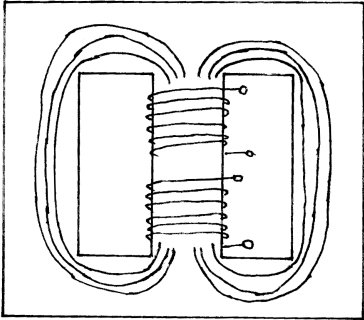
Der Transformator

- Eine weitere, sehr wichtige Anwendung der Induktion ist der **Transformator**, kurz auch „Trafo“ genannt.



Die Spule

Der Transformator II

- Ein Transformator besteht aus zwei Spulen: der sog. **Primärspule** und der sog. **Sekundärspule**.
 - Beide Spulen werden gemeinsam auf einen Eisenkern, meist ein Eisenjoch, gewickelt.
 - Der Eisenkern dient zum einen zur Verstärkung des magnetischen Feldes und zum anderen zur Führung der magnetischen Feldlinien.
- 
- Es sollten so viele Feldlinien wie möglich durch den Eisenkern und damit durch die Spulen verlaufen, denn nur diese tragen zur Energieübertragung bei.
 - Der Eisenkern besitzt drei Stege zwischen dem oberen und dem unteren Verbindungsstück.

Die Spule

Der Transformator III

- Die Spulen werden um den mittleren Steg herum gewickelt.
- Vom dort aus können die magnetischen Feldlinien „bequem“ zu beiden Seiten um die Spulen herum laufen, ähnlich wie bei einem Stabmagneten.
- Allerdings „drängeln“ sich die Feldlinien an den Ecken des Eisenkerns, während andere Bereiche nicht richtig ausgenutzt sind.
- Dieser Effekt lässt sich mit **Ringkerntrafos** vermeiden, sh. Folie 31
- Auch in einem Trafokern können **Wirbelströme** fließen.
- Um diese zu verringern besteht der Eisenkern selber aus geschichteten dünnen Blechen, welche lackiert und damit gegeneinander isoliert sind.
- Die Ströme in einem Trafo müssen außerdem annähernd sinusförmig sein.
- Es kann sonst durch Induktion erzeugte Spannungsspitzen geben, welche den Trafo und / oder umliegende Bauteile zerstören können.

Wichtig:

- Bei einem Trafo erfolgt die Übertragung der Energie **nur** durch das **magnetische Feld!**
- Es gibt **keine leitende Verbindung** zwischen der **Primär-** und der **Sekundärseite**.
- Man sagt dazu auch, die beiden Seiten sind **galvanisch getrennt**.
- Dies ist wichtig bei Geräten, bei denen der Anwender mit spannungsführenden Leitungen in Berührung kommen könnte.
- Wichtig ist die galvanische Trennung auch in Werkstätten und im medizinischen Bereich.
- Niemand möchte gerne plötzlich 230 V an den Elektroden des EKGs anliegen haben 😊.

Die Spule

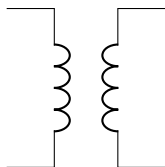
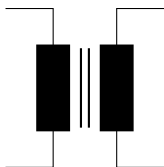
Der Transformator V

- Eine andere Bauform des Trafos ist der sog. **Ringkerntrafo**.
- Ringkerntrafos haben geringere Verluste, da die Feldlinien in dem Ringkern optimal geführt werden können.
- Sie sind allerdings in der Produktion deutlich aufwändiger und damit auch teurer, da jede Windung durch den Ring gefädelt werden muss.



Das Schaltsymbol des Transformators

- Das Schaltsymbol eines Transformators besteht einfach aus zwei sich gegenüber stehenden Spulen.
- Im NF-Bereich (Netztrafos) werden dafür meist die ausgefüllten Rechtecke verwendet, mit dem angedeuteten Eisenkern.
- Im HF-Bereich verwendet man meist die Darstellung mit den einzelnen Windungen.



Der Trafo – Wie funktioniert er

- Das Funktionsprinzip eines Transformators ist eigentlich recht einfach.
- Wir leiten **Wechselstrom** durch die **Primärspule** des Trafos.
- Wie wir wissen, wird dadurch ein sich **veränderndes magnetisches Feld** erzeugt.
- Dieses veränderliche Feld **induziert** nun aber in der **Sekundärspule** eine **elektrische Spannung**.
- Schließt man einen Verbraucher an die Sekundärseite an, so kann ein Strom fließen.
- Die **Höhe der Spannung** in der Sekundärspule richtet sich dabei nach der **Zahl der Windungen** in den Spulen.
- In **jeder Windung** der Sekundärspule wird durch das Magnetfeld eine kleine Spannung induziert.

Die Spule

Der Transformator VIII

- Wickeln wir jetzt viele Windungen um den Eisenkern, **addieren** sich die **Spannungen** der einzelnen Windungen zu einer **Gesamtspannung**, ähnlich wie wenn man Batterien in Reihe schaltet.
- In der Praxis spielt aber auch die Zahl der **Windungen** in der Primärspule eine Rolle, so dass sich das **Übersetzungsverhältnis der Spannungen** folgendermaßen berechnet:

$$\frac{U_{prim}}{U_{sek}} = \frac{n_{prim}}{n_{sek}}$$

- Die Primär- und die Sekundärspannung verhalten sich zueinander also wie die Zahl der Windungen.

Beispiel:

- Wir haben einen Trafo mit 2300 Windungen auf der Primärseite und 120 Windungen auf der Sekundärseite und schließen diesen an das 230 V-Netz an.
- Dann würden wir auf der Sekundärseite eine Spannung von

$$U_{sek} = \frac{n_{sek}}{n_{prim}} \cdot U_{prim} = \frac{120}{2300} \cdot 230 \text{ V} = 12 \text{ V}$$

erhalten.

Die Spule

Der Transformator X

Ströme:

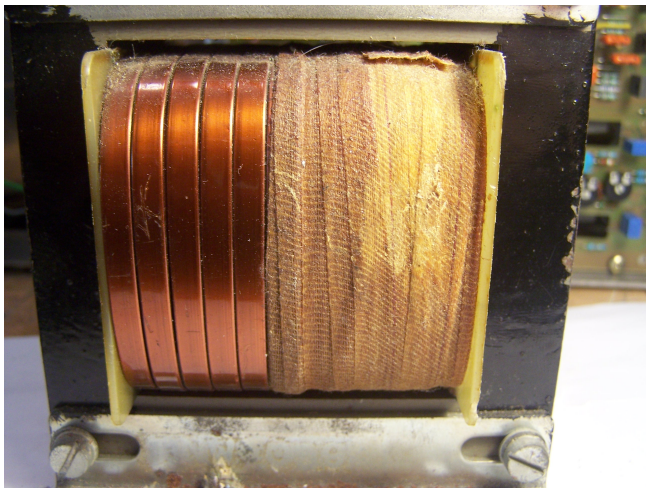
- Die Ströme bei einem Trafo verhalten sich genau anders herum wie die Spannungen.
- Für die Ströme gilt:

$$\frac{I_{prim}}{I_{sek}} = \frac{n_{sek}}{n_{prim}}$$

- Bei einem „normalen“ Trafo, welcher die Spannung aus dem Stromnetz von 230 V auf z. B. 12 V heruntertransformiert, ist der auf der Sekundärseite entnehmbare Strom deutlich größer als der Strom, der auf der Primärseite in den Trafo hineinfließt.
- Dies muss auch so sein, da ja die **Leistung** auf beiden Seiten des Trafos, abgesehen von den unvermeidbaren Verlusten, **gleich** sein muss.
- Da sich die Leistung aus dem Produkt von Strom und Spannung $P = U \cdot I$ berechnet, bedeutet eine geringere Spannung einen höheren Strom.

Die Spule

Der Transformator XI



Der Trafo – Wieso kein Kurzschluss

- Jetzt stellt sich natürlich die Frage, da eine Trafo-Spule ja im Prinzip nur aus einem Draht besteht, ob wir damit nicht einen Kurzschluss verursachen.
- Die Antwort dazu lautet: Ja und nein 😊.
- Zunächst einmal hat der Draht der Spule einen eher geringen ohmschen Widerstand.
- Bei Gleichstrom wäre das auch so. Wir hätten dann mehr oder weniger einen Kurzschluss.
- Bei Wechselstrom kommt jetzt aber noch der durch die Induktivität erzeugte **Blindwiderstand** hinzu. Dieser begrenzt den Strom auf ein ungefährliches Maß.
- Natürlich muss der Trafo entspr. berechnet sein, damit das hinkommt.

Anwendungen des Trafos

Beim Stromnetz:

- Mittels eines Transformators lassen sich Wechselspannungen in der Spannungshöhe transformieren.
- Dies ist eine sehr wichtige Eigenschaft der Transformatoren und der Wechselspannung.
- Ohne die Möglichkeit der Transformation der Spannung und von Hochspannungsnetzen wäre unser Stromnetz, wie wir es kennen, nicht möglich!
- Bahnbrechende Forschungen zum Thema Wechselspannung hat u. a. **Nikola Tesla** [7] geleistet.

Im NF-Bereich:

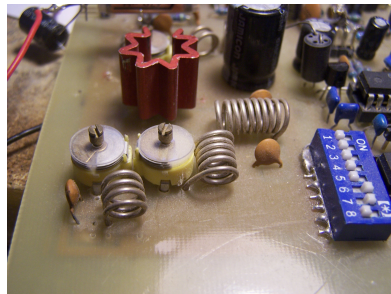
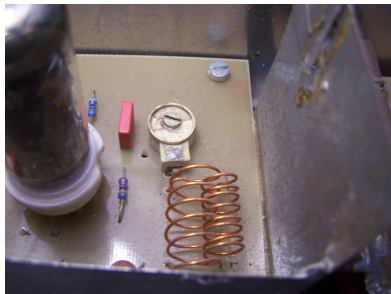
- Eine andere Anwendung finden Trafos überall dort, wo eine galvanische Trennung benötigt wird.
- Es gibt z. B. kleine Trafos für den NF-Bereich mit gleicher Windungszahl auf beiden Seiten.
- Bei diesen **NF-Übertragern** will man keine Spannungen transformieren, sondern es kommt hier auf die galvanische Trennung an.
- Hierdurch lassen sich z. B. in Audioanlagen **Brummschleifen** vermeiden.

Die Spule

Der Transformator XV

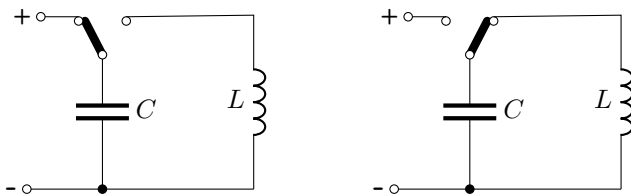
Im HF-Bereich:

- In (analogen) Funkempfängern findet man auch eine Reihe von „Transformatoren“, meist in Form kleiner Spulen.
- Sie dienen entweder als Filter und / oder zur korrekten Weiterleitung der Hochfrequenz durch Anpassung von Bauteil- und Schaltungseigenschaften auf den beiden Seiten des Trafos.



Spule und Kondensator als Paar – Der Schwingkreis

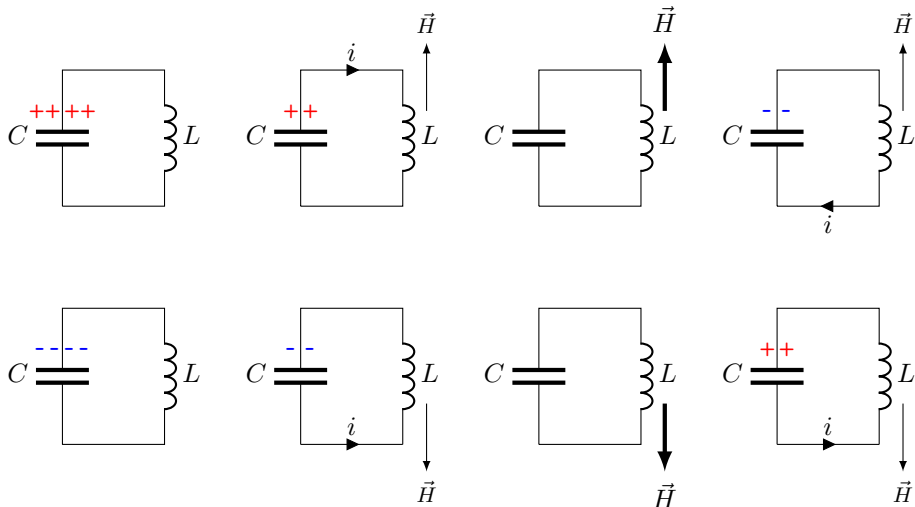
- Zum Abschluss der Grundlagen über Bauelemente kommen wir jetzt zu einer besonderen Kombination: dem **Schwingkreis** [10].
- Betrachten wir dazu folgende Schaltung:



- Im linken Bild wird der Kondensator von einer Spannungsquelle aufgeladen.
- Dann wird der Schalter umgeschaltet und die Spule und der Kondensator bilden jetzt einen Parallelschaltung, wie im rechten Bild zu sehen ist.

Die Spule

Spule und Kondensator als Paar – Der Schwingkreis II



Die Spule

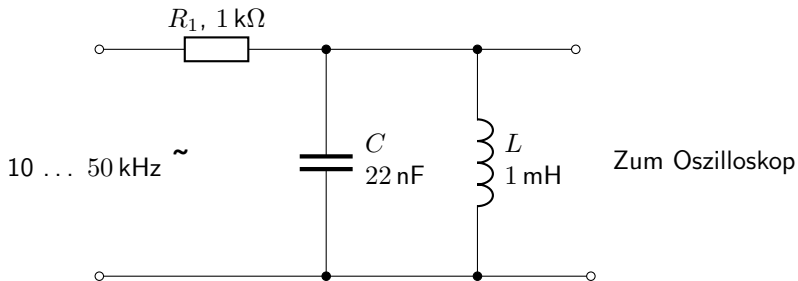
Spule und Kondensator als Paar – Der Schwingkreis III

- Was passiert nun? Der Kondensator ist geladen. Es fließt also ein Strom aus dem Kondensator durch die Spule, und in der Spule baut sich ein Magnetfeld auf.
- Dann ist der Kondensator entladen. Dafür haben wir aber ein Magnetfeld um die Spule herum.
- Da jetzt aber kein Strom mehr fließt, beginnt das Magnetfeld, sich wieder abzubauen, wodurch in der Spule eine Spannung im **umgekehrter Polarität** induziert wird.
- Es fließt also jetzt wieder ein Strom, welcher den Kondensator in **umgekehrter Polarität** wieder auflädt.
- Dann beginnt das Spiel von Neuem.
- Der Name der Schaltung erklärt sich nach diesen Erläuterungen sicher von selbst. Die Energie schwingt zwischen Kondensator und Spule hin und her.
- Dies funktioniert so lange, bis die Energie, die ursprünglich im Kondensator enthalten war, durch Verluste an den Widerständen der Drähte aufgebraucht ist.

Die Spule

Spule und Kondensator als Paar – Der Schwingkreis IV

- Was passiert nun, wenn man jetzt von außen eine Wechselspannung veränderlicher Frequenz auf diesen Parallelschwingkreis gibt.
- Betrachten wir dazu folgende Schaltung:



- An den Eingang der Schaltung legen wir eine sinusförmige Wechselspannung von 10 ... 50 kHz.

Die Spule

Spule und Kondensator als Paar – Der Schwingkreis V

Die Resonanz

- Wir sehen, dass die über dem Schwingkreis gemessene Spannung zunächst relativ konstant ist.
- Dann steigt sie plötzlich an, bis sie einen Maximalwert erreicht.
- Danach fällt die Spannung wieder ab.
- Diese Spitze in der Spannung wird als **Resonanz** bezeichnet.

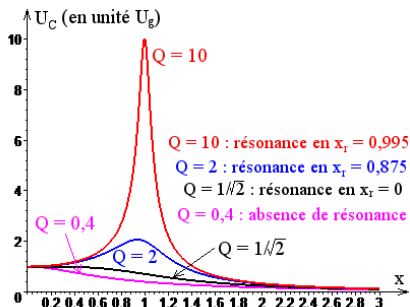


Bild von Wikipedia[12]

Die Spule

Spule und Kondensator als Paar – Der Schwingkreis VI

- **Resonanz** bedeutet, dass die Reaktion („Schwingung“) eines Systems um ein **Vielfaches größer** sein kann als die **Anregung**.
- Die **Resonanzfrequenz** eines Schwingkreises kann über die sog. **Thomsonsche Schwingungsformel** berechnet werden.

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

- Die Resonanz ist ein in der Natur häufig vorkommender und teilweise sehr gefährlicher Effekt.
- Fast jedes mechanische oder elektrische System hat irgendwo eine Resonanz.
- Resonanz kann zum Einsturz von Bauwerken oder Brücken führen, sh. z. B. die **Tacoma Narrows Bridge** [11].
- Aus dem gleichen Grund wird keine Kompanie Soldaten im Gleichschritt über eine Brücke marschieren.
- Wenn sie nämlich – per Zufall – die Resonanzfrequenz der Brücke treffen würden, könnte diese – im Sinne des Wortes – unter ihren Füßen zusammenbrechen!

Die Spule

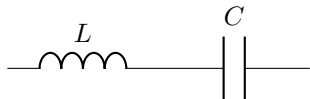
Spule und Kondensator als Paar – Der Schwingkreis VII

- In elektrischen Schaltungen kann die Resonanz durch Spannungsspitzen zur Zerstörung von Bauteilen führen.
- Die hohe Spannung im Falle der Resonanz bedeutet, dass der **Parallelschwingkreis** im diesem Falle einen **hohen Blindwiderstand** aufweist.
- Der Parallelschwingkreis wird daher auch als **Bandpass** bezeichnet.
- Die **Resonanzfrequenz** wird **durchgelassen**, alle **anderen Frequenzen** werden entweder über den Kondensator oder die Spule **abgeleitet**.
- Der Parallelschwingkreis wird in (analogen) Funkempfängern – meist über einen Drehkondensator – zur Einstellung des Senders verwendet.
- Die gewünschte Sendefrequenz wird durchgelassen, alle anderen werden blockiert.

Die Spule

Spule und Kondensator als Paar – Der Schwingkreis VIII

- Als Ergänzung zum Parallelschwingkreis gibt es auch den **Serienschwingkreis**, bei dem Spule und Kondensator in Serie geschaltet sind.



- Der Serienschwingkreis verhält sich nun genau anders herum. Er hat im **Resonanzfall** einen besonders **geringen Blindwiderstand**.
- Der Serienschwingkreis filtert die **Resonanzfrequenz** also nicht heraus, sondern **unterdrückt** sie.
- Der Serienschwingkreis wird daher auch als **Bandsperr**e bezeichnet.
- Die Resonanzfrequenz des Serienschwingkreises wird ebenfalls über die Thomsonsche Schwingungsformel berechnet.

Die Güte des Schwingkreises

- Wie in dem Bild auf Folie 46 dargestellt ist, kann die Resonanzkurve unterschiedlich breit sein.
- Die Breite der Kurve ist ein Maß für die sog. **Güte** des Schwingkreises.
- Diese wird bestimmt durch die Eigenschaften der verwendeten Bauteile.
- Es gibt Verluste in den Drähten der Bauteile, im Dielektrikum des Kondensators und im Eisen- oder Ferritkern der Spulen.
- Ein einzelner Schwingkreis reicht daher zur Sendereinstellung in Funkempfängern meist nicht aus.
- Hier werden zu diesem Zweck meist mehrere Filter hintereinander geschaltet.

Die Spule I

Referenzen

- [1] Der Deutsche Amateur-Radio-Club e.V.: www.darc.de
- [2] Die Webseite des OV I07: www.amateurfunk-leer.de
- [3] Verband der Funkamateure in Telekommunikation und Post e.V. (früher: Vereinigung der Funkamateure der Deutschen Bundespost): www.vfdb.org, z31.vfdb.org
- [4] <https://de.wikipedia.org/wiki/Induktivit%C3%A4t>
- [5] https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:VFpt_cylindrical_magnet_thumb.svg
Verwendung gem.[13].
- [6] <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Magnet0873.jpg>. Verwendung gem.[13].
- [7] https://de.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla
- [8] <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Selbsti.gif>
Verwendung gemeinfrei.
- [9] <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Selbstinduktion-im-gleichstromkreis-zeitverlauf.svg>
Verwendung gemeinfrei.
- [10] <https://de.wikipedia.org/wiki/Schwingkreis>
- [11] https://de.wikipedia.org/wiki/Tacoma_Narrows_Bridge

Die Spule II

Referenzen

- [12] https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:R_L_C_s%C3%A9rie_-_courbes_de_la_tension_efficace_Uc_en_fonction_de_la_fr%C3%A9quence.png&oldid=507032971
Verwendung gem.[14].
- [13] creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.de
- [14] creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de

© Alle Rechte beim DARC OV I07 bzw. den Autoren. Für Ausbildungs- und Lehrzwecke frei verwendbar.
Die gewerbliche oder kommerzielle Nutzung bedarf der schriftlichen Genehmigung.

Nicht referenzierte Bilder von DJ1FC oder vom Author.

Version 1.0, April 2026.

Dokument erstellt mit \LaTeX unter Verwendung der Pakete TikZ, CircuitikZ und Beamer.