



Dette dokument beskriver lidt om spoler.

Siden udbygges fortløbende: Kom gerne med gode ideer!

Diverse spoler:

Selv en lige leder udgør en spole, idet, der opstår et magnetfelt om lederen, når der løber strøm i den. Kilde: #¹

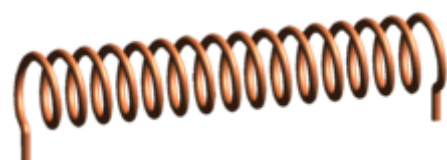
Men ved at sno ledningen op i flere løkker, og evt. placere et materiale i magnet-felt-vejen, der leder magnetfelt bedre end luft, kan man få genereret et kraftigere magnetfelt ved samme strøm, og derfor øge spolens fysiske egenskaber.

Spoler kan have meget forskellige udseender

Fælles er, at de udnytter de fysiske egenskaber for magnetisme.



<http://en.wikipedia.org/wiki/Inductor>



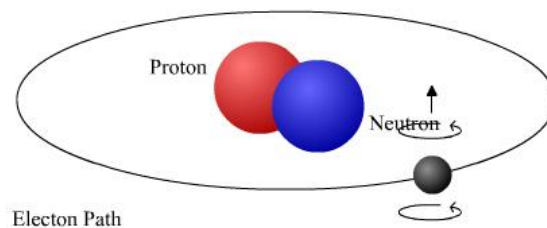
Hvad er egentlig et magnetfelt?

¹ <http://www.tpub.com/neets/book2/2a.htm>



En elektron, der spinner, skaber lille magnetfelt.

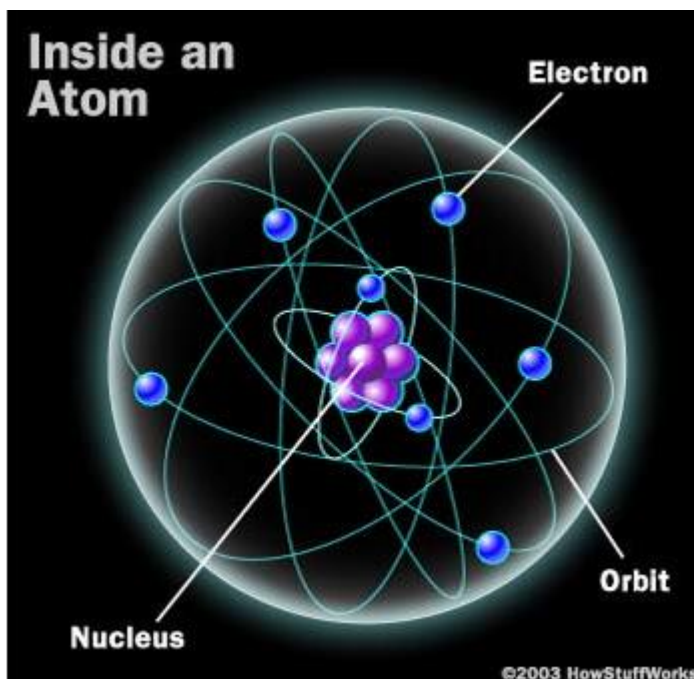
Og elektroner i kredsløb om kernen skaber et magnetfelt.



Elektroners orbit omkring kernen i et umagnetisk materiale skaber også et magnetfelt.

Hver elektron giver et magnetfelt, men de ”mange” magnetfelter har tilfældige retninger, og ophæver derfor hinanden.

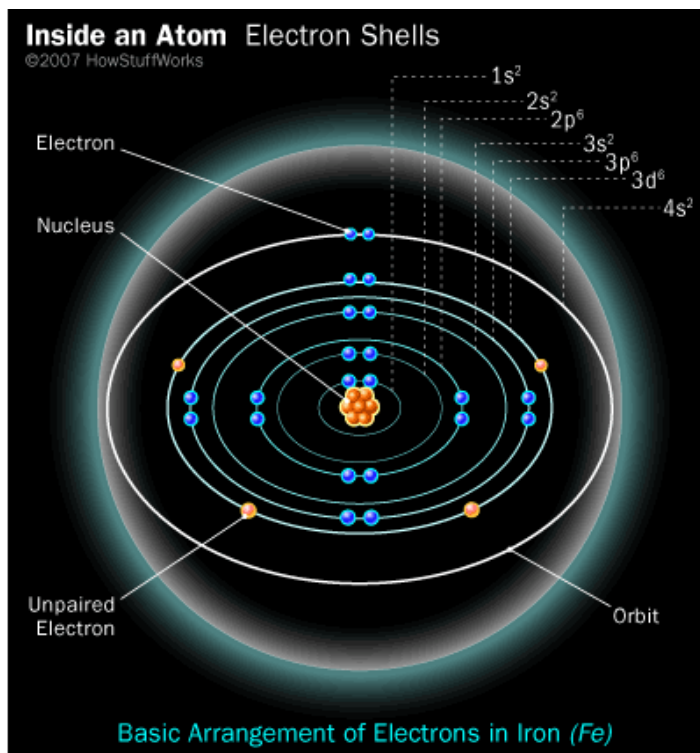
I ikke magnetiske materialer, er atomernes spin ikke ens-organiserede, dvs. de hver især udgør en meget lille magnet, men samlet vil de udbalancere – eller ophæve hinanden. Så udadtil er materialet ikke en magnet.





I jern kan de kredsende elektroner arrangere sig således, at de tilhørende magnetfelter ikke ophæver hinanden.

<http://science.howstuffworks.com/magnet3.htm>



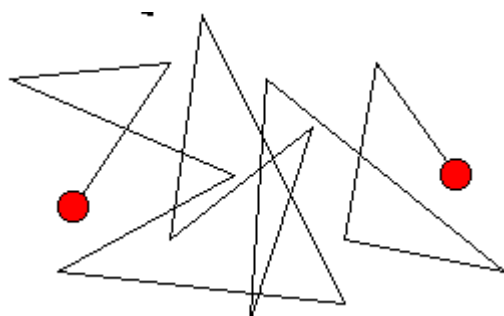
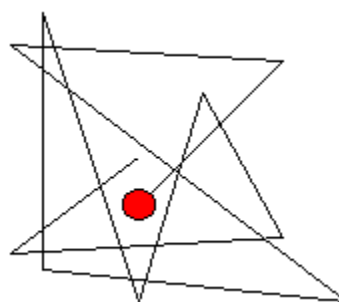
I en permanent magnet er flere atomers spin organiseret i samme retning. Dvs. de ikke ophæver hinanden, og udadtil udgør en magnet.

Elektroners bevægelse i en leder:

Skitsen her viser elektroners termiske bevægelse i en leder uden at der er påtrykt en spænding. Elektronerne vil vandre "forvirret" rundt.

Hastigheden ved rumtemperatur er

ca. 10^5 [cm/s]



Påtrykkes en spænding, vil elektronerne bevæge sig lidt i den retning, der er plus, fordi der er et elektrisk felt. !! (her er bare vist en af dem)

Kilde: <http://ece-www.colorado.edu/~bart/book/contents.htm>

(typical drift speeds in copper being of the order of 10^{-4} m/s compared to the speed of random electron motion of 10^5 m/s)

http://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Electron_mobility.html



Magnetfelt om en leder

Når der løber strøm i en leder, vil lederen være omgivet af et magnetfelt.
(Hvorfor det er sådan, er der ingen ved det, sådan er det!!)

SELF-INDUCTANCE

Even a perfectly straight length of conductor has some inductance. Current in a conductor produces a magnetic field surrounding the conductor. When the current changes, the magnetic field changes. This causes relative motion between the magnetic field and the conductor, and an electromotive force (emf) is induced in the conductor. This emf is called a SELF-INDUCED EMF because it is induced in the conductor carrying the current. The emf produced by this moving magnetic field is also referred to as COUNTER ELECTROMOTIVE FORCE (cemf).

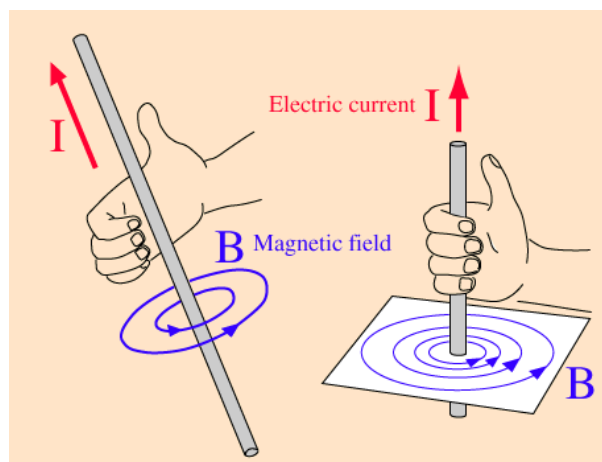
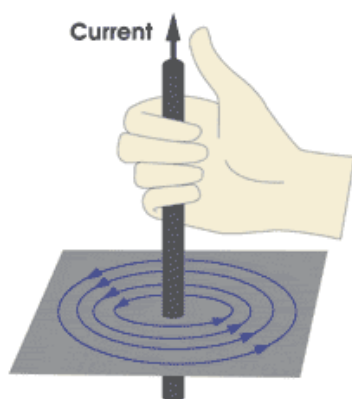
The polarity of the counter electromotive force is in the opposite direction to the applied voltage of the conductor. The overall effect will be to oppose a change in current magnitude.

Since all circuits have conductors in them, you can assume that all circuits have inductance. However, inductance has its greatest effect only when there is a change in current. Inductance does NOT oppose current, only a CHANGE in current. Where current is constantly changing as in an AC-circuit, inductance has more effect.

To increase the property of inductance, the conductor can be formed into a loop or coil, also called an inductor.

Højrehåndsreglen

For at huske magnetfeltets retning, kan højre hånd bruges, som vist på tegningen.



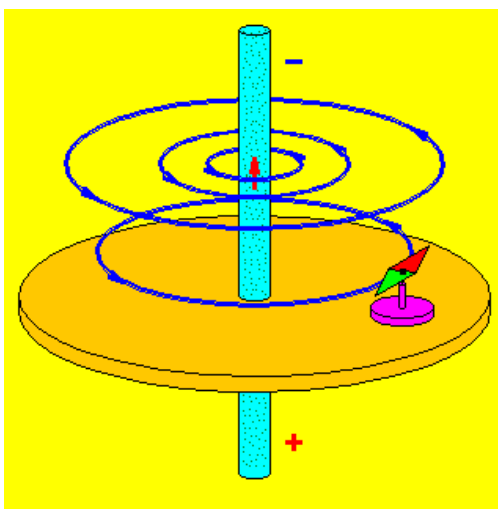
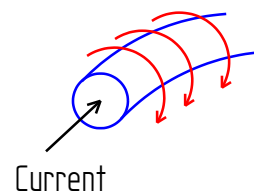


Magnetfeltet kan på en tegning illustreres med det, der kaldes ”magnetfelt-linjer”

Man har defineret, at feltet går højre om !!

Magnetfelt er altid lukket. ”Feltlinjerne” er altid lukkede.

Der findes ikke mono magneter, dvs. fx kun med en nordpol.



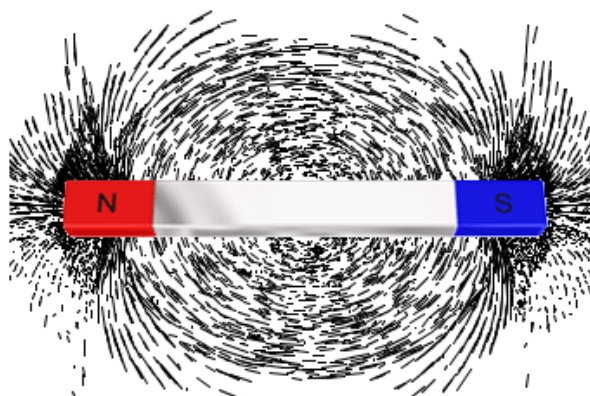
Feltets retning kan vises med en lille prøve-magnet-nål.

<http://www.walter-fendt.de/ph11e/mfwire.htm>

Men magnetfeltlinjer, **eksisterer ikke!!** De er blot en måde, at repræsentere et magnetfelt på. Ligesom højdekurver på et kort blot skal illustrere niveauforskelle i landskabet. De illustrerer noget, men eksisterer ikke i den virkelige verden.

Jernfilspåner

Men hvad viser så egentlig de billeder, der kan laves i fysik, hvis man drysser jernspåner på en magnet?



Jernspåner på et stykke plast viser magnetfeltet om en strømførende leder.

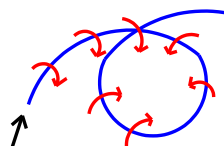


Forklaring:

Forklaringen bygger på, at jern leder magnetfelt meget bedre end luft. Derfor vil den første spån, der lander i feltet, virke nogenlunde som en tragt, der samler feltet omkring spånen. Feltstyrken i forlængelse af spånen vil derfor blive større, og den næste spån, der lander i nærheden, vil så lægge sig i forlængelse af den første. Derfor opstår det, der ser ud som feltlinjer.

Jordens magnetfelt er jo også homogent. Der er ikke forskel på, om et kompas flyttes lidt øst – vest.

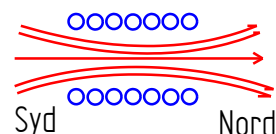
Wire viklet op som spole.



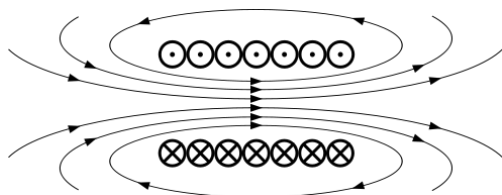
Vikles en wire op til en sløjfe, en spole, ses, at magnetfeltet vil gå ind i sløjfen.

Jo flere viklinger, jo ”mere” magnetfelt.

Magnetfeltet fra flere vindinger adderes, og udgør nu en elektromagnet.

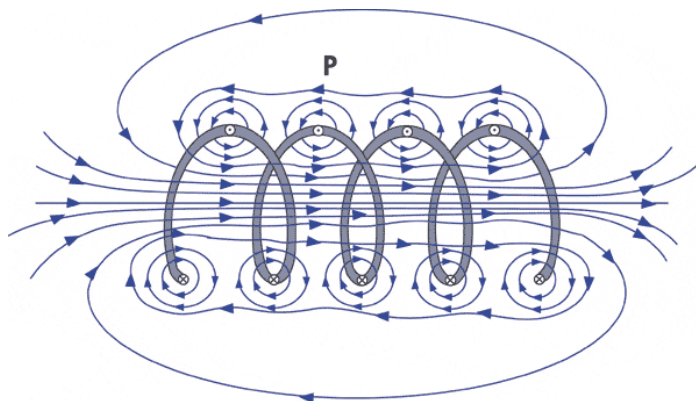


Husk, magnetfeltlinjer eksisterer ikke !! De er blot en måde at tegne, hvordan magnetfeltet udbreder sig. Jo tættere linjer, jo kraftigere felt.



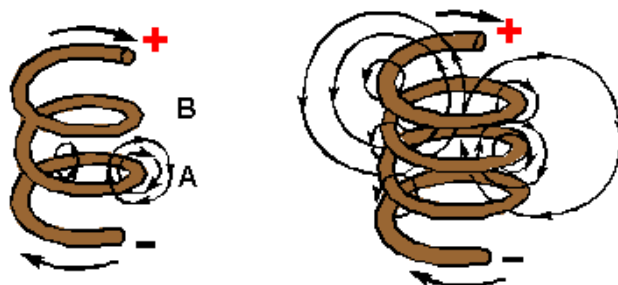
Prikkerne symboliserer pilespidserne i de pile, der viser strømmens retning-

Her ses magnetfeltet om hver leder i den viklede spole, - og det felt, der bliver samlet til en ”stang-magnet”.





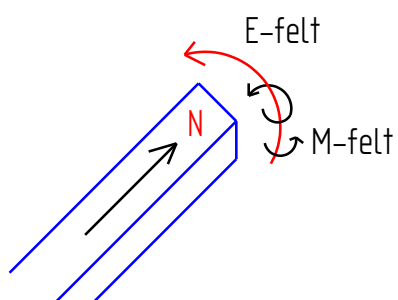
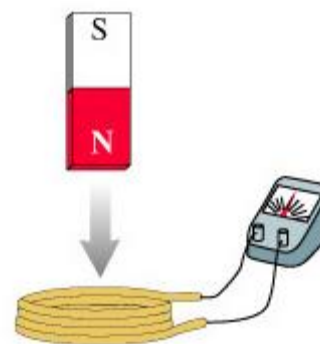
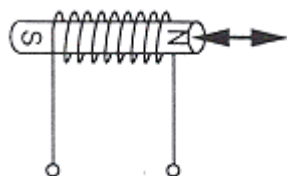
En anden illustration:



http://www.sayedsaad.com/fundamental/index_inductance.htm

Spolen som generator

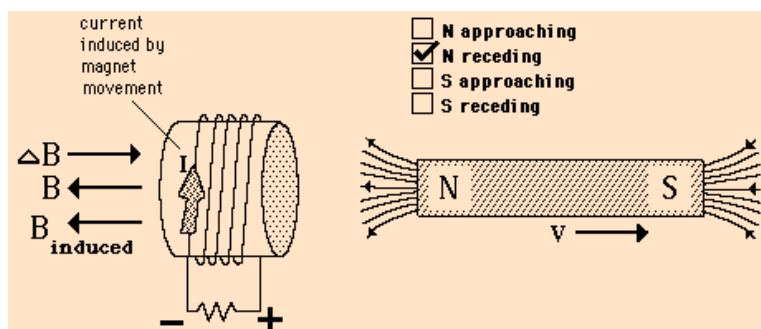
Når en magnet bevæges ind i en spole, vil spolen reagere ved at generere en spænding, der – hvis der kan – får en strøm til at løbe. Strømmen vil have en sådan retning, at magnetfeltet genereret af strømmen, vil modvirke magnetens ”tilnærmelse”.



Men når en magnet bevæges, ved den jo ikke, at der er en spole i nærheden. Derfor følgende påstand:

Når en magnet bevæges, genereres der i luften et elektrisk felt.

Hvis der i det genererede elektriske felt er en leder, vil der heri opstå en spænding. Og hvis der kan, vil der løbe en strøm.



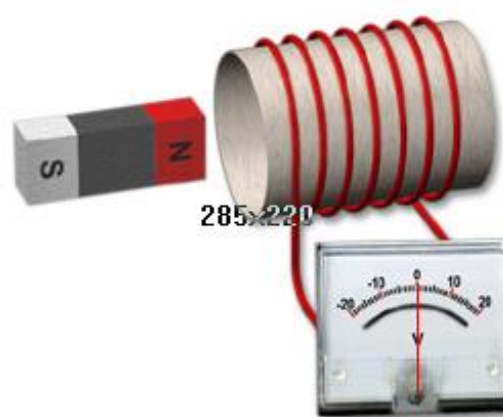
Spolen vil generere en spænding, der kan generere en strøm, der vil modvirke den magnetiske ændring.

Højtaler som mikrofon.

Bevæges magneten frem og tilbage i spolen, genererer det en spænding.

I en højtaler sidder spolen på højtalerpappet, og hvis man taler ind i højtaleren, vil pappet – og dermed spolen – bevæge sig (meget lidt) frem og tilbage i takt med lydets frekvens.

Dette kan udnyttes til fx at bygge et samtaleanlæg.



Spolens egenskab måles i Henry

En spoles størrelse, dvs. et mål for, hvor meget, den modsætter sig ændring i dens magnetfelt, kaldes dens selvinduktions-koefficient, og måles i Henry.

Størrelsen er afhængig af antal vindinger, afstanden mellem vindingerne, vindingernes form (er de viklet oven på hinanden – eller er der lavet et langt rør), vindingernes diameter, materialet i spolen, fx jern, osv.

En kondensators energiindhold er ”gemt” i ladningsadskillelse. En spoles energiindhold er gemt i magnetfeltet.

Strømmen vokser eksponentielt op mod slutværdien, bestemt af spolens kobber-modstand.

Det sker efter følgende formler.

i ved stigende strøm

Ampere [A]

$$i = I_{Final} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad \tau = L/R$$



i ved aftagende strøm

Ampere [A]

$$i = I_{Start} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \tau = L/R$$

X_L Induktiv modstand ved

Sinus - spænding

Reactance

X_L

Ohm [Ω]

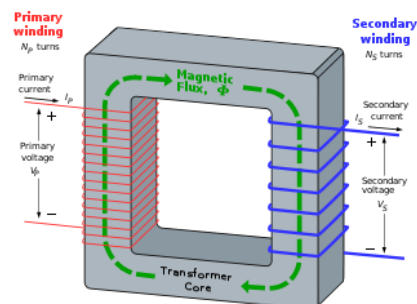
$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

L er et udtryk for hvor ” Stor ” spolen er. Hvor mange vindinger, hvor meget jern, der er i den – osv.

Transformere.

Spoler bruges bl.a. til at transformere en vekselspænding, enten op eller ned i spænding.

Den primære spole genererer et magnetfelt. I jern er der mindre modstand mod magnetfelt end i luften. Derfor ledes magnetfeltet rundt i ”jern-kredsen”. I luften omkring jern-kernen er der et elektrisk felt. Hvis der placeres en leder i dette elektriske felt, skabes en spænding i lederen. Og hvis der kan, vil der løbe en strøm.



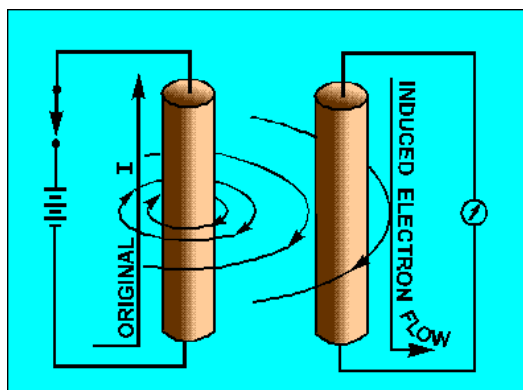
Kilde: <http://en.wikipedia.org/wiki/Transformer>

Nogle betragtninger vedrørende magnetfelter og spoler.

Et lyn er en pludselig opstået – ret stor strøm. Og den dør tilsvarende hurtigt ud!

Omkring en leder med strøm, er der et magnetfelt.

Magnetfeltet kan måles på afstand, efter et stykke tid, svarende til lysets hastighed.

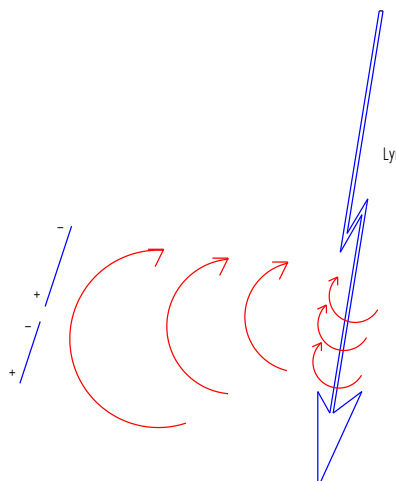




Et lyn transporterer en ladning, dvs. der går en strøm.
Omkring en strøm, er der et magnetfelt. Magnetfeltet bre-
der sig ud med lysets hastighed.

En leder er jo blot en del af en spole, dvs. at et ændret
magnetfelt vil generere en spænding i lederen.

Men ud fra, at et varierende magnetfelt vil generere en
spænding, (og omvendt, - Maxwell's ligninger) vil der
vinkelret på det "changing" magnetfelt genereres en
spænding. En spænding generes i luften. Er der en leder i
det elektriske felt, vil der opstå spændinger i lederen, og
hvis der kan, vil der gå en strøm.



I skitsen til højre, vil der springe en gnist mellem de to adskilte ledere.

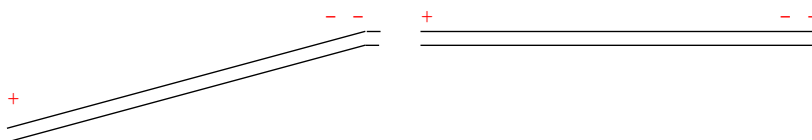
Spændingen i lederen vil have en sådan retning, at magnetfeltet
omkring lederen ville modvirke den påtrykte ændring i magnet-
felt.



To stumper tråd !!

Her ses på en lille stump af en tråd i en spole.

Det varierende magnetfelt – el-
ler den genererede E-felt, vil
skabe en spænding i de to le-
dere. Der vil kunne springe en
gnist i midten.



Magnetfelt skabt under lynnedslag

Et lyn består typisk af mange del-lyn, kaldet STROKES.



Billede af et lyn.

Der kommer typisk flere udladninger i samme lynkanal.



Et lyn, fotograferet med et kamera, der drejer vandret fra højre mod venstre.

Billedet viser mindst 7 individuelle strokes, der følger same lynkanal fra skyen mod jorden. De første strokes ses længst til højre..²

Et lyn kan bestå af et antal af individuelle lyn, strokes, der følger samme sti – eller kanal, - til jorden. Plasma i kanalen skabes igen og igen. De mørke intervaller imellem de enkelte strokes har typisk en varighed på ” tens of milliseconds”. Dette forklarer, hvorfor det menneskelige øje opfatter lyn som blinkende, “flickering”.

Et lynnedslag består typisk af 3 til 4 strokes, men der er observeret lyn med fra 1 til 26 strokes.

Dvs. pludselige, gentagne store strømme, der hver især kan være på 100 til 200 K-Ampere skaber et voldsomt, flere gange gentagende magnetfelt. Et magnetfelt, som vil påvirke ledere, og inducere spændinger.

Gnistafstand:

Gnistafstanden i luft er ca. 3 MV/m. eller 3-4 kilovolt/cm. ³

² http://www.plasmacoalition.org/plasma_writeups/lightning.pdf

³ <http://cfs.nrcan.gc.ca/index/lightning-faq/5>



Strømmens opvoksning i en spole

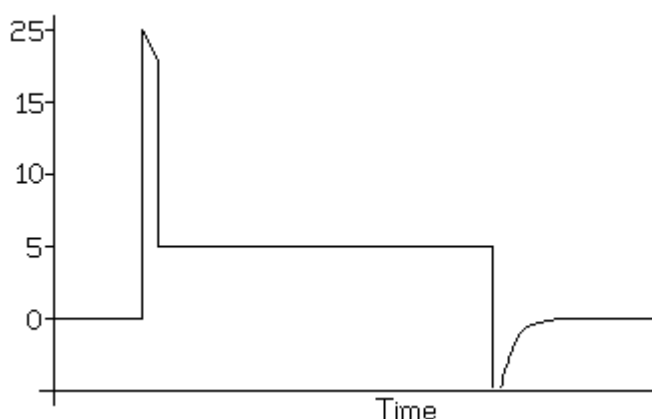
**Strømmen i Spoler opfører sig som en bil I bevægelse.
Man kan ikke momentant få den op i fart.
Og man kan heller ikke momentant stoppe bevægelsen.**

Nogle gange ønskes det, at strømmen i en spole kan bringes til at stige hurtigere end den normalt gør.

Det kan man opnå ved at påtrykke en højere spænding. Men der opstår desværre det problem, at strømme herved også vil stige til mere, end spolen er beregnet til, og der afsættes derfor for meget varme.

Derfor har man fx i stepmotor-styringer udviklet kredsløb, der påtrykker en højere spænding i få mS, når en spole ønskes energiseret.

Her vist en graf over et kredsløb, der meget kortvarigt tilslutter en højere spænding, og derefter fortsætter med fx 12 V, eller her 5 Volt.

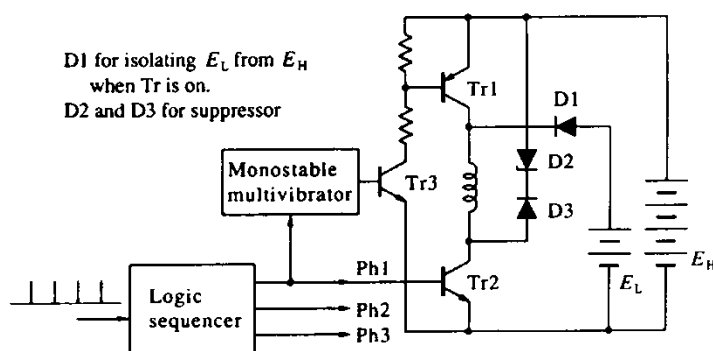


<http://www.cncinformation.com/stepper-motor-info/current-limiting-for-stepping-motors>

Dette er en skitse af et system, der kan bruges til hurtig strømrejsning.

I en kort periode tilføres spolen en højere spænding, indtil strømmen har nået den ratede værdi.

En stor spænding E_H anvendes ved indkobling af viklingen.

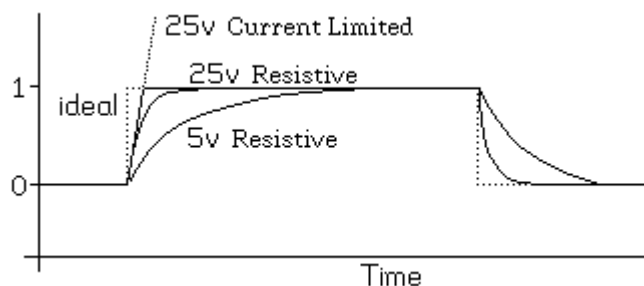


Improvement of current build-up by means of dual voltage drive.



Når en given værdi af strømmen er nået udkobles E_{High} og den lavere spænding E_{Low} tager over.

Koblingen anvendes sædvanligvis med en zenerdiodebeskyttelse



Graf, der viser strømmens opvoksen i en spole.

<http://www.cncinformation.com/stepper-motor-info/current-limiting-for-stepping-motors>

PWM af spole

Her er vist et eksempel på, hvordan man kan opnå hurtigere opvoksen af et magnetfelt i en spole.

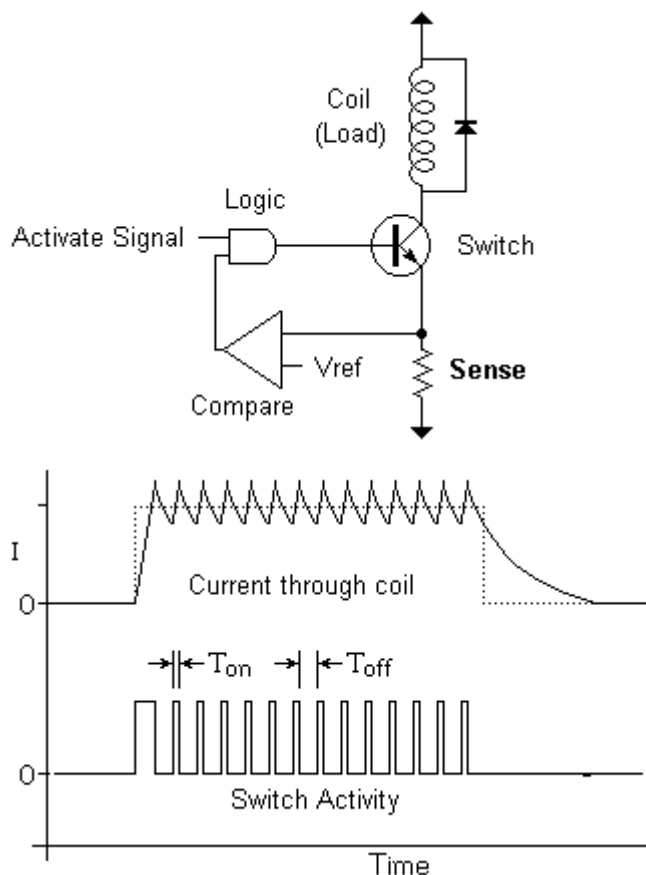
Den påtrykte spænding er større end spolen egentligt kan klare kontinuerligt.

Men vha. en lille modstand kan man få et feedback-signal for strømmen, - og når den er vokset op til nominal størrelse, switches

Strømmen off.

Herefter falder strømmen igen som vist på grafen, og strømmen kobles ind igen.

På nederste graf vises switchens aktivitet.



Kilde: <http://www.stepperworld.com/Tutorials/pgCurrentControl.htm>

Kollapsende magnetfelt.

Se video om friløbsdiode for et relæ: <http://afrotechmods.com/tutorials/2011/11/28/inductive-spiking-tutorial/>

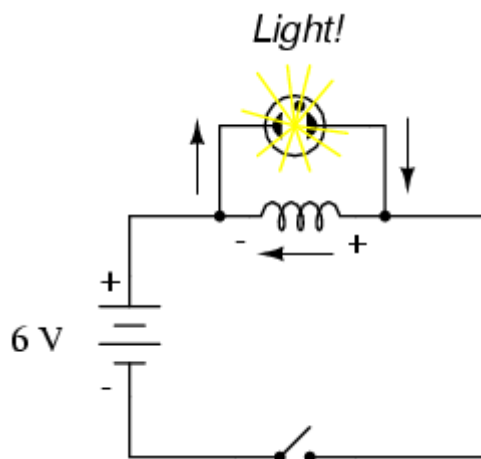


En strøm i en spole vokser ”langsomt” op til dens maksimale værdi, bestemt vha. Ohms lov. Det, der begrænser strømmen, er spole-trådens ohmske modstand.

Hvis ikke, der var modstand i spoletråden, ville strømmen stige mod uendelig.

Men hvis strømmen afbrydes, vil spolen forsøge – momentant- at få den til at fortsætte. Den vil generere en så tilstrækkelig høj spænding, så strømmen kan fortsætte.

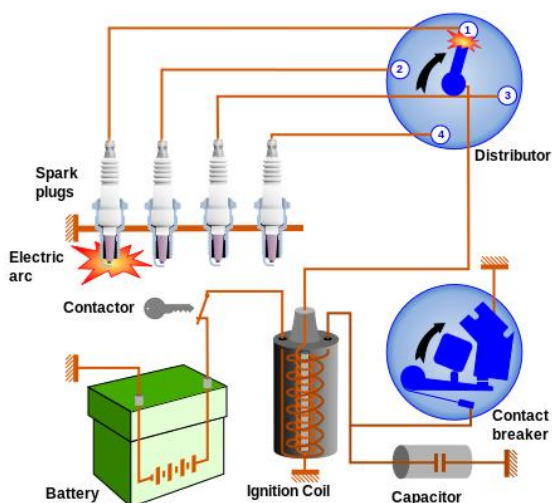
På illustrationen her, vil glimlampen lyse kortvarigt, når kontakten åbnes.



http://www.ibiblio.org/kuphaldt/electricCircuits/DC/DC_15.html

Tændingssystem i bil.

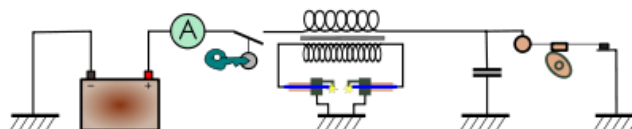
Det at strømmen ikke momentant kan stoppes, udnyttes i tændingssystemet i en bil.



http://en.wikipedia.org/wiki/Ignition_system

Her et andet billede af tændingssystemet i en bil.

Selve strømfordeleren til de 4 cylindre er ikke vist.

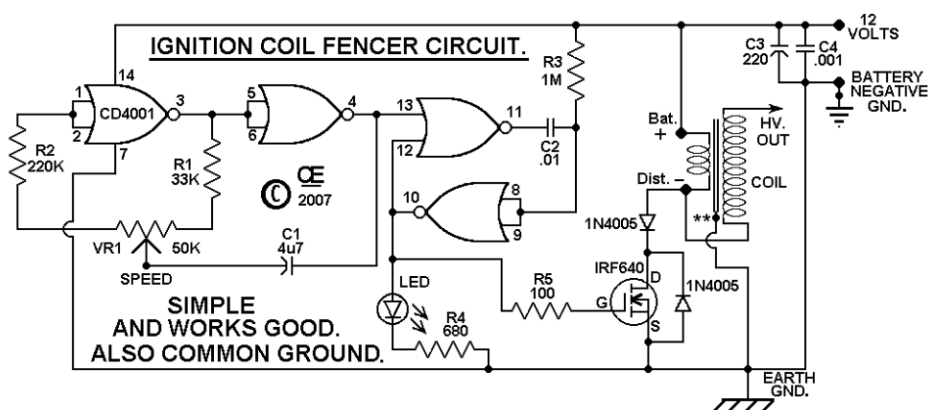


Når strømmen i den primære spole afbrydes, genererer sekundær-spølen så høj en spænding, at der springer en gnist.

http://en.wikipedia.org/wiki/Ignition_system

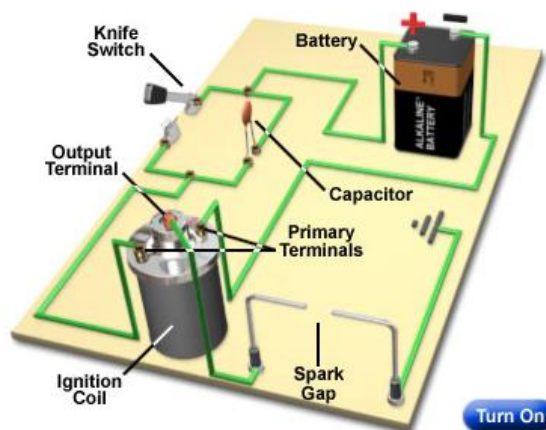


Se animation: <http://modelabasics.com/ignition.htm>



Her er et kredsløb, der virker som et elektrisk hegn.

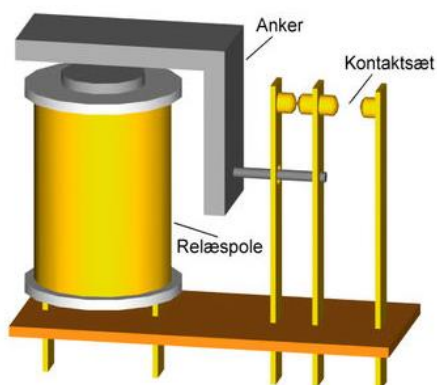
Se animation af gnist genereret når en kontakt åbnes.



<http://www.magnet.fsu.edu/education/tutorials/java/ignitioncoil/>

Animation af et tændingssystem: <http://www.youtube.com/watch?v=W94iksaQwUo>

Beskyttelsesdioder over et relæ:

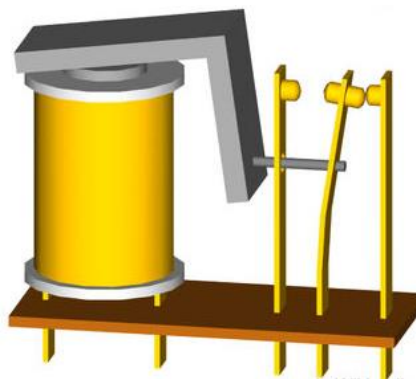


Et relæ bruges fx til at switche stærkstrøm, styret af svagstrøms-elektronik.



Når spolen energiseres, trækkes ankeret ned, og skifter kontakten.

Et relæ kan fx bruges til at tænde 230 V med elektronik.

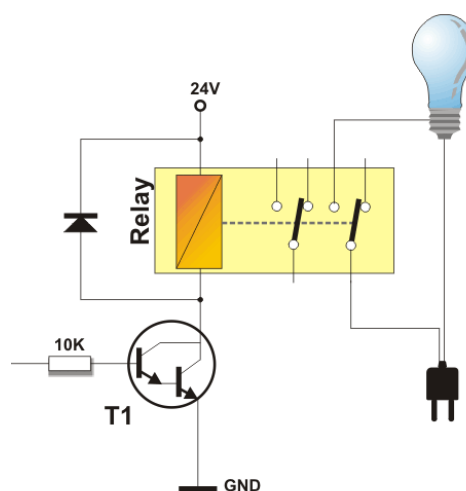


<http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Rel%C3%A63.jpg>

Når transistoren afbryder strømmen, vil det op-hobede magnetfelt-energi bevirke, at spolen tvinger strømmen til at fortsætte.

Derfor sættes altid en diode over spolen, så strømmen, kan løbe tilbage og ned til forsyningsspændingen. (her 24 Volt).

Dvs. der kun genereres en transient spænding på transistorens Collector på 24 Volt + 0,7 Volt – altså 24,7 Volt.



Energien fra magnetfeltet bliver derfor afsat som varme i diode og spolens viklinger.

Det bevirker en lille forsinkelsestid i magnetfeltets kollaps, - og altså lille forsinkelsestid i relæets frafald- indtil energien i magnetfeltet er brugt.

Det fænomen, at en spole genererer en spænding, tilstrækkelig til at få strømmen til at fortsætte momentant, er man nødt til at tage højde for, når elektronik ”blandes” med spoler.

Som fx hvis elektronik skal styre et relæ, eller en motor.

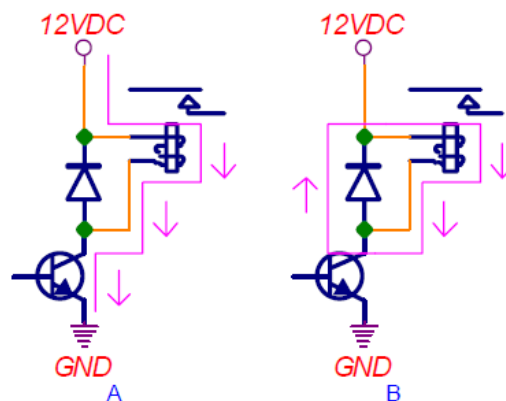
Undlades dioden, ødelægges elektronikken – måske ikke momentant, men så på sigt!



Når spolen i relæet energiseres, stiger strømmen asymptotisk mod en værdi, begrænset af spolens trådmodstand.

Når transistoren afbryder strømmen, skal strømmen i spolen kunne fortsætte. Derfor er der sat en diode over spolen op til plus.

Herved vil den opmagasinerede energi i spolens magnetfelt, og dermed strøm kunne løbe rundt, og den mister herved dens energi som varme i ledningernes og spolens ohmske modstand.



<http://www.physics.unlv.edu/~bill/PHYS483/relay.pdf>

Dioden kaldes en beskyttelses-diode, på engelsk en Flyback diode, eller freewheel diode, snubber diode, suppressor diode, eller catch diode

Hurtigere strømfald.

Nogle gange, fx i stepmotorer, ønskes at spole-energien dør ud ret hurtigt.

Jo længere tid det tager, jo mere vil en stepmotor blive bremset af det stadigvæk eksisterende magnetfelt i en spole, indtil energien er afsat som varme.

Typisk vil man montere en diode fra switch-transistorens collector over spolen til plus for at undgå en høj udkoblingstransient.

Men det er en ret ”langsom” metode. Det meste af energien afsættes i viklingen i spolen, og ikke ret meget i den eksterne diode.

En simpel metode, men en ulempe er, at strømmen løber i en ”lang” periode og producerer en bremsende effekt på motoren.

Men sættes en **zenerdiode** eller en **modstand** i serie med friløbsdioden, vil en større del af energien afsættes udenfor spolen, og derved vil magnetfeltet hurtigt blive mindre.

Man opnår herved, at modstanden rundt i afladekredsen bliver større. Herved bruges energien i spolen hurtigere, og feltet kollapse hurtigere.

Men det er vigtigt at undgå, at den så større spænding, spolen vil generere, ikke bliver så stor, at den kan ødelægge elektronikken.

De to muligheder beskrives her:

Diode og seriemodstand op til plus:



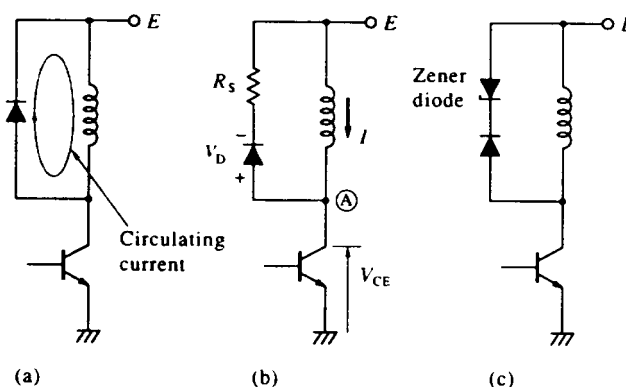
Diode / Resistor suppressor. Strømmen ændres hurtigere. Energien afsættes i viklingen og den ydre modstand. Kollektorspændingen bliver større idet $\Delta U_R + U_D$ adderes til U_{CC} . Dette skal den valgte transistor kunne klare. $\Delta U_{CE} = U_{CC} + I \cdot R + U_{Diode}$

Diode i serie med Zenerdiode ned mod dioden:

Zenerdioden skal have relativ stor V_Z . Der fås en relativ hurtig ændring af strømmen, men der må sikres en effektiv køling af zenerdioden.

$\Delta U_{CE} = U_{CC} + U_Z + U_{Diode}$ Zenerdioden kan være fælles for alle 4 spoler. Som i 2) skal transistoren kunne klare den høje spænding der genereres.

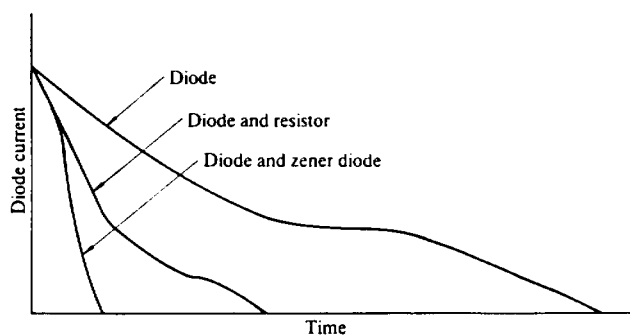
Her er de 3 muligheder vist



Suppressor circuits. (a) Diode suppressor, (b) diode-resistor suppressor, and (c) Zener diode suppressor.

Her ses en graf hvor de forskellige suppressor metoder sammenlignes.

Det ses tydeligt, at sidste metode giver hurtigste strømfald.



Comparison of effects of various suppressor schemes.

Analogier



Deformationszoner i tog, og i biler. Volvo. Det gælder om, ved evt. kollisioner, at få farten taget "langsomt" af, for at personer i kabinen ikke skal opleve en for voldsom acceleration. Snuden i biler er konstrueret til at krølle sammen, så kabinen med passagerer bremses langsommere ned.

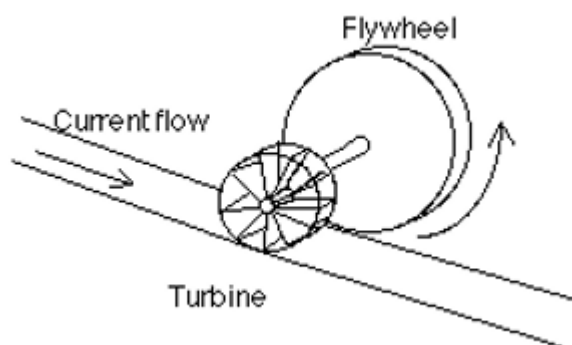
Man kan ikke momentant få en Kadet op i fart.

Hvis man vil stoppe en bil, der er i fart, må man skubbe imod bilen med en større kraft, jo kortere vej, man vil stoppe bilen over.

Man kan rykke et stykke toiletpapir af en rulle, uden at trække hele rullen ud. Man skal bare gøre det hurtigt.

System analogier

Energi ophobes i den roterende masse:



http://www.dartmouth.edu/~sullivan/22files/System_analogy_all.pdf

Altså:

Når en strøm i en spole afbrydes, genererer spolen en spænding stor nok til, at strømmen momentant kan fortsætte.

Dette udnyttes i el-hegn til at indhegne dyr, - og til tændingssystemer i biler osv. Og i switch mode powersupply.

Bruger man spoler i elektroniske kredsløb, er man nødt til at tage højde for dette fænomen. Det gælder om at lave kredsløbet sådan, at man får afledt energien i spolen, uden at der genereres så høje spændinger, at det ødelægger elektronikken.

Strømmen bliver til varme i modstande og kobbertråd.

En almindelig leder virker som en induktion. (spolevirkning)

Selv en printbane er en lille induktion, og en modstand.



Man kan ikke momentan ændre strømmen i en spole.

Energien i en energiseret spoles magnetfelt. $E_1 = \frac{1}{2} L I^2$

En masse modsætter sig en bevægelsesændring, såvel hastighed som retning. Tilsvarende magnetfeltet i en spole. Energien ophobet i magnetfeltet kan jo ikke blot forsvinde.

Links til kalkulatorer:

Wire induktans kalkulator <http://www.consultrsr.com/resources/eis/induct5.htm>

Wire calculator: http://www.technick.net/public/code/cp_dpage.php?aiocp_dp=util_inductance_calculator

Spole kalkulatorer: <http://www.pronine.ca/multind.htm> http://www.mantaro.com/resources/impedance_calculator.htm

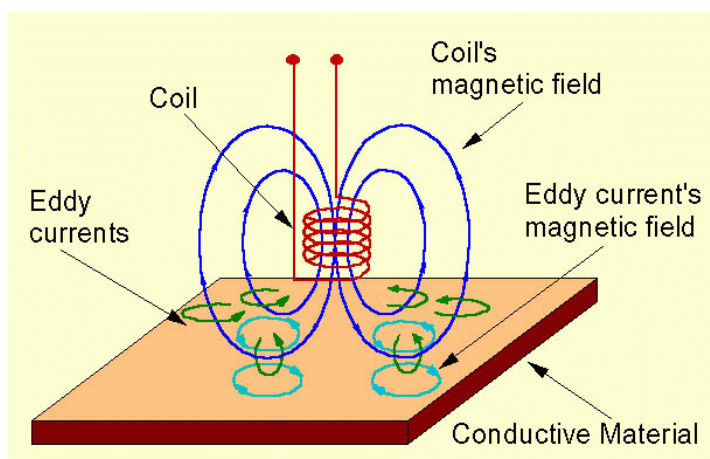
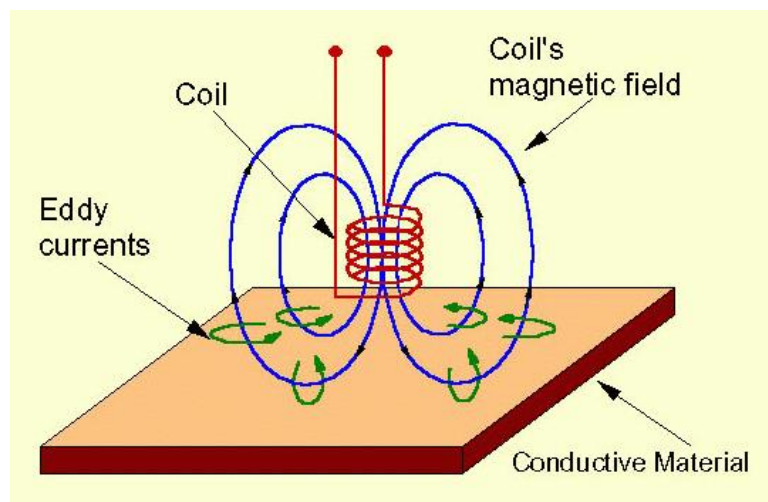
<http://emclab.mst.edu/inductance/index.html>



Bonus Info:

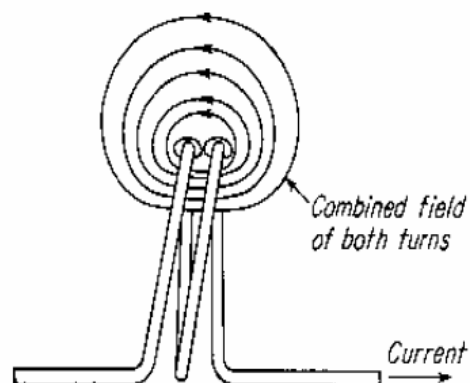
Et vekslende magnetfelt vil inducere strømme i et ledende materiale, fx jernet i en transformer.

Disse strømme kaldes hvirvelstrømme, eller på engelsk: Eddy Currents.



Men rundt om disse inducerede strømme, vil der være magnetfelter!

<http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Physics/mutualinductance.htm>



http://arcarc.xmission.com/PDF_Electronics/Inductance%20%20&%20%20XL.pdf