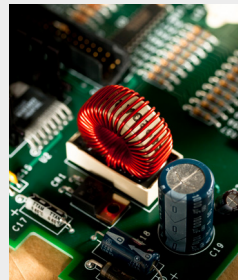


Kapitel 7 - Det magnetiska fältet och spolen

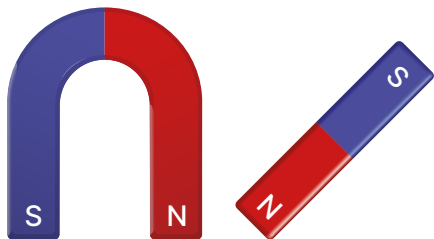
Magnetism och magnetfält

I det här kapitlet får du lära dig om magnetism och att den elektriska strömmen alltid omges av ett magnetiskt fält. Hur detta sedan utnyttjas i den elektriska motorn och generatoren samt i komponenter som t.ex. spolen, reläet och högtalaren. Nya begrepp är magnetiskt fält, flödestäthet, fältstyrka, permeabilitet, högerhandsregel, induktionslagen, självinduktion, induktans och resonans.



Magnetism

Magnetism är förmågan hos ett magnetiskt material att attrahera eller stöta bort en annan magnetisk kropp. Exempel på magnetiska material är järn, nickel och kobolt. Det finns även elektromagnetism, som uppstår när ström flyter genom en ledare. Den magnetiska kraften sträcker sig utanför magneten och vi benämner det här kraftfältet kort och gott för ett magnetiskt fält. Material som har inbyggd magnetism kallas permanentmagneter. Permanent = beständig. En kompassnål är en liten permanentmagnet med nord- och sydände. När kompassnålen svänger fritt kommer den att rikta in sig i det omgivande magnetfältet, den gör det i nord-sydlig riktning. Jorden är ett exempel på en magnetisk dipol som omger sig med ett magnetfält. Riktningen hos ett magnetfält kan avgöras med en kompassnål. Kompassnålen kommer att visa riktningen hos vilket som helst magnetfält, det behöver inte vara just jordens magnetfält.



Figur 7.1

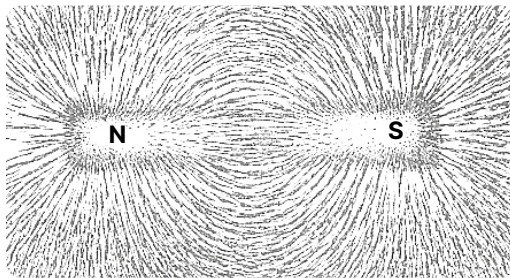
Permanentmagneter,
hästskomagnet och stavmagnet

Magnetism innehåller energi

Med hjälp av en permanentmagnet kan vi dra till oss föremål. Vi känner igen energi genom "förmågan att sätta i rörelse". Eftersom magneten kan flytta föremål utan fysisk kontakt kan vi dra slutsatsen att magnetism även innehåller energi, magnetfältet är ett energifält. En permanentmagnet är en magnetisk dipol (tvåpol) med en nord- och en sydände. Hos permanentmagneter för utbildningsändamål färgas nordändan röd och sydändan vit eller blå. Kompassnålen färgas också på samma sätt.

Magnetfältets kraftlinjer

En magnet har två poler, en nord- och sydände. Mellan polerna utgår ett kraftfält. Om man lägger en magnet under ett papper och strör järnfilspån ovanpå, ser man att järnfilspånen rättar in sig i ett linjerat mönster runt magneten.

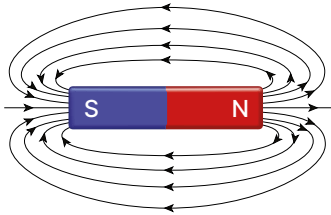


Figur 7.2

Magnetfält runt en stavmagnet

Man kan då se de magnetiska kraftlinjerna som är slutna och går från pol till till pol. Det magnetiska

kraftlinjerna löper alltid i slutna banor som startar och slutar i samma punkt. De kan inte korsas eller gå in i varandra. Järnfilspånen påverkas av magnetfältet genom influens från magneten. Järnfilspånen blir till små magneter som hakar fast i varandra i ett linjemönster. Magnetfältet är i verkligheten kontinuerligt dvs. finns i varje punkt runt magneten. Man illustrerar magnetfältet med fältlinjer.

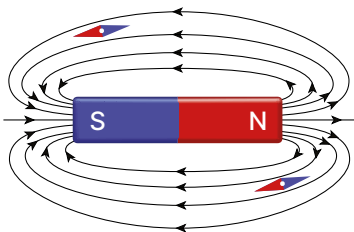

Figur 7.3

Permanentmagneter illustrerade med fältlinjer

På liknade sätt som man gör med det elektriska fältet. Till skillnad från det elektriska fältet vars kraftlinjer går från pluspol till minuspol, är de magnetiska fältlinjerna slutna kurvor.

Magnetfältets riktning och poler

Om man placerar en kompassnål, i ett magnetfält kommer nålen att följa linjerna runt magneten. Nålens nordpol riktas längs med fältlinjen mot magnetens sydpol.


Figur 7.4

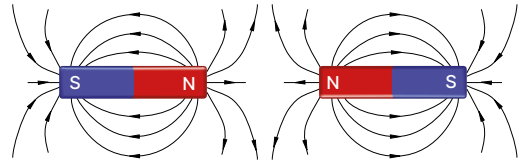
Magnetfältets riktning är från nord- till sydpol

Figur 7.4 visar att en magnet, precis som en elektrisk strömkälla har två poler. Magnetfältets poler är nord och syd och man har bestämt att riktningen på fältlinjerna är från nord- till sydpol.

Magnetfält i kollision och samverkan

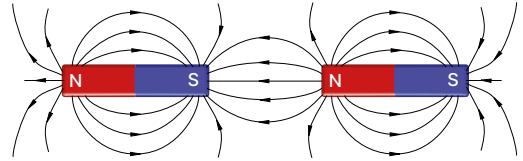
Olika poler attraherar medan lika poler repellerar varandra. När man tittar på kraftlinjernas riktning blir detta lättare att förstå. När två lika

poler placeras nära varandra är kraftlinjerna riktade mot varandra och magneterna stöter bort varandra, repellerar.


Figur 7.5

Lika poler repellerar

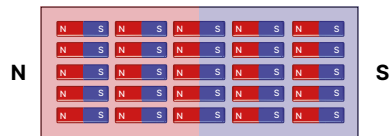
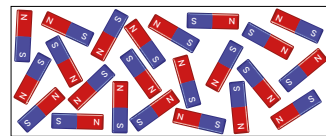
Om istället två motsatta poler placeras nära varandra sammanfaller fältlinjernas kraftriktning, krafterna samverkar och magneterna dras till varandra, attraherar. Magnetfältets styrka beror på hur stark magneten är samt avståndet mellan magnetens poler.


Figur 7.6

Olika poler attraherar

Elementarmagnet

Om man delar upp en magnet i mindre bitar får man fler små magneter. Till sist kan man inte dela mer, då har man en elementarmagnet med storlek på atomnivå.

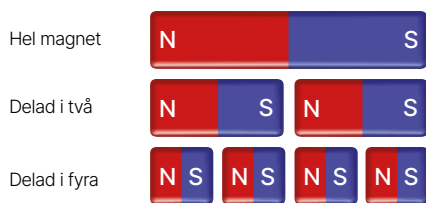

Figur 7.7

Ordnade elementarmagneter blir neutrala (omagnetiskt material). Ordnade blir materialet magnetiskt.

Det är viktigt att notera att magnetism på atomnivå är komplext och involverar kvantmekaniska fenomen. Begreppet "elementarmagnet" är en förenkling för att underlätta förståelsen av mag-

Kapitel 7 - Det magnetiska fältet och spolen

netism på en grundläggande nivå. I verkligheten är magnetismen i ett material en effekt av många atomers elektroner och deras magnetiska dipoler som samverkar.



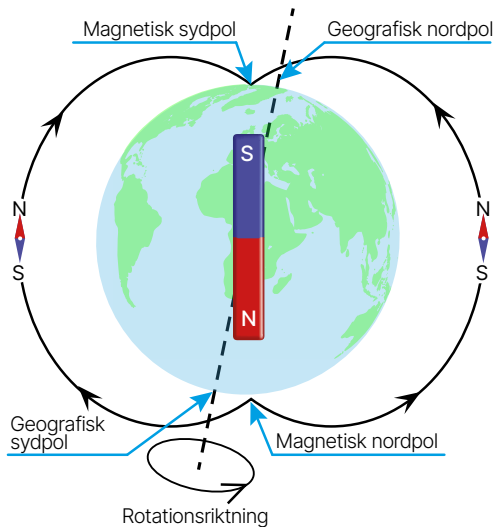
Figur 7.8

Uppdelning av en magnet ger fler mindre magneter.

Om man sågar upp en magnet i mindre bitar får man nya magneter med nord- och sydpol.

Jordens magnetfält

Jordens geografiska poler utgår ifrån den tänkta jordaxeln som jorden roterar kring. Det magnetfält som omger jorden utgår dock inte från de geografiska polerna, utan utgår från jordens magnetiska nord- och sydpol.



Figur 7.9

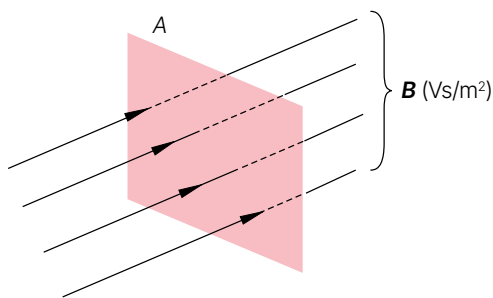
Jordens magnetiska sydpol utgår från norr

Jordens magnetfält helt inte helt stabilt utan förflyttar sig hela tiden. Avvikelsen mellan de geografiska och magnetiska polerna är ca 10°. Man har bestämt att nordändan på en magnetnål är den ände som riktar sig mot jordens nordpol. Alltså är jordens magnetiska poler inte det man

använder i vardagligt tal utan tvärt om. Från jordens geografiska nordsida utgår dess magnetiska sydpol och vice versa.

Magnetisk flöde – Weber

En. magnetic flux. Det vi ritar som kraftlinjer motsvaras av det magnetiska flödet. Styrkan hos det magnetiska flödet illustreras med fler och tätare kraftlinjer. Magnetiskt flöde betecknas med den grekiska bokstaven Φ (fi) och anges med SI-enheten Weber (Wb). Magnetiskt flöde Φ har såväl storlek som riktning och är alltså en vektorstorhet. Weber definieras som voltsekund (Vs). Det gäller att 1 Wb = 1 Vs.



Figur 7.10

Magnetiskt flödet genom en areaenhet är den magnetiska flödestätheten (B -fältet)

Magnetisk flödestäthet – Tesla

En. magnetic flux density. Det magnetiska flödet är ojämnt fördelat runt en magnetkälla. Därför använder man begreppet flödestäthet som anger hur kraftigt magnetfältet är på en viss plats/yta. Magnetiskt flödestäthet betecknas med bokstaven B och anges med SI-enheten Tesla (T). Flödestäthet kallas även för B -fältet och är det vanligaste sättet att ange styrkan hos ett magnetfält. Styrkan på magnetflödet gäller för en given areaenhet (A). Namnet flödestäthet kommer av att ju fler (tätare) de magnetiska fältlinjerna är som skär genom ytan A , desto större blir flödestätheten. Beräknas som:

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

Det ger enheten Wb/m² (flödet per m²) som är samma sak som Tesla (T). Arean (A) är den yta som flödet genomströmmar. Flödestätheten B har såväl storlek som riktning och är en vektor-

storhet som pekar i samma riktning som fältlinjerna.

$$1 \text{ Vs/m}^2 = 1 \text{ Wb/m}^2 = 1 \text{ T (Tesla)}$$

1 tesla är ett mycket högt värde varför man ofta ser flödestätheten angiven i mT, μT eller nT.

Enheten gauss (G) användas ofta i USA.

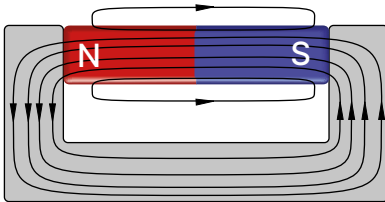
1 tesla = 10 000 gauss och 1 gauss = 0,1 mT.

Gauss är inte en SI-enhet.

Läs om härledning av enheten för flödestäthet i fördjupningen i slutet av kapitlet.

Permeabilitet

Olika material leder det magnetiska flödet olika bra. Luft leder magnetisk flöde dåligt i jämförelse med till exempel järn. Det magnetiska flödet väljer det minsta motståndets väg.



Figur 7.11

Magnetflödet kan ledas genom järn

Genom att omge en stavmagnet med ett U-format järn, kan man leda magnetflödet. Betydligt mindre mängd av magnetflödet kommer nu färdas genom luften då järn är en betydligt bättre ledare av magnetflöde än luft. Jämför med stavmagneten i **figur 7.3** där flödet når långt utanför magneten. Ett annat sätt att förstå är att permeabilitet är ett materials förmåga att bli magnetiserat när det utsätts för ett yttre magnetfält. Permeabiliteten betecknas med bokstaven μ (my). Lite rörigt kan tyckas med tanke på att μ även används som enhetsprefix i SI-systemet, men så är det bara.

Utgångsvärdet är permeabiliteten i tomrum (vakuum) som är en konstant och betecknas μ_0 .

Det gäller att $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$.

För olika material gäller en korrigeringsfaktor. Med korrigeringsfaktorn multiplicerar man med μ_0 för att få fram materialets permeabilitet μ . Korrigeringsfaktorn anges som den relativa permeabiliteten μ_r , och i tabeller som materialets permeabilitetsstal. Luft har ungefär samma permeabilitet som vakuum ($\mu_r = 1$) medan hos mag-

netiskt ledande material (ferromagnetiska) är $\mu_r = 50$ till 800 000 ggr. Beräkning av permeabilitet:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

Ju högre den relativa permeabiliteten är hos ett material desto mer förstärks det magnetiska fältet. Om ett ämnes μ_r är större än ett, förstärks magnetfältet och omvänt om det är mindre än ett, försvagas magnetfältet. Permeabilitet är en mycket viktig egenskap hos magnetiska material. Den påverkar inte bara det magnetiska flödet, utan även hur mycket energi magnetfältet kan innehålla m.m. Permeabiliteten μ finns med som en faktor i många formler för beräkning av magnetiska kretsar.

Permeabilitetsstal (μ_r) för olika material	
Luft	1,00000037
Aluminium (Al)	1,000022
Gjutjärn (Fe, C)	50-700
Järn (Fe)	250-5300
Ferrit (Fe_2O_4 , Mn, Zn)	125-5000
Permalloy (Ni, Fe)	10 000 - 100 000
Mymetall (Ni, Fe, Cu, Cr)	20 000 - 100 000
Supermalloy (Ni, Fe, Mo, Mn)	100 000 - 800 000

Reluktans, magnetiskt motstånd

Motståndet som det magnetiska flödet möter i ett material kallas för reluktans. Precis som ett motstånd i en elektrisk krets finns det ett motstånd i en magnetisk krets. Motståndet i en elektrisk krets gör att den elektriska energin blir till värme medan motståndet i en magnetisk krets lagrar den magnetiska energin. Reluktans kan sägas vara motsatsen till permeabilitet.

Reluktans betecknas med R_m och har enheten A/Wb (ampere per weber) eller At/Vs (ampere-varv/voltsekund). Ju högre reluktans ett material har, desto svårare är det att få materialet att magnetisera, och omvänt ju lägre reluktans ett material har desto bättre ledande är det för magnetiskt flöde. Reluktansen i järn är således mycket låg jämfört med luft. Reluktans är en materialegenskap som motverkar skapandet av magnetiskt flöde i en magnetisk krets.

Magnetism och elektrisk ström

Man trodde länge att magnetism och elektricitet var två helt olika fenomen, men 1820 upptäckte den danske fysikern H C Ørsted att en strömförande ledare omger sig med ett magnetisk fält.

Det finns bara en sorts magnetism

Magnetism från elektrisk ström och magnetism från en permanentmagnet är samma fenomen. Förklaringen är att magnetism liksom den elektriska strömmen är kopplad till elektronens rörelser. Det magnetiska kraftfältet uppstår nämligen runt laddningar i rörelse.

Magnetism från en permanentmagnet

Utan elektrisk ström tar normalt alla elektroners rörelser ut varandra, såväl inom atomerna som i materialet som helhet. Men i ferromagnetiska material, som järn, kobolt och nickel finns det en obalans i fråga om elektronernas sätt att röra sig runt sina atomer (Läs mer om magnetismens orsak och elektronens spinn i fördjupningen).

Elektronernas rörelse tar inte ut varandra inom ramen för varje enskild atom utan varje atom är i praktiken en liten magnet. Atomerna bildar små områden (domäner) inom vilka de magnetiska krafterna riktar sig åt samma håll. I ett omagnetiserat ämne ligger domänerna i alla möjliga riktningar varför de magnetiska krafterna tar ut varandra (ämnet blir omagnetiskt).

Om ett ferromagnetiskt material utsätts för ett yttre magnetfält blir det annorlunda. Då riktar domänerna in sig i fältets riktning precis som järnfilspånen som släpps över ett magnetfält. När det yttre magnetfältet sedan tas bort kvarstår riktningen hos domänerna, detta kallas för remanens. Vi har fått en liten permanentmagnet efter som att många domäner behåller sin riktning i det nu magnetiserade materialet.

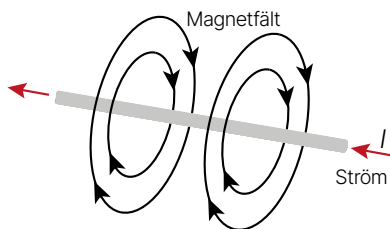
Ström ger magnetfält

Magnetism är ett fenomen som uppstår på grund av rörelsen av laddade partiklar, särskilt elektroner. Elektroner har inte bara en elektrisk laddning utan också en egenskap som kallas "spinn". Spinn kan betraktas som en sorts inbyggd rotation runt elektronens egna axel. Elektronens spinn genererar ett magnetiskt moment, vilket innebär att

elektronen fungerar som en liten magnet. Efter som elektronerna alltid är i rörelse omger de sig alltid med ett magnetfält, men så länge de rör sig slumpmässigt blir summan av magnetfältet noll. När elektrisk ström går genom en ledare samordnas elektronernas rörelse och därmed även deras tillhörande magnetfält. Det uppstår ett magnetfält runt ledaren.

Cirkulärt magnetfält runt ledaren

När en elektrisk ström flyter genom en ledare uppstår ett magnetfält runt ledaren. Om man låter en kompass närma sig ledares magnetfält, kommer kompassnålen att rikta sig mot ledarens magnetfält. Kompassnålens nordpol visar magnetfältets riktning. Om man ändrar strömmens riktning kommer även magnetfältets riktning att ändras.



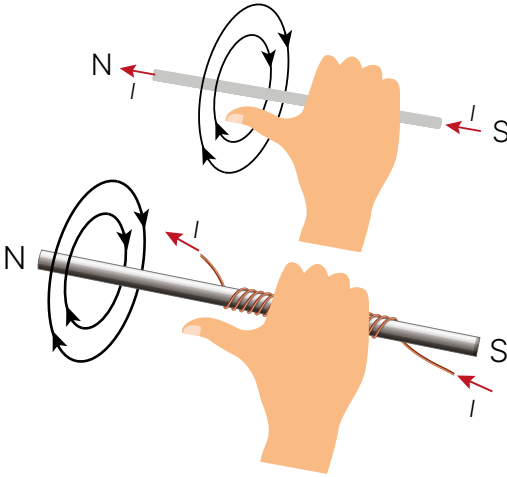
Figur 7.12

Runt en ledare som genomflyts av ström uppstår ett magnetfält

Man kan konstatera att laddningar i rörelse skapar ett magnetfält som är cirkulärt och vinkelrätt mot ledaren. Magnetfältet finns längs med hela ledaren där strömmen går fram och magnetfältets styrka avtar med avståndet från ledaren, detta på samma sätt som magnetfältet från en permanentmagnet.

Läs mer om magnetism

Om elektronerna som magnetismens orsak kan du läsa mer om i fördjupningen i slutet av kapitlet...


Figur 7.13

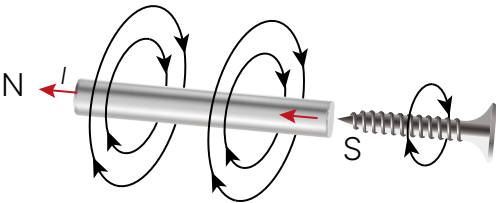
Högerhandsregeln, då tummen pekar i strömmens riktning vet man magnetfältets riktning

Högerhandsregeln

Magnetfältets riktning hos en ledare eller spole får man fram med högerhandsregeln. Genom att låta tummen på höger hand peka i strömmens (I) riktning kommer fingrarna att peka i magnetfältets riktning. Tummen kommer även att peka mot fältets nordpol.

Skruvregeln

Om man har känsla för hur man skruvar in en skruv kan man även använda det som kallas skruvregeln:

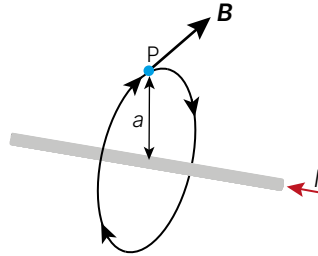

Figur 7.14

Skruvregeln, skruven skruvas i samma riktning som magnetfältet

Genom att skruva in skruven i samma riktning som strömmen får magnetfältet samma rörelseriktning, dvs. medurs eller medsols. Skruven kommer även att peka mot fältets nordpol.

Beräkning av flödestäthet

Kraftledningsnät med stora strömmar genererar stora magnetfält. Dessa fält kan påverka ledare i elektroniska apparater och på så sätt förändra eller slå ut komponenters funktion. För full kontroll vill man veta hur kraftigt magnetfältet är i en viss punkt eller på ett visst avstånd från en källa (ledare). Det intressanta är styrka och riktning på flödestätheten.


Figur 7.15

Flödestäthet B från lång rak ledare

Magnetisk flödestäthet kring lång rak ledare

Det är strömmen och avståndet från ledaren som bestämmer storleken på den magnetiska flödestätheten. I en punkt (P) på avståndet a (meter) från ledaren är den magnetiska flödestätheten B som formeln anger:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi a} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot I}{2\pi a} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot I}{a}$$

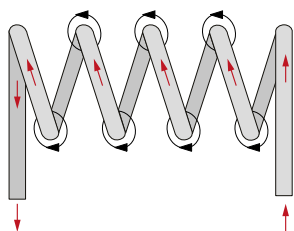
Genom den här formeln ser man hur flödestätheten B är direkt proportionell mot strömmen I och omvänt proportionell mot avståndet a från ledaren.

Spolens magnetfält

I förlängningen av Ørstedts upptäckt, att ström skapar ett magnetfält, ligger tekniken att förstärka magnetfältet runt en ledare genom att forma ledaren till en spole.

Spolen

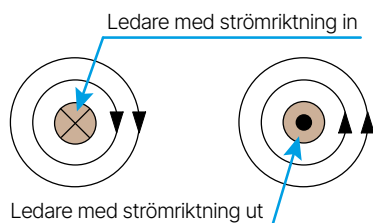
När ström flyter genom en ledare bildas ett svagt magnetfält. Genom att linda ledaren i slingor kommer magnetfältet att samverka och på så sätt att öka.



Figur 7.16

Magnetfälten samverkar i spolen

Magnetfältet bildar en loop runt spolen och dess styrka beror på antalet varv och styrkan på strömmen som flyter genom spolen. Bilden visar de samverkande magnetfälten runt ledaren. De röda pilarna är strömmen som flyter genom spolen.



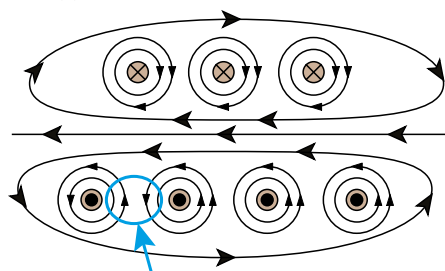
Figur 7.17

Strömriktning in markeras med kryss, ut markeras med punkt

Genom att illustrera strömmens riktning med ett kryss och en punkt och samtidigt visa magnetfältets riktning blir det enklare att förstå. Tänk dig att ledaren går in och ut genom papperet / skärmen. Bilden visar med kryss där strömmen går in i ledaren och med punkt där strömmen kommer ut.

För att tydligare se att varje litet magnetfält runt ledaren kommer att samverka och ge ett totalt

förstärkt magnetfält gör vi ett tvärsnitt av spolen i och lägger den i papprets / skärmens plan.

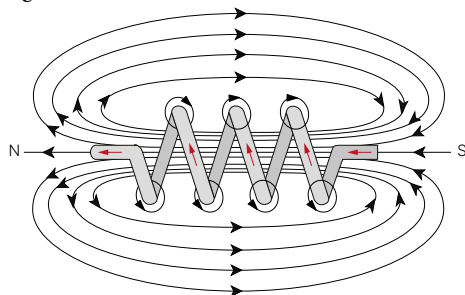


Fältet mellan slingorna motverkar varandra

Figur 7.18

Tvärsnitt av spolen med magnetfält som samverkar

Figur 7.18 visar ett tvärsnitt av spolen i **figur 7.19**. Lägga märke till att magnetfälten tar ut varandra mellan slingorna eftersom de där är motriktade. Genom och runt spolen däremot samverkar de små fälten och ger ett förstärkt magnetfält.



Figur 7.19

Magnetfältet runt och i en spole

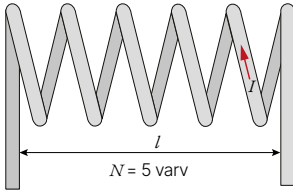
Det resulterande magnetfältet genom spolen förstärks kraftigt med hjälp av slingorna. Magnetfältets riktning både genom spolen och dess ledare kan fastställas med högerhandsregeln, testa.

Flödestätheten i en spole

Det är uppenbart att det magnetiska flödet förstärks i en ledare som formas till en spole. Det är inte heller så svårt att förstå vilka faktorer som bestämmer flödestätheten.

Varje varv multiplicerar flödet, nästan

Eftersom strömmen i en ledare skapar ett cirkulärt magnetfält längs hela sin längd får vi en förstärkning av magnetfälten genom att linda en spole.



Figur 7.20

Spole i form av solenoid

Styrkan på det homogena magnetfält som bildas i spolen beror på antal varv (N), spolens längd (l) och strömmen (I). Av **figur 7.20** framgår inte att det kommer att sippra ut en del av magnetfältet mellan varven, det innebär att avståndet (l) har betydelse. Magnetfältets förstärkning blir: $B = N \cdot I / l$. Ju tätare slingorna ligger (kortare l) och ju fler varv (N) spolen har, desto mer förstärks magnetfältet B .

Öka flödet ännu mer med en järnkärna

Det finns en faktor till av betydelse, permeabiliteten (μ), alltså hur bra magnetfältet tar sig fram i olika ämnen. För vakuum gäller (ungefär samma för luft): $\mu = \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$.

För andra material gäller en korrigeringsfaktor μ_r , som ger $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$. För magnetiskt ledande material (ferromagnetiska) är $\mu_r = 50 - 800\,000$ ggr. Genom att förse spolen med en lämplig järnkärna ökar flödet kraftigt.

Formel för flödestätheten

Om vi tar hänsyn till permeabiliteten blir formeln för den magnetiska flödestätheten genom spolen:

$$B = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{l}$$

I verkligheten är permeabiliteten (μ) för de flesta ämnen beroende av magnetflödet och formeln får därför betraktas som ungefärlig men den är klart användbar och visar vilka faktorer som bestämmer storleken på det magnetiska flödet i en spole.

Spole med och utan järnkärna

Vi kan undersöka vilken betydelse en järnkärna har för flödestätheten och tänker oss att vi lindar en spole (solenoid) med 25 varv som är 5 cm lång. Strömmen genom spolen är 0,5A.

Flödestätheten kan då beräknas som:

$$B = \mu \cdot N \cdot I / l = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 25 \cdot 0,5 / 0,05 \approx 3,14 \cdot 10^{-4} = 0,314 \text{ mT}$$

Tisp: Mata in talet i räknaren med parenteser då division med 10-potenser kan ställa till det för vissa räknare. Om vi nu förser spolen med en järnkärna som har den relativa permeabiliteten $\mu_r = 5000$, kommer flödestätheten kommer att förstärkas 5000 ggr. För spole med järnkärna gäller därför: $B = 5000 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} = 1,57 \text{ T}$.

Magnetisk fältstyrka, H -fältet

Vid sidan om flödestäthet B har det visat sig praktiskt att införa ytterligare en magnetisk storhet. Magnetisk fältstyrka som betecknas med bokstaven H . Den magnetiska fältstyrkan kallas för H -fältet. Den anges med SI-enheten A/m, ampere per meter. Fältstyrkan är direkt proportionell mot strömstyrkan och indirekt proportionell mot avståndet från källan ($H = N \cdot I / l$).

Den magnetiska fältstyrkan H brukar beskrivas som styrkan hos det magnetiserande fältet (magnetiseringsstyrka) medan flödestätheten B är styrkan i det magnetiserade fältet (magnetstyrka). Tänk dig att strömmen (I) genom spolen magnetiserar järnkärnan med styrkan (H) så att järnkärnan får den magnetiska styrkan (B).

Fältstyrkan H är relaterad till magnetisk flödestäthet B genom formeln: $B = \mu \cdot H$.

Härledning: Vi utgår från $B = \mu \cdot N \cdot I / l$.

Formeln $N \cdot I / l$ motsvarar antalet "amperevarv" per längdenhet vilket skulle kunna kallas för "amperevarvstäthet" och är samma sak som fältstyrkan H . På engelska blir det något enklare att förstå: "ampere turn per meter", At/m vilket är samma sak som SI-enheten A/m.

Med formlerna $H = N \cdot I / l$ och $B = \mu \cdot H$ får man $H = B / \mu$. Den magnetiska fältstyrkan H är liksom flödestätheten B en vektorstorhet.

Magnetisk fältstyrka utanför en ledare

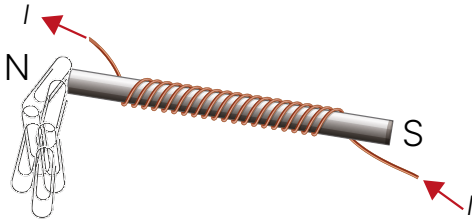
Om man vid beräkningar använder magnetisk fältstyrka (H) istället för flödestätheten (B) kan man bortse från permeabiliteten. För vissa tillämpningar är det relativt enkelt att beräkna H .

Elektromagneten och reläet

I förlängningen av Ørsteds upptäckt, att ström skapar ett magnetfält, ligger tekniken att förstärka magnetfältet runt en ledare genom att forma ledaren till en spole.

Elektromagneten

En spole med en lämplig järnkärna kan fungera som en elektromagnet. När strömmen kopplas in blir den magnetisk, och när strömmen bryts försvinner magnetfältet. Magnetfältet som genereras av elektromagneten får en nord- och en syd-pol. Polerna bestäms av riktningen på strömmen genom spolen. Om strömmen ändrar riktning ändras också polerna hos elektromagneten. Man kan tillverka en enkel elektromagnet genom att linda isolerad koppartråd runt en järnspik och sedan ansluta ledarna till ett batteri. När strömmen kopplas in blir spiken magnetisk. Med ökat varvtal och/eller ökad ström (anslut fler batterier i serie) blir magnetfältet kraftigare.



Figur 7.21

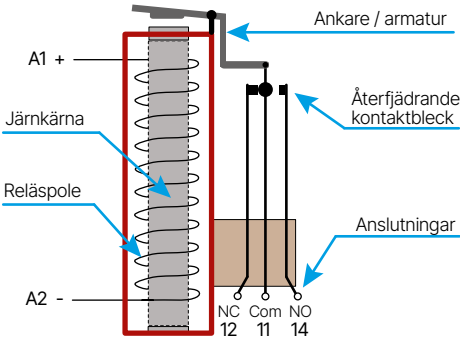
Enkel elektromagnet man kan tillverka själv

Genom att välja ett material där magnetismen försvinner när strömmen slås av får man en elektrisk styrd magnet. Elektromagneter används i reläer, kontaktorer, magnetlås, motorer, generatorer, högtalare, elektromagnetiska lyftanordningar m.m.

Reläet

Ett relä är en elektromekanisk strömbrytare som är uppbyggt av en elektromagnet vilken styr en mekanisk kontakt. Elektromagneten aktiveras när en spänning kopplas till spolen (A1/A2). Då dras ankaret mot magneten. När det sker, ändras kontaktbleckens position och kontakten byter läge från öppen till sluten (eller tvärt om). Reläets kontakt har möjligheten att anslutas som normalt öppen (Normally Open, NO) eller nor-

malt stängd (Normally Closed, NC). Med normal menas att reläspolen inte är aktiverad (drar ingen ström).

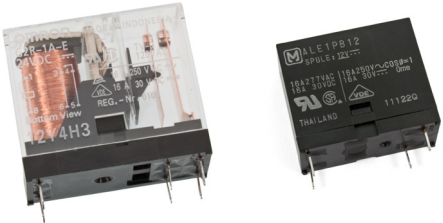


Figur 7.22

Principskiss för reläets funktion

Figur 7.22 visar ett 1-poligt relä. Man säger att det är 1-poligt då det bara har en inbyggd kontakt. Jämför principskissens anslutningar med schemat (figur 7.24) för att bättre förstå.

Eftersom styrningen av reläkontakten sker genom magnetfältet blir den elektriska isolationen mellan reläspole och kontakter mycket stor. Man kan på så sätt styra en hög spänning (t.ex. 230/400 VAC) med en liten ofarlig styrspanning (t.ex. 12 VDC). Den här typen av isolation kallas galvanisk och har stor betydelse bland annat ur elsäkerhetsynpunkt.



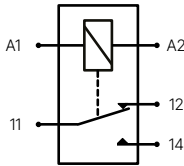
Figur 7.23

Exempel på reläer

Figur 7.23 visar exempel på reläer. Hos reläet med transparent kåpa kan man tydligt se spolen, ankaret och kontaktblecken.

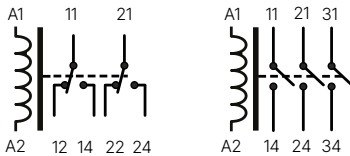
Reläsymboler

Det förekommer flera olika symboler för reläer. Om man tänker på att ett relä består av en reläspole och en kontaktgrupp kan man ofta förstå funktionen bara genom att studera schemat. Här är exempel på vanliga symboler som förekommer i kretsscheman. Reläscheman visar reläets normalläge (ej aktiverat).



Figur 7.24

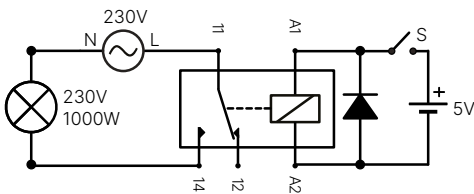
1-poligt relä



Figur 7.25

2- och 3-poliga reläer

Numreringen av reläets poler följer viss standard men man bör vara medveten om att det finns flera standarder. Fordonsreläer har t.ex. en helt egen standard. Numreringen i **figur 7.24/7.25** ser man ganska ofta. Den bygger på att första siffran beskriver vilken pol kontakten tillhör. Andra siffran beskriver vilken del av kontakten som avses.



Figur 7.26

5 VDC styr 230 VAC

Liten spänning styr stor belastning

Ett relä med 5V reläspole används för att koppla in en 230V lampa. Kretsen är klar att använda direkt. Möjligen skulle man önska sig en säkring

mellan (11) och nätspänningen för att skydda mot felaktig inkoppling.

Varför sitter det en diod över reläspolen?

För att skydda det som styr reläet, i det här fallet strömbrytaren S, monterar man en skyddsdi-od även kallad frihjulsdiod (en. flyback diode). Detta för att inte skada strömbrytaren. Särskilt viktig är dioden om det är en halvledare (t.ex en transistor) som styr reläet.

En spole motverkar förändringar av strömmen, vilket sker när strömbrytaren öppnas. Spolen motsätter sig denna förändring i form av en spänningsspik (inducerad spänning) i motsatt riktning från sin tidigare strömkälla. Spänningsspi-ken kan vara så kraftig att den kan ställa till med skada. Diodens funktion är att kortsluta spolen när spänningen bryts så att den lagrade energin kan försvinna utan att ställa till med skada.

Reläspolens data

Reläer tillverkas för att styras med DC eller AC. Vanliga spännings områden hos reläspolen är 5-230 V. Vid val av relä kan man behöva känna till reläspolens egenförbrukning så att man vet vad som krävs för att driva den. Egenförbruk-ningen anges srömbehov (mA) och/eller som spolresistans (ohm).

Reläkontakten

Specificeras med vilken högsta spänning och ström som kontakten tål, brytförmåga. Specifi-kationen avser resistiva laster, och om den avses att användas i kapacitiva eller induktiva laster blir dessa lägre.



Figur 7.27

Solenoid ger mekanisk kraft

Solenoid

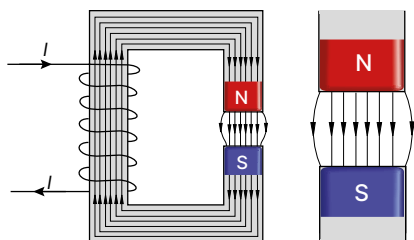
Solenoiden elektromekanisk komponent med en elektromagnet och kolv vilken avger en dragande eller tryckande rörelse/kraft. Används i allt från dörrlås, robotar och förpackningsmaskiner m.m.

Kraften hos en strömförande ledare

En strömförande ledare skapar ett eget magnetfält. När ledaren placeras i ett annat magnetfält blir det som två magneter som kommer i närheten av varandra. Det uppstår en kraft som drar åt det ena eller det andra hållet beroende på magnetfältets riktning. Vi skall undersöka vad som händer steg för steg.

Magnetfält från elektromagnet och ledare

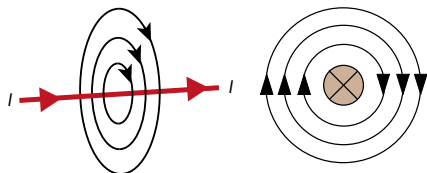
Vi tänker oss att vi har en elektromagnet med det här utseendet:



Figur 7.28

Elektromagnet med fältlinjer

Med hjälp av strömmen I skapas ett magnetfält i järnkärnan och luftspalten i en sluten bana. Mellan polerna N och S finns ett homogent magnetfält (utom vid kanterna).



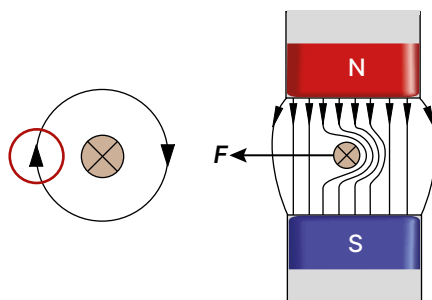
Figur 7.29

Strömgenomfluten ledare med sitt magnetfält sedd från sidan och bakifrån

Vidare har vi en ledare som det flyter ström igenom. Strömriktningen är in mot papperet / skärmen. Strömmen i ledaren skapar som bekant ett magnetfält.

Två magnetfält möts

Om ledaren i **figur 7.29** placeras vinkelrätt i elektromagnetens magnetfält, kommer fältet att förstärkas på höger sida och försvagas på vänster sida av ledaren. Notera att kraftlinjerna på vänster sida om ledaren går i motsatt riktning jämfört med elektromagnetens fält.



Figur 7.30

Kraften pressar ledaren åt vänster

Det genererar en kraft som vill pressa ledaren åt vänster. Energi eftersträvar utjämning. Om inget håller fast ledaren kommer den därför att röra sig åt vänster ut ur magnetfältet. Det är den här kraftverkan på en strömförande ledare som ligger till grund för t.ex. den elektriska motorn, generatoren och högtalaren.

En enkel formel för kraften

Det som bestämmer storleken på kraften mellan ledare och yttre magnetfält är styrka och riktning hos de två "kolliderande" magnetfälten. Vi antar att magnetfältet mellan magnetpolerna har fältstyrkan B , vi vet att magnetfältet från ledaren är direkt proportionellt mot strömmen I . Detta är de två viktigaste faktorerna.

Men kraften beror också på hur mycket av ledaren som befinner sig i fältet. Ju längre ledare desto mer magnetfält tillförs fältet från strömmen I , som flyter genom ledaren. Med andra ord: Kraften på ledaren är proportionell mot magnetfältets styrka, strömmen och ledarens längd.

Det gäller därför att $F = B \cdot I \cdot l$ där B är magnetfältets flödestäthet (T), I är strömmen genom ledaren (A) och l är ledarens längd (m).

Härledning av formel

En härledning av formeln finns i fördjupningen i slutet av kapitlet...

Motorprincipen

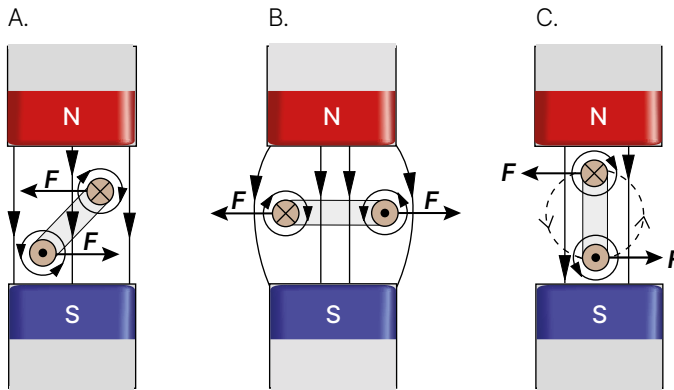
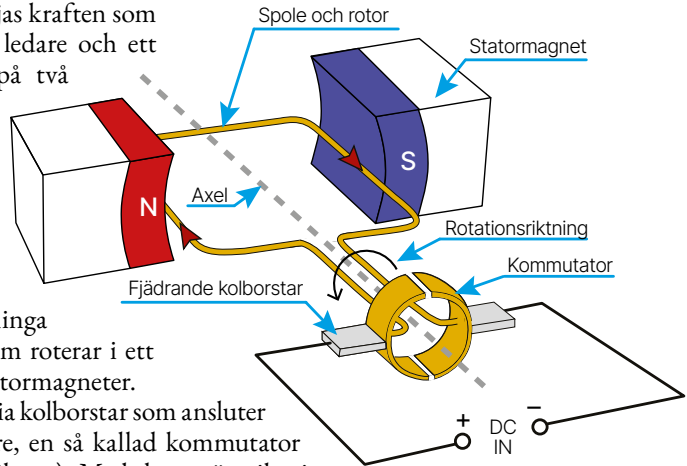
I den elektriska motorn utnyttjas kraften som uppstår mellan strömförande ledare och ett magnetfält. Motorn bygger på två magnetfält, ett som är stillastående och ett som är rörligt. Statorn är fast medan rotorn är den del som roterar. Det är magnetfältet mellan stator och rotor som skapar motorns rotation.

Vi tänker oss att ledaren är en slinga

(spole) monterad på en axel som roterar i ett magnetfält bestående av två statormagneter.

Strömmen till slingan ansluts via kolborstar som ansluter till en tvådelad strömupptagare, en så kallad kommutator (betyder strömomkastare, likriktare). Med den strömriktning som visas i bild A, får vi en kraftpåverkan på slingan som gör att denna rör sig moturs.

I horisontalläget, efter 90° vridning (bild B) kommer kraften på slingan inte medverka till att den rör sig, men vi tänker oss att farten och rotorns massa gör att rotorn fortsätter, samtidigt byter strömmen riktning tack vare kommutatorn.



Bytet av strömriktning ger slingan ny fart i samma rotationsriktning (Bild C). På samma sätt byter strömmen riktning ett halvt varv senare. Resultatet blir en fortsatt rotation. Ändrar vi matspänningens polaritet (strömriktningen) eller byter plats på statormagneterna, kommer motorn att rotera åt andra hållet (medsols). Detta är principen för hur en likströmsmotor fungerar men i verkligheten består slingan av många varv lindade på en järnkärna. Fler varv ökar längden l i formeln $F = B \cdot I \cdot l$ och järn-

kärnan ger ett kraftigare magnetflöde mellan polerna (större B). Resultatet blir en kraftigare motor.



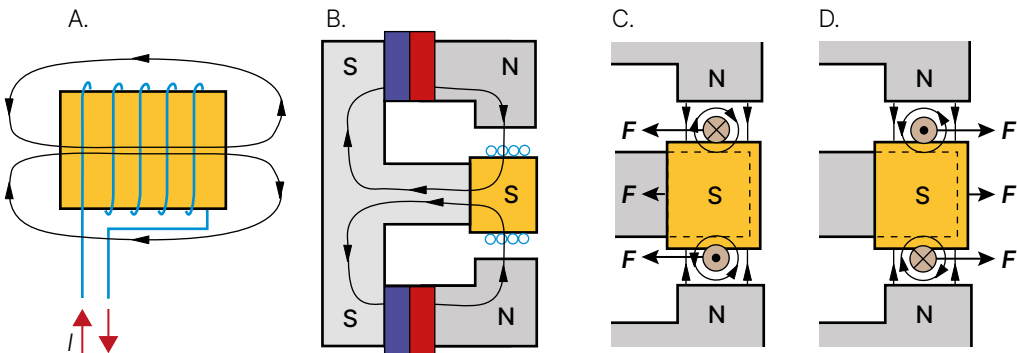
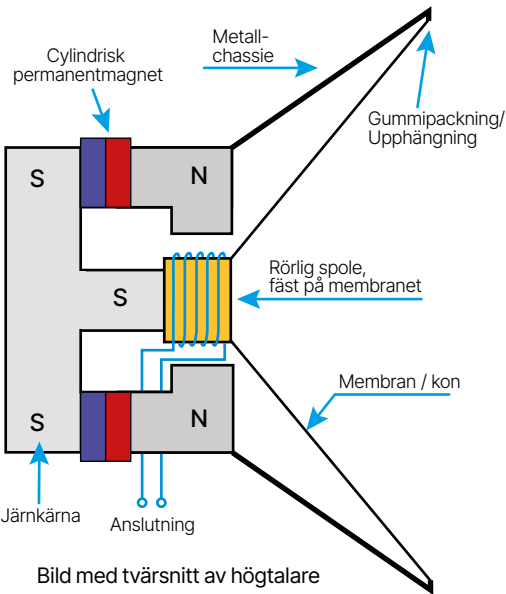
Exempel på liten DC-motor.

Högtalarens funktion

En dynamisk högtalare består av en cirkulär permanentmagnet som sitter monterad på ett magnetiskt ledande material, t.ex. en järnkärna. Runt järnkärnans sydpol sitter en rörlig spole som är fäst på högtalarmembranet. Funktion: När ström går genom spolen uppstår ett magnetfält (figur A).

Spolen befinner sig i högtalarens permanenta magnetfält och rör sig fritt i horisontalled över järnkärnans sydpol (figur B).

Figur C och D visar spolen och det magnetfält som uppstår på grund av strömmen genom spolen. Beroende på strömriktningen kommer spolen att röra sig inåt eller utåt. Hur långt spolen rör sig, beror på strömmens storlek (kraften). Spolen är fäst i högtalarens membran/kon som fungerar som motkraft (fjäder) genom sin upphängning med gummipackningen. Membranet följer alltså med i spolens alla rörelser. När spolen matas med en ljudsignal (växelspänning) kommer spolen att röra sig i takt med ljudsignalen som genom membranets rörelser blir till ljudvågor från högtalaren.



Tvärsnitt av högtalarens ringmagnet och konstruktion



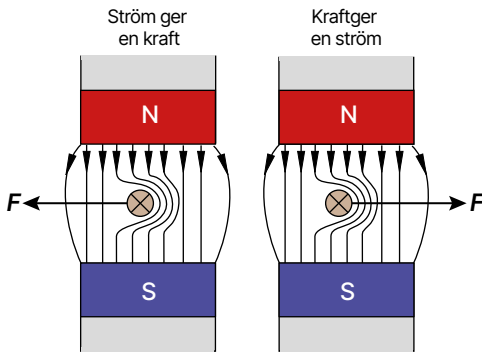
Exempel på 6,25" bashögtalare

Elektromagnetisk induktion

Om laddningar i rörelse kan skapa ett magnetfält, borde ett magnetfält i rörelse kunna skapa ström? Michael Faraday visade att det var just på det viset...

Kraft behövs för att spänning ska uppstå

När en ledare dras av en kraft (F) genom ett magnetfält skapas en spänning i ledaren. Spänningen som skapas benämns som emk (elektromotorisk kraft) eller ems (elektromotorisk spänning)



Figur 7.31

Rörelse i magnetfält skapar emk

Det här fenomenet kallas för elektromagnetisk induktion och är grunden till generatoren som omvandlar mekanisk energi till elektrisk energi. Den spänning (emk) som uppstår kan driva en ström.

Potentialskillnad uppstår

Man kan visa att spänningen över ledaren, som befinner sig i rörelse genom magnetfältet, blir:

$$e = l \cdot v \cdot B$$

där e är den inducerade spänningen (emk), B är flödestätheten i magnetfältet (tesla), v är hastigheten (m/s) för ledaren och l är längden på ledaren (m).

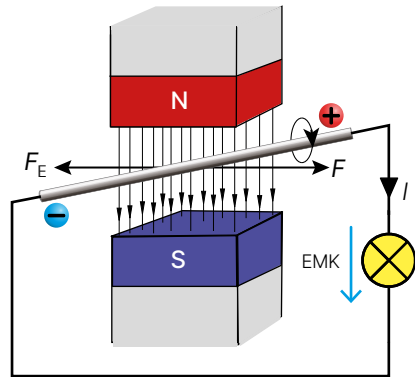
Eftersom B inte är konstant kommer e att variera när ledaren förs genom magnetfältet. Då flödestätheten B är en vektorstorhet gäller formeln när ledaren rör sig vinkelrätt mot det magnetiska fältet (då kraften är störst). Den spänning som uppstår i ledaren kallas inducerad emk. Mellan ledarens ändpunkter finns en polspänning precis

som i ett batteri.

Resultatet blir samma om det istället är magnetfältet som rör sig förbi en stillastående ledare eller spole (se figur 7.33).

Lenz lag ger riktningen

Det är inte storleken på flödet utan ändringen av flödet som bestämmer storleken på emk:n. Vi skall nu undersöka vad som händer när vi utnyttjar den inducerade spänningen för att driva en ström. Om vi kopplar in en last över den inducerade spänningen får vi en sluten strömkrets.



Figur 7.32

Sluten krets med last

Den inducerade emk:ns polaritet har vi konstaterat tidigare. Lägg nu märke till ett mycket viktigt förhållande, den ström som uppstår med hjälp av emk:n är som all ström, oskiljbar från ett eget magnetfält. Den genererar alltså ett eget magnetfält. Tillsammans med det ursprungliga magnetfältet blir det en förtätning av magnetfältet i rörelseriktningen som figur 7.31 visar.

Det uppstår alltså en kraft F_E motriktad den ursprungliga F och som bromsar ledarens rörelse. I vårt exempel är orsaken kraften F . Den inducerade spänningen e skapar då en motkraft F_E . Eftersom en inducerad spänning är motverkande kallar man den motspänning eller mot-emk. Denna verkan formulerades av den balt-tyske fysikern Emil Lenz 1834 och kallas Lenz lag.

Formulering av Lenz lag

En ström som genereras av en inducerad spänning skapar ett magnetfält som motverkar orsaken till dess uppkomst.

Faradays induktionslag

Som vi vet är den inducerade spänningen beroende av hastigheten, dvs. hur snabbt ledaren skär det magnetiska flödet. Utifrån detta får man en formel för den inducerade spänningen där medelinduktionsspänningen (e) under tidsintervallet (Δt) är:

$$e = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

$\Delta \Phi$ är flödesförändringen som sker under tiden Δt . Enlig Lenz lag kommer den inducerade spänningen (e) att motverka sin egen uppkomst varför formeln får ett minustecken. Under perioden då magnetfältets styrka ökar kommer den inducerade spänningen att bli negativ.

Den momentana spänningen (under ett visst ögonblick) är beroende av hastigheten av flödets förändring. Dvs. tidsderivatan av flödet:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

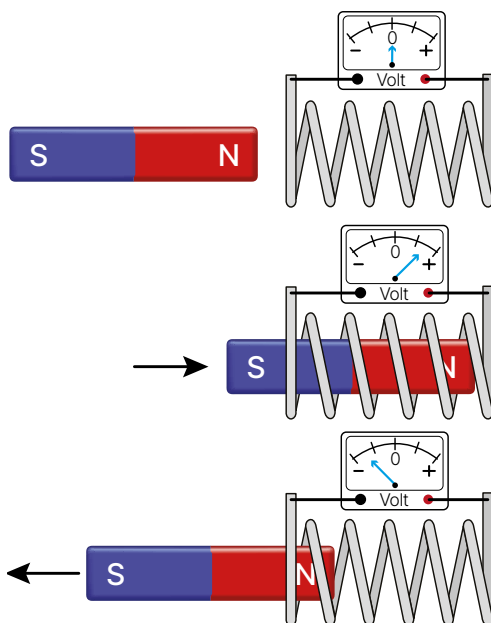
Det är detta som är Faradays induktionslag. Lagen visar att den inducerade spänningen motsvarar flödesändringen per tidsenhet. Detta utgör den grundläggande principen för konstruktionen av elektriska motorer, generatorer och transformatorer.

Inducerad spänning i spole

Genom att föra en permanentmagnet in och ut genom en spole kommer det magnetiska flödet (Φ) i spolen att förändras. En spänning (emk) induceras i spolen så länge som magnetflödet förändras, dvs. så länge som magneten rör sig genom spolen.

Vägen fram till induktionslagen

Finns i fördjupningen i slutet av kapitlet...



Figur 7.33

Induktion av spänning (emk)

Ju snabbare flödet förändras (magnetens rörelsehastighet genom spolen) per tidsenhet, desto större kommer den inducerade emk:n att bli. Den inducerade spänningen får olika polaritet beroende på om magneten förs in eller ut ur spolen. Så snart som magnetens rörelse upphör, oavsett vart den befinner sig i spolen, upphör induktionen av spänning och voltmeteren kommer att visa 0 volt.

Beräkning av induktionsspänning i spole

Induktionslagen fungerar även här. Som bekant kan man förstärka magnetfältet genom att linda ledaren i slingor till en spole. Ju fler varv (N) spolen har desto mer kommer den inducerade spänningen att öka. Den inducerade spänningen (emk) är proportionell mot flödets förändringshastighet och antalet varv hos spolen. Detta kan uttryckas med formeln:

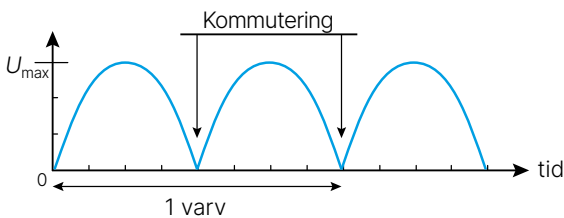
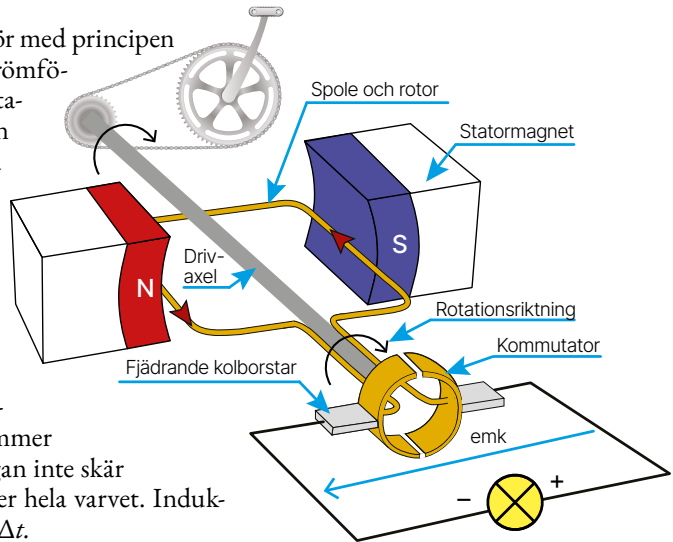
$$e = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

där e är den totala inducerade spänningen över spolen, N är antalet varv hos spolen, och $d\Phi/dt$ är tidsderivatan av magnetflödet genom ett enskilt varv.

Generatorn

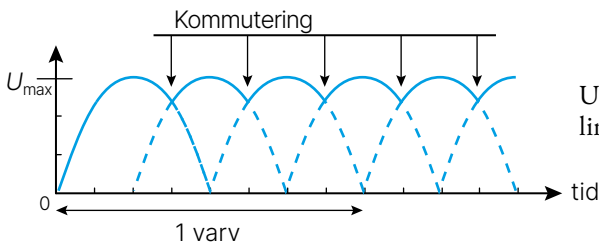
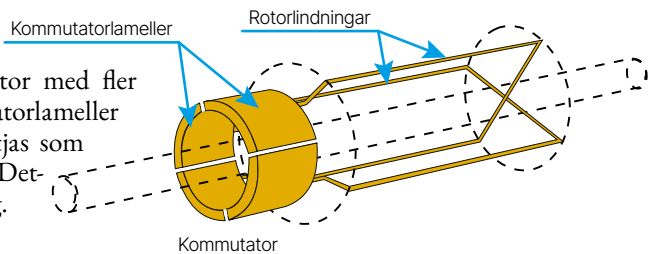
Titta på den här bilden och jämför med principen för en motor. Istället för en strömförsörjning ansluten till kommutatorn har vi en elektrisk last. Den mekaniska kraften för att driva axelns rotation kommer från en pedal. När slingan (spolen) roterar i magnetfältet kommer det att induceras en spänning över slingans ledare ($\epsilon = \mathbf{B} \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{l}$). Spänningen (emk) leds ut till kommutatorn. Kommutteringen ser till att utspänningen får samma polaritet hela tiden. Spänningen kommer att variera i storlek eftersom slingan inte skär samma mängd magnetflöde under hela varvet. Induktionslagen har lärt oss att $\epsilon = \Delta\Phi/\Delta t$.

$\Delta\Phi$ blir störst när slingan rör sig vinkelrätt mot magnetfältet och noll när den rör sig längs med fältlinjerna. Detta kommer att undersökas närmare i kapitlet om växelström. Notera att rotationsriktningen nu är medsols (jämfört med motorexemplet). Enda skillnaden det gör är att strömmens riktning ändras varför polerna på kommutatorn nu är omvända. Om vi tänker oss en konstant hastighet på rotorn får vi en utspänning enligt:



Utspanningen varierar från 0 till $U_{\max}$ för varje halvt varv rotorn gör.

Genom att förse generatorns rotor med fler lindningar (slingor) och kommutatorlameller kommer den lindning att utnyttjas som ligger mest vinkelrätt mot flödet. Detta ger en mer konstant utspänning.



Utspanningen blir mer jämn när fler lindningar tillkommer.

Självinduktion och induktans

Spolens egenskap att inducera en motverkande spänning i sig själv kallas för självinduktion eller induktans

Självinduktion

När en spole ansluts till en spänningskälla uppstår en ström genom spolen, detta för att det går åt energi att bygga upp spolens magnetfält. När det sker induceras en motriktad spänning i spolen som kallas för mot-emk. När strömmen ökar kommer induktionsspänningen att motverka strömökningen medan när strömmen minskar kommer induktionsspänningen att bibehålla strömmen.

Det är motverkan av förändringen som uppstår vid induktion som sammanfattas i Lenz lag. Spolens egenskap att inducera en motverkande spänning i sig själv kallas för självinduktion eller induktans.

Enheten för induktans, Henry

Induktans (eller självinduktion) är en spoles egenskap att motstå förändringar av ström. Induktans betecknas med bokstaven L och fås ur formeln $e = L \cdot dI / dt$ som kan skrivas om till $L = e \cdot dt / dI$. Vi får då enheten Vs/A (voltsekund per ampere). Istället för att använda Vs/A som enhet används SI-enheten Henry (H).

Enheten Henry (H) är uppkallad efter den amerikanska fysikern J. Henry (1797–1878) som bl.a. upptäckte induktionsfenomenet.

Definition av enheten Henry

Definitionen av SI-enheten Henry är:

En spole med induktansen 1 H får en mot-emk på 1 V när strömmen förändras sig med hastighet 1 A/s.

$$L = e \cdot dt / dI = 1V \cdot 1s / 1A.$$

Induktansen beror av spolens fysiska egenskaper

Storleken på induktionsspänningen (e) beror av spolens fysiska uppbyggnad och strömmens förändringshastighet. Spolens fysiska egenskaper, hur många varv den har, hur tätt varven sitter och vilken typ av kärna den har är en proportionalitetskonstant vilken benämns som induktans (L).

En spoles induktans beräknas enligt:

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{l}$$

L = henry (H)

μ = permeabiliteten ($\mu = \mu_r \cdot \mu_0$)

N = antalet varv

A = area, anges i m^2

l = längden anges i m

Vid självinduktion i en spole fås den inducerade spänningen (e) med formeln:

$$e = -L \cdot \frac{dI}{dt}$$

Medelspänning

$$e = -L \cdot \frac{dI}{dt}$$

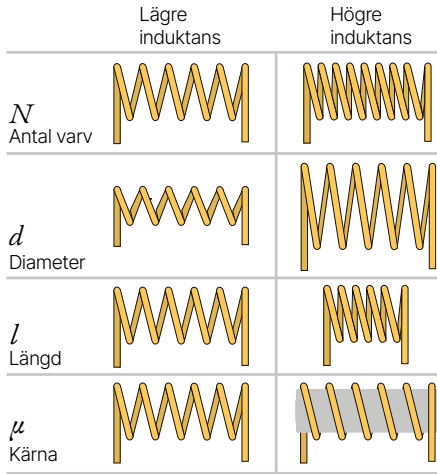
Momentanspänning

Den inducerade spänningen (e) är ett resultat av självinduktion och är proportionell mot förändringen i strömmen hos spolen.

Vad påverkar induktansens storlek?

Induktans uppstår i alla strömgenomflutna ledare efter som att de omger sig med ett magnetfält. Ledare har induktanser i storleksordningen nH per cm ledningslängd medan spolar ofta har induktansvärden från μ H till mH.

1 Henry är med andra ord en mycket stor induktans. En spole med många varv får högre induktans än en med få varv. På samma sätt har en spole högre induktans än en lika lång rak ledare eftersom spolen koncentrerar det magnetiska flödet genom sina slingor. Förutom antalet varv bestäms induktansen av vilken typ av ferromagnetiskt material (μ) man använder i spolkärnan. En spole med järnkärna får kraftigt förstärkt magnetfält jämfört med en luftlindad spole och kan därmed lagra mer magnetisk energi. Det innebär större mot-emk (e) vilket i sin tur motsvarar en större induktans.


Figur 7.34

Faktorer som påverkar spolens induktans

Antal varv (N), Diameter (d), Längd (l), Kärnmaterial (μ) är alla faktorer som påverkar spolens induktans.

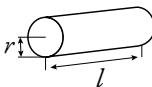

Figur 7.35

Solenoidspole

Spole, med solenoid-form

Den cylinderformade spolen är kanske det man främst tänker på när det kommer till spolar. Spolar med den här geometriska formen benämns som solenoider. Lite förvirrande kan det vara då man även stöter på begreppet solenoid hos den elektromekaniska komponenten (elektromagnet med en kolv/dragarm).

Luftlindade spolar används främst i applikationer med högre frekvens i området MHz till GHz. Formler för att beräkna en solenoids flödestäthet (B) och induktans (L):



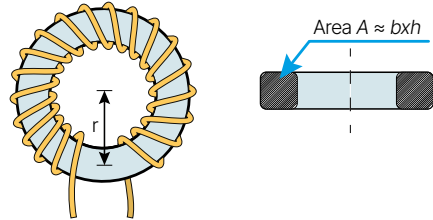
$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{l}$$

$$B = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{l}$$

Induktansen (L) anges i Henry, permeabiliteten är $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$, antalet varv (N), arean (A)

($A = \pi \cdot r^2$) anges i m^2 och längden (l) anges i meter.

Flödestätheten (B) i kärnan: Strömmen (I) anges i ampere.


Figur 7.36

Toroid, ringformad spole

Drossel, toroid-form

En toroid är en solenoidspole som är böjd till en ringform. Syftet är att man koncentrerar magnetfältet så att minimalt med fältlinjer kan läcka ut. Den slutna magnetkretsen ger en hög induktans och därmed en god dämpningseffekt. Toroider används i filterkretsar. Den engelska benämningen på drossel är choke vilket kommer av att drosseln stryper höga frekvenser. Formler för att beräkna en toroids flödestäthet (B) och induktans (L):

Formlerna är nästan samma som för solenoiden, men längden (l) beräknas med: $2 \cdot \pi \cdot r$ efter som att toroidkärnan är rund.

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

$$B = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

Toroidkärnans radie (r) och tvärsnittsarea (A), se **figur 7.36**. Observera att tvärsnittsarean (r) är ungefärlig, varför beräkningen inte kommer att bli exakt. Kontrollera toroidkärnas datablad för exakta värden.

Magnetiska material

Val av spolens ferromagnetiska material påverkar flödestäthet och där vilken induktans spolen kommer att få.

Olika typer av magnetiska material

Diamagnetiska material

Har lika många atomer med elektroner med spinn "upp" respektive "ner" (Läs om magnetismens orsak i fördjupningen). I dessa material tar elektronernas magnetfält ut varandra men har en svagt bortstötande kraft. Hos diamagnetiska ämnen är μ_r något mindre än ett vilket gör att det yttre magnetfältet försvagas. Exempel på diamagnetiska ämnen: koppar, silver, olja, grafit, vatten.

Paramagnetiska material

Hos paramagnetiska material är fördelningen av elektroner med spinn "upp" respektive "ner" slumpmässigt men har en svagt attraherande kraft. Paramagnetiska material kan temporärt bli magnetiserade när de utsätts för ett yttre magnetfält. Exempel på paramagnetiska ämnen är aluminium, platina och syre. Den relativa permeabiliteten μ_r för paramagnetiska ämnen är något större än ett vilket gör att det yttre magnetfältet förstärks något. Dia- och paramagnetiska uppträder omagnetiska då dess magnetiska påverkan är mycket liten.

Ferromagnetiska material

Materiel som kan bilda permanentmagneter kallas för ferromagnetiska. I ett ferromagnetiskt material är fördelningen av elektroner med spinn "upp" respektive "ner" i stor utsträckning slumpmässig men rättar sig gärna åt samma håll då de påverkas av ett yttre magnetfält. Denna samverkan sker i små områden, så kallade domäner. Ett yttre magnetfält kan rikta om domänerna och på så sätt kraftigt förstärka magnetfältet. Den relativa permeabiliteten μ_r hos ett ferromagnetiskt ämne är mycket större än ett. Ferromagnetism förekommer i exempelvis järn, kobolt och nickel.

Influens och remanens

Ett materials förmåga att magnetiserades av ett yttre magnetfält kallas för influens. När det yttre

magnetfältet tas bort stannar en del av magnetiseringen kvar, det kallas för remanens. Remanens gör ett ferromagnetiskt material till en egen magnet.

Magnetiskt mjuka material

Hos vissa ferromagnetiska material har de magnetiska domänerna lätt för att ställa in sig i samma riktning vid påverkan från ett yttre magnetfält. Dock tappar det lika lätt sin magnetism då det yttre magnetfältet försvinner. Dessa kallas för magnetiskt mjuka material. Ett magnetiskt mjukt material är alltså lätt att magnetisera, men magnetiseringen försvinner också lika lätt. Magnetiskt mjuka material har så kallad låg koercivitet (de avmagnetiseras enkelt). Magnetiskt mjuka material används t.ex. som spolkärnor i reläer där man vill att den magnetiska förmågan ska upphöra när strömmen till spolen bryts (det yttre magnetfältet stängs av).

Magnetiskt hårda material

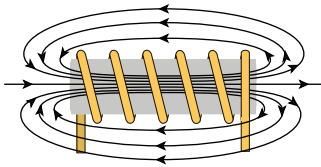
Hos ferromagnetiska material där riktningen på domänerna kvarstår under längre tid efter det påverkats av ett yttre magnetfält kallas för magnetiskt hårda material. Magnetiseringen kvarstår alltså trots att det yttre magnetfältet försvunnit. För att avmagnetisera ett hårt material krävs ett kraftigt motriktat magnetfält. Magnetiskt hårda material har hög koercivitet (de är svåra att avmagnetisera). Magnetiskt hårda material används till t.ex. i hårddiskens cylindrar och som permanentmagneter i högtalare.

Curiepunkten

Även kallat Curie-temperaturen. Om ett ferromagnetiskt material utsätts för hög temperatur kommer dess magnetism att avta för att vid Curiepunkten nästan försvinna, det övergår från att vara ferromagnetiskt till att bli paramagnetiskt. När temperaturen sjunker återgår ämnet till att bli ferromagnetiskt igen. Olika ämnen och legeringar har olika Curiepunkter: Järn ca 770 °C, Nickel ca 330 °C, Neodym ca 310-400 °C.

Ferromagnetiska spolkärnor

Som vi känner till ökar en kärna av ett ferromagnetiskt material spolens flödestäthet och därmed ökar dess induktans (L).



Figur 7.37

Ferromagnetisk kärna förstärker spolens magnetfältet

De vanligaste ferromagnetiska ämnen man använder som spolars kärnmateriel är ferrit och järnpulver. Dessa är magnetiskt mjuka material.

Ferritkärnor

Ferriter är tillverkade av sintrat granulat som består av metaller och keramiskt material. Sintrad betyder sammanpressat under smältpunkten, ca 1000-1400 °C. Ferriten är en blandning av järn(III)oxid (Fe_2O_3) i kombination med metalliska ämnen som t.ex. mangan, nickel och zink. Det keramiska materialet blandas in för att skapa isolation. En ferrit är inte elektriskt ledande, den leder bara magnetfältet. Ferritblandningen beror bl.a. på vilken permeabilitet man önskar att få. Vanligaste metallinblandningen är MnZn och NiZn.

Ferritkärnor tillverkas typiskt med relativ permeabilitet (μ_r) från 100 till 10 000. Ferriters olika blandningar anges vanligen med ett standardnummer. Vissa tillverkare har dock sina egna benämningar.

Nr	Material	Permeabilitet (μ_r)	Frekvens
31	MnZn	1500	1-300 MHz
43	NiZn	800	25-300 MHz
52	NiZn	250	50-1000 MHz
61	NiZn	125	200-2000 MHz
73	MnZn	2500	< 50 MHz
75	MnZn	5000	< 20 MHz

Egenskaper hos olika ferritmaterial. Källa: fair-rite.com.

Järnpulverkärnor

Tillverkas av pulveriserat järn och bindemedel. Genom att oxidera järnpulvrets yta skapas isolation tillsammans med bindemedlet. Järnpulverkärnor har lägre relativ permeabilitet än ferriter, normalt från ett par upp till 75 μ_r . Vanligen tillverkas järnpulverkärnor i toroid-form för frekvenser upp till 200 MHz. De används ofta som RF-induktanser, pulstransformatörer, impedans-anpassning, effektfaktorkorrigerig, avstörningsdrosslar och filterdrosslar i nätaggregat. Järnpulvertoroider har hög mätnadsflödestäthet (ca 1,5 T), vilket gör att de kan hantera högre strömmar i en mindre volym än ferrittoroider. Det är en fördel vid hög lik- eller växelström. De är även mer temperaturstabila och ger höga Q-värden (förmåga att lagra och avge energi utan att förlora den).

Nr	Färg	Permeabilitet (μ_r)	Frekvens
1	Blå	20	0,5-5 MHz
2	Röd	10	2-30 MHz
3	Grå	35	0,05-0,5 MHz
6	Gul	8	10-50 MHz
10	Svart	6	30-100 MHz
17	Blå/gul	4	20-200 MHz

Egenskaper hos olika toroider med järnpulverkärna. Källa: amidoncorp.com.

Induktansfaktor, A_L -värde

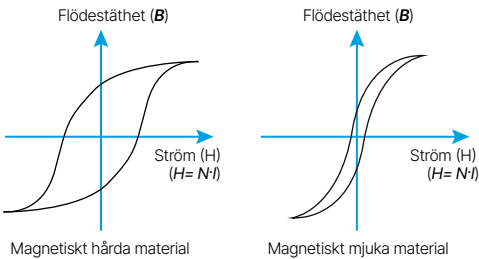
A_L -värdet (En. inductance coefficient) anges ofta i datablad hos kärnmaterial. Det används för att ta reda på hur många varv som krävs för att uppnå ett önskat induktansvärde, eller för att ta reda vilken induktansen blir för ett visst antal varv. Formel för att räkna induktansen (L) eller antalet varv (N) med hjälp av A_L -faktorn:

$$L = N^2 \cdot A_L \quad N = \sqrt{\frac{L}{A_L}}$$

Om A_L -värdet anges i μH , blir även induktansen L angivet i μH .

Hysteres, BH-kurvan

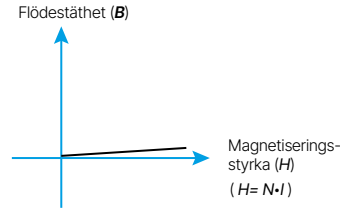
När ett ferromagnetiskt material magnetiseras blir det alltid kvar remanent magnetism. En järnkärna som magnetiseras av sin omgivande spole ökar sin magnetiska flödestäthet med ökad ström genom spolen. Detta upp till en nivå som kallas mättnad. Mättnad innebär att järnkärnas alla magnetiska domäner riktat in sig åt samma håll. När mättnad inträffar kan inte järnkärnan magnetiseras mer oavsett magnetiseringsströmmens styrka (fältstyrkan, H) genom spolen. När magnetiseringsströmmen sedan minskar, släpar kurvan för flödestätheten (B) efter, då det finns en tröghet (remanens) i järnkärnan. Detta kallas hysteres vilket är ett grekiskt ord som kan översättas till efterblivande, kvarvarande. För att veta hur en järnkärnas flödestäthet (B) reagerar på förändringar i magnetiseringsströmmen (fältstyrkan H) finns en kurva som visar magnetisering respektive avmagnetisering av ferromagnetiska material. Kurvan kallas för hystereskurva.



Figur 7.38

Hystereskurva för magnetiskt hårda respektive mjuka ferromagnetiska material

Hystereskurvan har en X- och en Y-axel. X-axeln visar den magnetisk fältstyrkan (H), vilket är styrkan som järnkärnan magnetiseras med. Fältstyrkan (H) är direkt proportionell mot strömstyrkan (I) genom spolen. Det innebär att ökad ström ökar den magnetiserande kraften. Y-axeln motsvarar järnkärnans flödestäthet (B). Flödestätheten kan öka fram tills dess att järnkärnan är mättad. Genom att vända strömmens riktningen genom spolen (byta polaritet), kan man även vända på de magnetiska domänerna i järnkärnan. Domänerna avmagnetiseras för att sedan byta riktning och mätas på nytt.



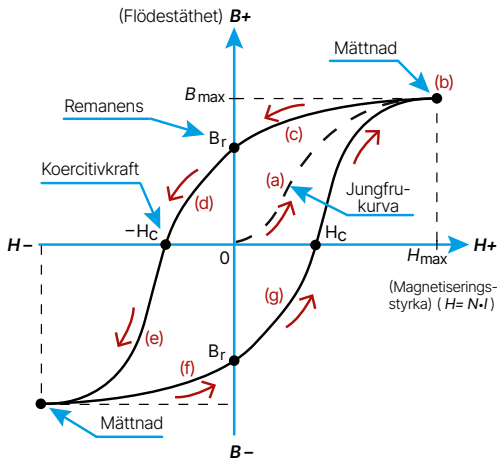
Figur 7.39

Magnetiseringskurva för spole utan järnkärna

Magnetfältet genom en spole utan kärna får detta nästan linjära utseende. Flödestätheten B ändras linjärt och mycket svagt när fältstyrkan H ökar (strömmen genom spolen ökar).

Hystereskurvans olika faser

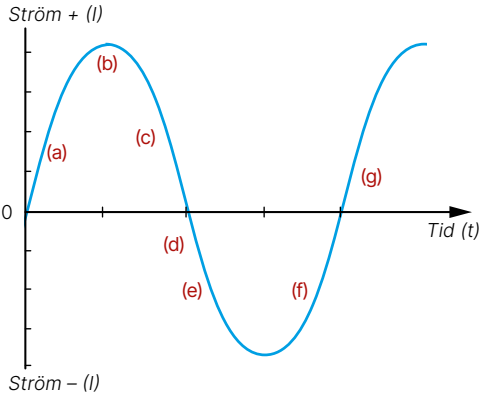
För ett spole med kärna som magnetiseras får kärnan den här synnerligen olinjära kurvan. Vi skall undersöka kurvan lite närmare.



Figur 7.40

Hystereskurva för spole med järnkärna

Den energi som alstras under en period (figur 7.41) av magnetiseringsströmmen motsvarar arean som omsluts av hystereskurvan. Arean är proportionell mot produkten av $B \cdot H$. För att enklare förstå händelseförloppet, följ hela perioden av strömförloppet och jämför figur 7.40 och 7.41.


Figur 7.41

Följ händelseförloppet med hjälp av denna växelström

(a) Jungfrukurvan:

Vi startar i nollpunkten, origo. Från början är magnetflödet B genom kärnan $= 0$. När strömmen och därmed H ökar, kommer magnetflödet att öka enligt den kurva som kallas jungfrukurvan. Namnet kommer av att materialet från början är omagnetiserat.

(b) Mättnad:

I punkten (b) uppnås en mättnad för flödestätheten. Ytterligare ökning av H (strömmen) ger inte större flöde (B).

(c) Remanens:

Om strömmen genom spolen minskar till noll kommer även magnetiseringsstyrkan (H) att bli noll ($I=0$ ger $H=0$). Det magnetiska flödet (B) i kärnan kommer bara att minska till punkten B_r . I kärnan kvarstår nu endast ett magnetiskt flöde genom remanens.

(d) Negativ ström avmagnetiserar:

Om vi nu ändrar riktning på strömmen genom spolen (byter polaritet), kommer strömmen att bli negativ. Det gör att det resterande magnetflödet (B) i kärnan nollställs (avmagnetiseras). Vid punkten (d) kommer flödet (B) att vara noll. Punkten (d) visar nu hur stor magnetiseringsstyrka (H) som krävs för att ta bort det magnetfält (remanens) som tidigare fanns i kärnan. Den fältstyrka (H) som krävs för att ta bort remanensen ur kärnan kallas för Koercitivkraft (H_c).

(e) Den negativa strömmen fortsätter

Om den negativa strömmen fortsätter kommer kärnans domäner att riktas om och magnetiseras i en ny riktning (nord- och sydpol byter plats). Detta fortgår tills ny mättnad uppstår.

(f) Tillbaka till remanens

Om nu strömmen minskar till noll, kommer flödet att minska igen, men inte helt. Vi kommer till en situation som återigen motsvarar en kvarstående magnetism (remanens) i punkten B_r .

(g) Ingen återvändo via origo:

Äter ändrar vi riktning på strömmen genom spolen (byter polaritet) och avmagnetiserar kvarvarande remanens tills vi kommer till punkten H_C . Fortsätter strömmen genom spolen påbörjas processen på nytt. Någon ny jungfrukurva blir det dock inte.

Hysteres och dess betydelse

Det magnetiska flödet "släpar efter" strömmen. Kurvan har stor betydelse för bedömning av de kärnmaterial som kan användas för att förstärka magnetflödet. Hysteres innebär förluster i järnkärnan. Koercitivkraften är indirekt ett mått på förlusterna. För transformatorer och maskiner vill man ha material med små förluster dvs. smala kurvor (låg koercitivetskraft), magnetiskt mjuka material.

För permanentmagneter gäller istället hög koercitivetskraft (H_C) och hög remanens (B_r). Produkten $B_{\max} \cdot H_{\max}$ som anger den relativa energin som finns tillgänglig i magneten, den ska vara så stor som möjligt, magnetiskt hårda material.

Spolar och drosslar i den elektriska kretsen

Spolens användningsområden

Spolen används ofta i växelströmskretsar (AC) då den är frekvensberoende komponent.

Avstämda filter, svängningskretsar

Filter används för att släppa igenom vissa frekvenser medan andra frekvenser blockeras. Filter utformas för att ha hög dämpning vid frekvenser utanför det avsedda området och minimal dämpning vid den avstämde frekvensen eller frekvensbandet.

Avstörningsfilter, EMI och RFI

Spolar användas för att dämpa högfrekventa störningar. EMI (en. Electro Magnetic Interference) är samlingsnamnet på störningar som uppstår i elektronisk utrustning på grund av emissioner (t.ex. elektromagnetisk strålning) eller ledningsburna störningar från närliggande elektronisk utrustning. RFI (radio frequency interference) är en underkategori av EMI som specifikt hänvisar till störningar som uppstår i radiofrekvensområdet.

Likströmsfilter

Används för att förhindra högfrekventa störningar (ripple) att komma in i eller sprida sig ut från ett switchat nätaggregat. Det kan även användas som energilagring i DC/DC omvandlare.

Parallell- och seriekoppling av induktanser

Genom att parallell- eller seriekoppla induktanser kan man öka resp. minska dess induktans. Nedanstående formler förutsätter att induktansernas magnetfält inte påverkar varandra genom att de placeras nära i linje med varandra. Ett sätt att minska risken för att magnetfälten ska störa varandra är att montera induktanserna vinkelrätt mot varandra på mönsterkortet.



Figur 7.42

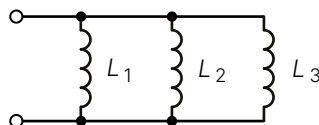
Seriekoppling, induktansen ökar

Seriekoppling av induktanser

Vid seriekoppling av induktanser blir ersättningsinduktansen större, den ökar med antalet delinduktanser.

$$L_{tot} = L_1 + L_2 + L_3 \dots$$

För seriekopplade spolar gäller därför att de ingående induktanserna adderas med varandra. Formeln motsvarar den för seriekopplade motstånd.



Figur 7.43

Parallellkoppling, induktansen minskar

Parallellkoppling av induktanser

Vid parallellkoppling blir ersättningsinduktansen mindre. Den nya ersättningsinduktansen kommer att bli mindre än den minsta ingående delinduktansen. Beräknas på samma sätt som för parallellkopplade motstånd dvs.

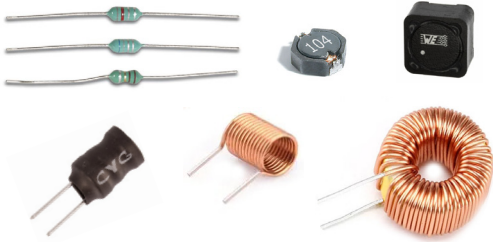
$$\frac{1}{L_{tot}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \dots$$

För två seriekopplade spolar kan istället den förenklade formeln användas:

$$L_{tot} = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$$

Induktor, drossel, spole, reaktor

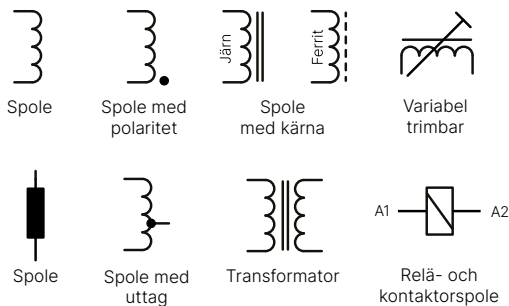
Den elektriska komponenten induktor benämns även som drossel, spole eller med det generella begreppet induktans. Ett annat namn på en induktor är reaktor. Det är en spole med järnkärna för elkraftändamål (230/400 VAC), används i t.ex. lysrörsarmaturer. Spolar tillverkas med och utan kärna i storlekar från nH upp till H (Henry).



Figur 7.44

Spolar tillverkas i många varianter

Spoltråden isoleras med ett tunt lackskikt som avskiljer slingorna från varandra. Två vanliga typer av induktanser är solenoider (vanlig spole) och toroider, vilka har olika geometriska egenskaper och tillämpningar.



Figur 7.45

Spolsymboler

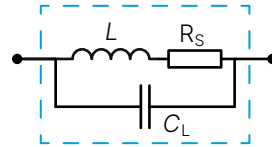
Spolens olika schematiska symboler är ofta självförklarande. Notera att det är vanlig att man på samma spolkärna kan linda flera separata spolar, de bildar då en transformator.

Förluster i spolen

I en spole uppstår förluster som är magnetiska, resistiva och kapacitiva. Förluster är oönskade då de leder till värme. Spolens magnetiska förluster beror främst av hysteres och virvelströmmar. Virvelströmmar består av skinn-effekten och närhetseffekten.

Ideal induktans

En ideal spolen har bara induktans och saknar egen resistans och kapacitans. En sådan spole finns inte i verkligheten. Om man tittar närmare på spolens ekvivalenta schema ser man att spolen förutom induktans (L) också har serieresistans (R_s) och kapacitans (C_L).



Figur 7.46

Den verkliga spolen

Resistiva och kapacitiva förluster

Den verkliga spolen har inre en resistans (R_s) som består av två delar, likströmsmotstånd (DCR) och växelströmsmotstånd (Reaktans X_L). Kombinationen av de två motstånden utgör spolens impedans (Z). Läs mer om reaktans och impedans längre fram. DCR-förlusten bestäms huvudsakligen av resistansen i spolens koppartråd och kan mätas med en multimeter. Det finns även en inre parallell kapacitans (C_L). Den parallella kapacitansen är spolens egenkapacitans, kallas även för störcapacitans eller parasitkapacitans. Den uppstår mellan de isolerade lindningarna (varven) som ligger bredvid varandra. Man kan minska egenkapacitansen genom att linda slingorna så att de korsar varandra (krysslindning).

Virvelströmmar leder till förluster

Virvelströmmar (En. Eddy currents) uppkommer i alla solida metaller (med fria elektroner i ledningsbandet) som befinner sig i ett varierande magnetfält. Kärnan i en spole kommer att påverkas av det föränderliga magnetfält som alstras av en växelström. Detta genom att det induc-

Kapitel 7 - Det magnetiska fältet och spolen

ras motverkande spänning inuti spolen. Denna spänning gör att ström börjar flöda i ett stort antal cirkulära strömslingor i kärnan. Resultatet blir oönskad energiförlust i form av värme. Virvelströmmar är ett problem i spolar med kärna och med ökad frekvens ökar problemet. För att minska problemet tillverkas ferromagnetiska kärnor av ferrit eller järnpulver. I transformatorer minskar man problemet genom att tillverka stommen av lameller (tunna skivor) som isoleras från varandra. Detta ökar transformatorns verkningsgrad och minskar dess värmeutveckling avsevärt. Virvelströmmar är inte bara till ondo då det används i vissa applikationer som t.ex. induktionshällar för att generera värme.

Skin-effekten

Den frekvensberoende resistansen (reaktansen X) ökar med ökad frekvens. Detta beror på motriktade virvelströmmar som induceras av det växlande magnetfältet som är ett resultat växelströmmen som flyter genom spolen. Fenomenet benämns skin-effekten eller yteffekten. Vid högre frekvenser fördelas inte strömmen jämnt över hela ledarens tvärsnitt utan söker sig ut mot ledarens yttre yta eller "skinnet" på ledaren. Detta minskar den effektiva tvärsnittsarean hos spoltråden och ökar därmed resistansen.

Närhetseffekten

Ytterligare en förlust från virvelströmmar är den så kallade närhetseffekten (En. proximity effect). Den beror på magnetfält som induceras av intilliggande ledare. Resultatet blir att strömmen tvingas ut på ena sidan av ledaren. Hela ledarens tvärsnittsarea används därför inte vilket ger ökad resistans. Närhetseffekten förstärks av att spolen har många varv i lager.



Figur 7.47

Litztråd minskar problemen med skin- och närhetseffekten

Litztråd

Man kan minska problemet av skin- och närhets-

effekten genom att byta ut spolens solida koppartråd mot litztråd. Litztråden består av en mängd tunna ledare (kardeler) som är elektriskt isolerade från varandra. Det varierande magnetfält som orsakar virvelströmmar kompenseras av litztrådens tvinnade och/eller flätade konstruktion. Detta gör att ytskiktet får bättre ledningsförmåga vid höga frekvenser. Typiskt används litztråd inom frekvensområdet 10 kHz till 5 MHz.

SRF, självresonansfrekvens

En spole har förutom sin egen induktans en egenkapacitans. Detta utgör grunden för en svängningskrets. Vid en viss frekvens hamnar därför spolen i självresonans, det anges i datablad som SRF (Self Resonant Frequency) och anges i MHz och som ett minimivärde. Vid resonansfrekvensen får spolen en extremt hög impedans (växelströmsmotstånd). Vid denna frekvens ser spolen ut som en öppen krets. Därför är det viktigt att välja en spole där den avsedda frekvensen ligger långt under SFR. Läs mer om resonans i en svängningskrets längre fram.

Induktiv reaktans X_L

Spolar släpper lätt igenom likström men fungerar som ett motstånd mot växelström. Ju högre frekvens växelströmmen har, desto större blir växelströmsmotståndet. Reaktansen, det frekvensberoende motståndet (X) i en komponent eller i en krets, kan vara induktiv (X_L) och/eller kapacitiv (X_C).

Induktiv reaktans anges som X_L och mäts i Ω .

Induktiv reaktans beräknas genom:

$$X_L = 2\pi f L \quad \text{eller} \quad X_L = \omega L$$

Där f är frekvensen i Hz och L är induktansen i H (henry). Vinkelhastigheten $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$. Den induktiva reaktansen är alltså proportionell mot strömmens frekvens och mot spolens induktans.

Impedans Z

Impedans är den sammansatta resistansen som består av växelströmsmotståndet (reaktansen X) och likströmsresistansen R (DCR). Impedans betecknas med Z och mäts i Ω . Impedans Z är mer komplex än resistans R eftersom effekter-

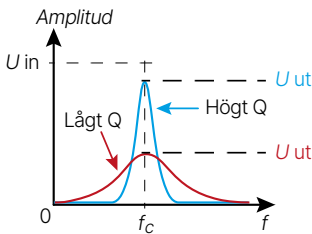
na av induktans (och kapacitans) varierar med frekvensen hos den ström som passerar genom kretsen. Det innebär att impedansen Z kommer att variera med frekvensen. Effekten av resistans (DCR) är dock konstant, oavsett frekvens. När det gäller likström, där frekvensen är noll, blir impedansen lika med resistansen ($Z = R$) eftersom reaktansen $X = 0\Omega$.

Q-värde eller godhetstal

En spoles Q-värde eller godhetstal (en. Quality-factor) är ett mått på dess förmåga att lagra och avge energi utan att förlora den. Q-värdet hos en spole är kvoten mellan dess reaktans X_L och serieresistans R (DCR).

$$Q = \frac{X_L}{R}$$

Ett högre Q-värde innebär att R är låg jämfört med X_L . Det ger lägre förlustfaktor och bättre lämplighet för högre frekvenser.



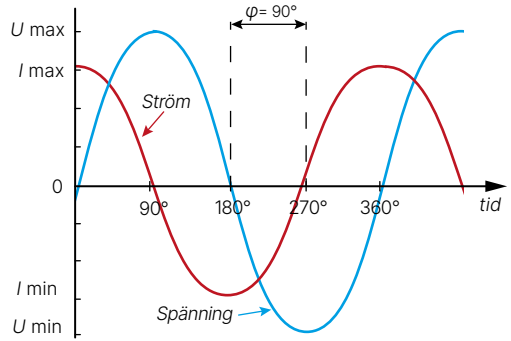
Figur 7.48

Högt Q-värde ger spetsigare filter

Ett högre Q-värde ger spetsigare filter med bättre frekvensselektivitet, dvs. smalare bandbredd. f_c är filtrets centerfrekvens (resonansfrekvens).

Förhållandet mellan ström och spänning i en induktiv krets

I induktiva växelströmskretsar kommer spolen att förskjuta strömmen i förhållande till spänningen. Man säger att strömmen laggar då spänningen ligger 90° fasförskjuten före strömmen, se figur 7.49. Fasvinkeln som uppstår anges med den grekiska bokstaven φ (fi). Strömmen i en spole ligger efterspanningen, förhållandet är φ (fi) = 90° . Jämför med kondensatorn i kapitel 5 där strömmen ligger 90° fasförskjuten före spänningen. Mer om hur induktanser beter sig i växelströmskretsar i kapitel 8.



Figur 7.49

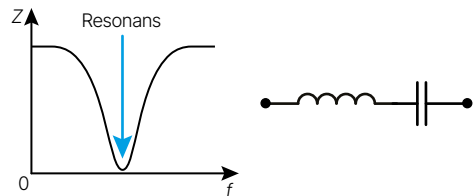
Strömmen i en induktiv växelströmskrets kommer 90° efter spänningen, strömmen laggar

Resonans i svängningskrets

När man serie- eller parallellkopplar en spole och en kondensator bildas en svängningskrets (LC-krets). En svängningskrets befinner sig i resonans när reaktansen hos spolen (X_L) och reaktansen hos kondensatorn (X_C) är lika stor, de upphäver varandra. Vid resonansfrekvensen i en svängningskrets är impedansen (Z): som lägst i en serieresonanskrets, som högst i en parallellresonanskrets. Resonanskretsar används som filter för att spärra eller släppa igenom en viss frekvens. I svängningskretsens lagras energi omväxlande i spolens magnetiska fält och kondensatorns elektriska fält. Energi utbyts fram och tillbaka under svängningscykeln.

Serieresonanskrets

Vid inkoppling av spole och kondensator i serie, måste strömmen flyta genom båda komponenterna.



Figur 7.50

Hos en serieresonanskrets blir motståndet lågt vid resonansfrekvensen

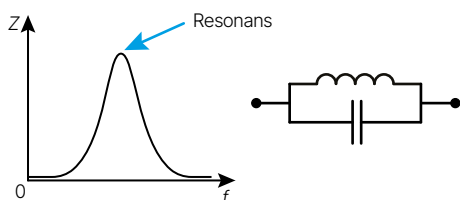
Om någon av komponenterna gör motstånd bromsas strömmen. Vid höga frekvenser kommer spolen att bromsa medan vid låga frekvenser

Kapitel 7 - Det magnetiska fältet och spolen

kommer kondensatorn att bromsa. Det minsta totala motståndet (impedans) hos serieresonanskretsen sker där motståndet hos spolen och kondensatorn är lika stor, denna "sweetspot" kallas för resonansfrekvens. Om strömmens frekvens avviker från resonansfrekvensen kommer motståndet att öka kraftigt. Hos serieresonanskretsar är motståndet som lägst vid resonansfrekvensen.

Parallellresonanskrets

Vid parallell inkoppling av spole och kondensator kommer strömmen att dela sig och flyta genom båda komponenterna, mest ström kommer att flyta igenom den komponent som bjuder minst motstånd (impedans).



Figur 7.51

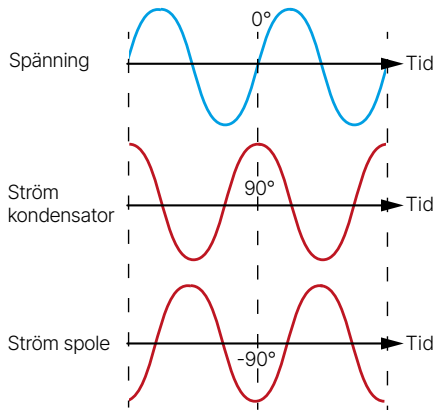
Hos en parallellresonanskrets blir motståndet högt vid resonansfrekvensen

Vid låga frekvenser kommer spolen inte att bromsa (det gör dock kondensatorn) medan vid höga frekvenser blir det omvänt. Strömmen kommer alltså att kunna passera, antingen genom spolen eller genom kondensatorn. Undantaget blir vid den frekvens där spolen och kondensatorn erbjuder samma motstånd (impedans), resonansfrekvensen. Här blir motståndet som störst. Om strömmens frekvens avviker från resonansfrekvensen kommer motståndet snabbt att minska. Parallellresonans är samma sak som faskompensering i växelströmskretsar. Det går ut på att få spännings- och strömkurvan att ligga så nära varandra som möjligt. Detta för att minska strömförbrukning och få ut maximal nyttig effekt. Mer om faskompensering i kapitel 8.

Strömmen i motfas

Man skulle kunna förvänta sig att det ekvivalenta växelströmsmotståndet (reaktansen) blir 250Ω i en parallellkopplad krets (figur 7.51) där spolens reaktans är 500Ω och kondensators reaktans är 500Ω . Så blir det inte, i stället blir den 500Ω , varför?

Efter som att strömmen inte kommer samtidigt utan är färförskjuten 90° (en kvarts våg) åt var sitt håll. I kondensatorn kommer strömmen 90° före medan i spolen kommer strömmen 90° efter. Strömmarna ligger alltså i motfas. Det resulterar i att man inte kan räkna på vanligt sätt.



Figur 7.52

Ström genom kondensator och spole i motfas

Vid positiv strömriktning flyter strömmen in i kondensatorn medan vid negativ strömriktning flyter strömmen ut ur spolen. Detta sker växlande fram och tillbaka. Strömmen svänger mellan kondensatorn och spolen. På liknande sätt blir det i en serieresonanskrets, men då är det spänningen över kondensatorn resp. spolen som svänger i motfas. Strömmen genom spolen och strömmen genom kondensatorn är den samma (som alltid vid seriekoppling).

Beräkning av induktiv resp. kapacitiv reaktans:

$$X_L = 2\pi fL \quad X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

Beräkning av resonansfrekvens i resonanskretsar:

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

f är resonansfrekvensen i hertz (Hz)

L är induktansen i henry (H)

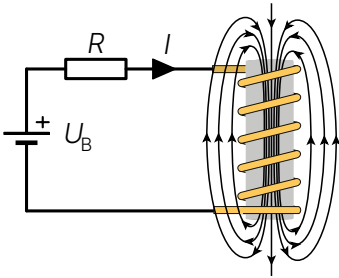
C är kapacitansen i farad (F)

Om C anges i μF och L anges i μH får man frekvensen i MHz.

Inkoppling av spolen och jämförelse med kondensatorn

Inkoppling av en spole

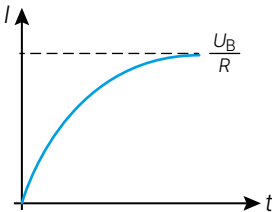
Vi skall nu undersöka vad som händer när man kopplar in en spole till ett batteri. Det kan till exempel vara en reläspole. I kopplingen (figur 7.53) finns motståndet (R) som representerar den resistans som alltid finns i en spole (DCR).



Figur 7.53

Vid inkoppling av spolen kommer ett magnetfält att skapas runt spolen

Magnetfältets styrka (fältstyrkan) är en funktion av strömmen i kretsen. Genom att mäta strömmen kan man därför se hur magnetfältet byggs upp.



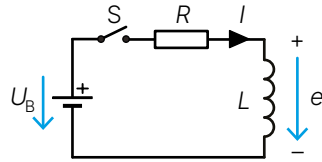
Figur 7.54

Fältstyrkan (magnetfältet) ökar i takt med att strömmen ökar

Den maximala strömmen i kretsen blir:

$I_{\max} = U/R$, men den strömmen uppnås inte direkt. I stället stiger strömmen efter en kurva som påminner om den kurva man får vid uppladdning av en kondensator (se kapitel 5). Vi kan förstå detta med hjälp av Lenz lag.

Vi utgår från det elektriska schemat:



Figur 7.55

Inkoppling av spole

Den totala resistansen i kretsen utgörs av R . När strömbrytaren (S) kopplar in strömmen in tar det en stund till den maximala strömmen $I = U_B/R$ uppnås. Den stigande strömmen genom spolen genererar ett ökande magnetfält. Genom induktionslagen vet vi att ett ökande magnetfält kommer att inducera en spänning $e = d\Phi/dt$ i spolen. Enligt Lenz lag motverkar denna spänning orsaken till dess uppkomst och har därför den riktning som visas i schemat. Spänningen U_B vill driva en ström genom spolen, men den bromsas av en motriktad spänning (e) vilken bromsar strömmen som bygger upp magnetfältet. Det gäller därför att:

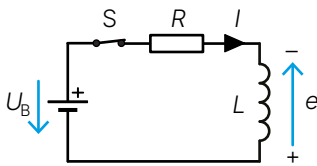
$U_B = R \cdot i + e$ där e är emk av den inducerade spänningen.

I det första ögonblicket är magnetfältets ändring $d\Phi/dt$ maximalt stor (går från att vara 0 i starten till att vara liten i slutet) vilket ger $e=U$ och därmed $R \cdot i = 0$ dvs. ingen ström alls. Allt eftersom magnetfältets energi byggs upp minskar $d\Phi/dt$ och därmed e .

Efter en stund har strömmen nått sitt maxvärde $I_{\max} = U_B/R$. I detta läge är strömmen konstant liksom magnetfältet. Då gäller också att: $d\Phi/dt = e = 0$.

Bortkoppling av en spole

Vi skall undersöka vad som händer när man stänger av (kopplar bort) strömmen genom en spole.



Figur 7.56
Urkoppling av spole

Innan strömbrytaren (S) kopplar bort strömmen går strömmen $I = U_B/R$ genom spolen. När S bryter strömmen bromsar spolen denna strömändring. Enligt Lenz lag kommer en spänning $e = d\Phi/dt$ att induceras som motarbetar strömändringen. Den motriktade emk:n (e) får den riktning som bilden ovan visar. e fortsätter alltså att driva fram en ström med hjälp av energin i spolen fastän S har brutit strömkretsen. Magnetfältet i spolen kan innehålla en stor energi som på kort tid frigörs när S bryter strömmen. När S bryter kommer strömbrytarens resistans går från nära 0Ω till att bli flera $M\Omega$. Men eftersom spolen fortsätter driva ström genom kretsen uppstår ett mycket stort spenningsfall över strömbrytarens kontaktytor, helt i enlighet med ohms lag $U_S = R \cdot I$. Spänningen U_S över strömbrytaren kommer under en mycket kort tid att bli stor (kan bli flera 1000V) vilket kan leda till en gnisturladdning över brytaren. Om inte brytaren skyddas på något sätt kan den skadas. Skyddet är ofta en kondensator, som släpper igenom den snabba strömspiken.

Spolen och kondensatorn, en jämförelse

Kondensatorns energi

Spänningen över en kondensator ändras genom att laddningen (och energin) tillförs eller bortförs. Energin lagras i form av elektriska fält. Energin i en kondensator beräknas som:

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

där E är energin i Js eller joule, C är kapacitansen i farad och U är spänningen i volt.

En kondensator är trög mot spenningsändringar eftersom dessa är kopplade till energiuppbyggnad i kondensatorn.

Spolens energi

Spolen är trög mot strömändringar. Orsaken till spolens strömtröghet beror på att elektrisk energi omvandlas till magnetisk energi, en omvandling som inte kan ske omedelbart. När ström flyter i en spole är den uppladdad med ett magnetfält som innehåller energi. Man kan visa att energin i en spole är:

$$E = \frac{1}{2} \cdot L I^2$$

där E är energin i Js eller joule, L är induktansen i henry, I är strömmen i ampere.

Viktiga skillnader

En av de viktigaste skillnaderna mellan kondensatorn och spolen är att en kondensatorn motverkar en spenningsförändring medan en spole motverkar en strömförändring. Spolen lagrar energi i form av ett magnetfält, medan kondensatorn lagrar energi i form av ett elektriskt fält.

Spole	Kondensator
Vid uppladdning ökar:	
Strömmen	Spänningen
Snabba förändringar inte möjliga av:	
Strömmen	Spänningen
Reaktansen vid ökande frekvens:	
Högre	Lägre
Strömmen vid AC	
Bromsar	Släpper igenom
Strömmen vid DC	
Släpper igenom	Spärrar
Strömkurvan i jämförelse med spenningskurvan	
Laggar 90°	Leder 90°

Tabellen visar på viktiga skillnader mellan spolen och kondensatorn. Det är viktigt att förstå och komma ihåg dessa.

Övningsuppgifter

7.1 Magnetfältet mellan fram- och återledare

Magnetfält innehåller energi som kan ge störningar till närliggande elektronik. Det är därför önskvärt att magnetfälten som uppstår runt ledare begränsas. Om man drar en kabel med fram- och återledare nära varandra kommer det yttre magnetfältet att begränsas till ytan mellan ledarna. Visa hur magnetfältet ser ut mellan två ledare som löper parallellt där strömmen går fram i ena ledaren och åter i den andra.

Var är magnetfältet starkast, utanför eller mellan ledarna?

Rita magnetfältet för ledare som går in respektive kommer ut från papperet/skärmen.



7.2 Magnetfältet mellan tvinnade fram- och återledare

I t.ex. nätverkskablar går man ett steg längre för att minska magnetfältet runt ledarna. Det görs genom att ledarna tvinnas runt varandra. Visa hur magnetfältet ser ut mellan fram- och återledare som är tvinnade som bilden visar.

- Var är magnetfältet starkast, utanför eller mellan ledarna?
- Hur ser det ut längs med ledarna?

7.3 Urladdning av spolen

När du kopplar in en spänning till en spole kommer det enligt Lenz lag att induceras en spänning som motverkar strömmen. Strömmen stiger därför endast långsamt. Men vad händer sedan, när du kopplar bort spänningen och bryter strömmen som går genom spolen?

- Strömmen sjunker sakta mot 0.
- Strömmen blir 0 direkt.
- Strömmen fortsätter med samma styrka ett kort ögonblick innan den helt kollapsar.

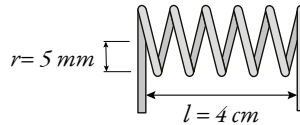
7.4 Curiepunkten

Vad händer med ett ferromagnetiskt material som utsätts för höga temperaturer över Curie-punkten?

7.5 Magnetiska enheter

Vad heter SI-enheten och hur betecknas den?

- Magnetiskt flöde
- Magnetisk flödestäthet
- Magnetisk fältstyrka
- Induktans



7.6 Hur många varv behövs?

Hur många lindningsvarv behövs för att bygga en spole med solenoid form som har induktansen $2,2 \mu\text{H}$? Vi utgår ifrån att spolens längd är 4 cm, diametern är 10 mm (dvs. radien är 5 mm).

Från grundformeln löser vi ut N :

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{l}$$

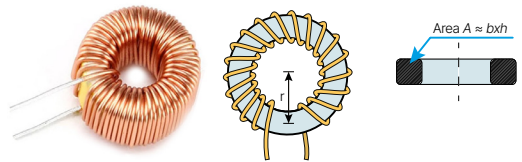
$$N = \sqrt{\frac{L \cdot l}{\mu_0 \cdot A}}$$

Notera att arean A är samma sak som

$$A = \pi \cdot r^2$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,257 \cdot 10^{-6}$$

och vi använder konstanten för permeabilitet (μ_0) i tomrum (nästan samma som för luft) då det är en luftlindad spole.



7.7 Beräkna en toroid

Toroiden på bilden har 60 varvs lindning som genomflyts av en ström på 0,5 A. Radien är 2 cm. Toroiden har en ferritkärna med permeabilitetstal $\mu_r = 800$ och en tvärsnittsarea på 1 cm^2 . Vilken är:

- Toroidens induktans
- Vad är magnetfältet i spolen?

Använd formlerna:

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

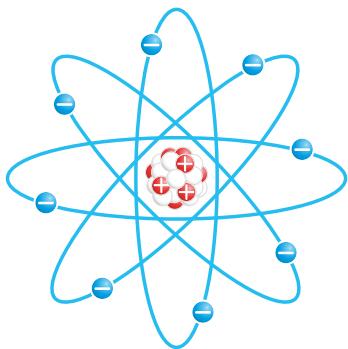
$$B = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

Fördjupning

Magnetismens orsak

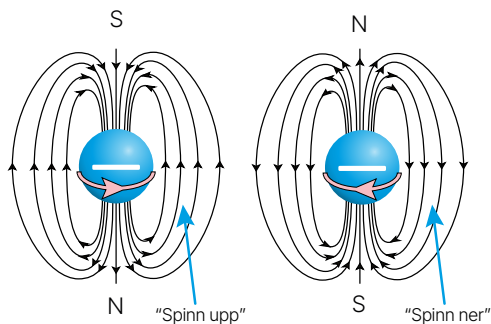
I den enkla atommodellen cirkulerar elektronen som en partikel runt den positiva kärnan.



Figur 7.57

Atom, enkel modell

Genom kvantfysiken vet vi idag att elektronen snarare kan betraktas som en materievåg (partikel och våg) som existerar runt kärnan och kan inta flera olika lägen som kallas kvanttillstånd. Ett av dessa tillstånd kallas för elektronens spinn och kan närmast liknas vid en partikels rotation kring sin egen axel.



Figur 7.58

Elektronen roterar runt sin egen axel

Elektronen kan rotera åt olika håll vilket benämns "upp" och "ner".

Just elektronens spinn anses vara orsaken och förklaringen till magnetism. Genom elektronens rotation kring sin egen axel alstras ett magnetfält. Varje elektron kommer därför att bidra till

ett magnetfält runt en cirkulerande atomkärna. Varje elektron fungerar alltså som en liten magnet, en elementarmagnet. För de flesta material i vila kan detta magnetfält inte registreras utifrån. Orsaken är att elektronerna rör sig oregelbundet och i de flesta ämnen har lika många elektroner spinn upp som spinn ner. Därför tar magnetfälten ut varandra. För några grundämnen, järn, kobolt och nickel gäller dock inte denna balans. I sitt näst yttersta lager har järn 9 elektroner med spinn åt ett håll och endast 5 med spinn åt det andra hållet. Det uppstår således en obalans med 4 elektroner.

Järn (Fe, atomnummer 26):

har en obalans motsvarande 4 "elektronspinn".

Kobolt (Co, atomnummer 27):

har en obalans motsvarande 3 "elektronspinn".

Nickel (Ni, atomnummer 28):

har en obalans motsvarande 1 "elektronspinn".

Järn kan därför bli fyra gånger så magnetiskt jämfört med nickel och dubbelt så magnetiskt som kobolt.

Om dessa ämnen utsätts för ett magnetfält kommer atomerna att rätta in sig efter fältet och när magnetfältet tas bort blir det en magnetism kvar (remanens) i materialet.

Olika legeringar av järn används för att på detta sätt skapa permanentmagneter eller för att förstärka magnetfält.

Härledning av enheten för flödestäthet

Vi utgår från $F = B \cdot I \cdot l$ som ger $B = F / (I \cdot l)$.

Kraft kan kopplas till energi genom formeln för arbete (energi): $W = E \cdot s$ där s (motsvaras av l) är sträckan som kraften verkar längs med.

En annan formel för energi som du också känner till är: $E = U \cdot I \cdot t$.

$F = B \cdot I \cdot l$ ger oss $B = F / (I \cdot l)$ som ihop med

$F = E / l$ ger:

$B = E / (l^2 \cdot I) = U \cdot I \cdot t / (l^2 \cdot I) = U \cdot t / l^2$

$$B = \frac{U \cdot t}{l^2}$$

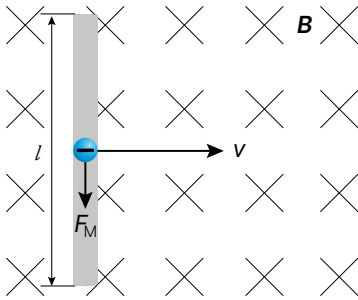
Formeln ger oss enheten för flödestäthet (B):

$$1 \text{ Vs/m}^2 = 1 \text{ Wb/m}^2 = 1 \text{ T (Tesla)}$$

Fördjupning

Vägen till induktionslagen

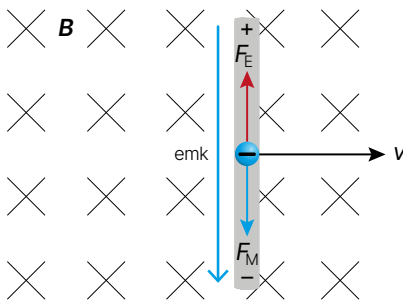
Vi skall härleda induktionslagen som ger oss ett mycket användbart uttryck för inducerad emk.



Figur 7.59

Elektronerna i ledaren påverkas av kraften F_M

En ledare dras vinkelrätt genom ett homogent magnetfält B med hastigheten v . Det innebär att elektronerna inne i ledaren, kommer att påverkas av en magnetisk kraft (F_M) som för dem nedåt (se figur 7.57). Det innebär att det uppstår en lokal omgruppering av laddningar i ledaren, en separation.



Figur 7.60

När elektronerna i ledaren omgrupperas uppstår en potentialskillnad (spänning)

När elektronerna i ledaren förflyttar sig till den nedre delen, kommer det att bli en brist på elektroner i ledarens övre del. Nedre delen blir negativt laddad och övre delen blir positivt laddad. Mellan stavens undre och övre del bildas ett elektriskt fält med styrkan E . Som vi sett tidigare betyder en separation av laddningar en po-

tentialskillnad (spänning) och därmed uppstår det elektriska fältet ($E = U / d$). Här motsvaras avståndet d av längden l . Det har inducerats en spänning U (eller $e = emk$), över ledaren.

Den magnetiska kraften $F_M = Q \cdot v \cdot B$ är riktad nedåt och motverkar kraften från det elektriska fältet $F_E = Q \cdot E$ som är riktat uppåt.

$$F_E = Q \cdot E = \frac{Q \cdot U}{l}$$

I starten är den magnetiska kraften större än den elektriska kraften. I takt med att elektronerna i ledaren förflyttar sig, ökar spänningen tills det uppstår en jämvikt mellan den elektriska kraften F_E och den magnetiska kraften F_M ($F_E = F_M$). Detta gäller vid konstant hastighet (v).

$$\frac{Q \cdot U}{l} = Q \cdot v \cdot B$$

Dividera med Q och Lös ut U ur ekvationen får vi att den inducerade spänningen U (eller e) blir:

$$e = B \cdot v \cdot l$$

Vilket är spänningen över ledaren som befinner sig i rörelse genom magnetfältet, där e är den inducerade spänningen (volt), B är flödestätheten i magnetfältet (Vs/m^2), v är hastigheten (m/s) för ledaren och l är längden på ledaren (m).

Formeln innebär att spänningen beror på flödestätheten, hastigheten och längden på ledaren dvs. hur många flödeslinjer som skärs per tidsenhet. Eftersom B är en vektorstorhet måste vi dessutom ta hänsyn till rörelseriktningen genom magnetfältet. Formeln gäller när ledaren är orienterad vinkelrätt mot fältriiktningen och rör sig vinkelrätt mot det magnetiska fältet, då kraften är störst.

Den spänning som uppstår i ledaren kallas inducerad emk. Eftersom emk:n är resultatet av en relativ rörelse blir det samma resultat om det istället är magnetfältet som rör sig förbi en stillastående ledare (eller spole).

Fördjupning

Sista biten fram till induktionslagen

Om ledaren är i form av en spole som roterar i magnetfältet kommer B inte att bli konstant vilket gör att även e kommer att variera.

Det gäller att flödestätheten $B = \Phi / A$ dvs.

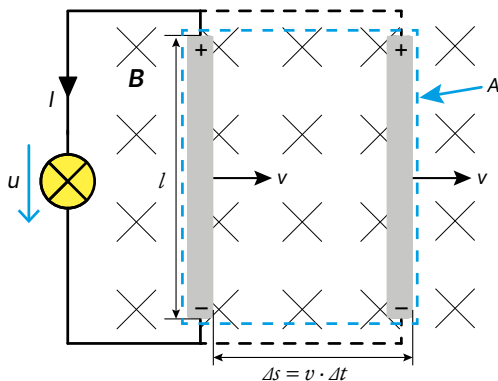
$$\Delta\Phi = B \cdot \Delta A \quad (1).$$

Den inducerade spänningen är $e = B \cdot v \cdot l \quad (2)$.

Hastigheten $v = s/t$ dvs. $v = \Delta s / \Delta t \quad (3)$.

Tänk dig att nu att du har en ledare med längden l som rör sig genom ett magnetfält med flödestätheten B över arean A .

Om hastigheten är $v = \Delta s / \Delta t$ dvs. $\Delta s = v \cdot \Delta t$ kommer ledaren under tiden Δt att röra sig sträckan Δs och på så sätt skära flödeslinjer inom arean $\Delta A = l \cdot \Delta s \quad (4)$.



Figur 7.61

Ledare rör sig med hastigheten v i ett magnetfält

Så länge ledaren rör sig genom magnetfältet med hastigheten v kommer lampan att lysa.

För $e = B \cdot v \cdot l \quad (2)$ utnyttjas $v = \Delta s / \Delta t \quad (3)$ som ger oss $e = B \cdot (\Delta s / \Delta t) \cdot l = B \cdot \Delta s \cdot l / \Delta t$.

Utnyttja nu $\Delta A = l \cdot \Delta s \quad (4)$ och du får $u = B \cdot \Delta A / \Delta t$ som med $\Delta\Phi = B \cdot \Delta A \quad (1)$

Slutsatsen kallas Faradays induktionslag. Den inducerade spänningen motsvarar flödesändringen per tidsenhet. Ju större flöde som skärs under en bestämd tid, desto större blir den inducerade spänningen.

Induktionsspänning, medel

Medelinduktionsspänningen under tidsintervallet beskrivs som:

$$e = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

där emk (e) är flödesändringen ($\Delta\Phi$) per tidsenhet (Δt).

Induktionsspänning, momentan

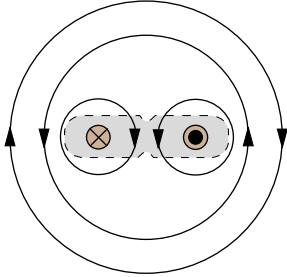
Momentan (under ett visst ögonblick) induktionsspänning beskrivs som tidsderivatan av magnetflödet:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

där emk (e) är tidsderivatan av det magnetiska flödet.

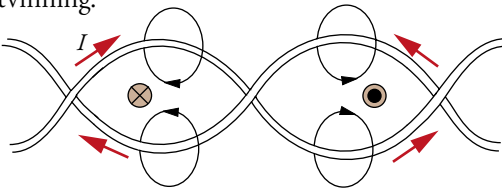
Facit

7.1 Magnetfältet förstärks mellan ledarna men tar ut varandra utanför ledarna.



För att minimera magnetfältet runt kabeln ska ledarna ligga så nära varandra som möjligt.

7.2 Magnetfälten släcker ut varandra utanför ledarna men delvis också längs med ledarna eftersom det växlar riktning mellan ledarna för varje tvinning.



Bilden visar magnetfältet som går in i papperet/skärmen mellan ledarna i vänstra delen och ut från papperet/skärmen mellan ledarna i högra delen av det tvinnande ledarparet.

7.3 Rätt svar är 2.

Förklaring: Magnetfältet kollapsar inte ögonblickligen bara för att strömmen bryts. Enligt Lenz lag kommer det att uppstå en kraft som försöker förhindra ändringen dvs. att magnetfältet skall försvinna och strömmen sjunka. Det induceras därför en spänning som fortsätter att driva på strömmen. Eftersom kretsen nu är bruten kommer spänningen att växa över gapet i brytaren vilket till slut kan leda till ett överslag i brytaren, en gnista, vilken urladdar spolens energi.

7.4 Det blir paramagnetiskt (förlorar sin magnetism). När temperaturen sjunker återgår materialet till att bli ferromagnetiskt igen.

- 7.5 a) Weber (Wb) Φ (fi)
 b) Tesla (T) B
 c) Ampere per meter (A/m) H
 d) Henry (H) L

7.6 Börja med att omvandla till grundenheter:

$$L = 2,2 \mu\text{H} = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ henry}$$

$$l = 4/100 = 0,04 \text{ meter}$$

$$r = 5/1000 = 0,005 \text{ meter}$$

$$N = \sqrt{\frac{2,2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,04}{(1,257 \cdot 10^{-6}) \cdot \pi \cdot 0,005^2}}$$

$$N \approx 29,86 \approx \mathbf{30 \text{ varv}}$$

$$N = \sqrt{\frac{L \cdot l}{\mu_0 \cdot A}}$$

$$A = \pi \cdot r^2$$

$$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$$

7.7 Börja med att omvandla till grundenheter:

$$r = 2/100 = 0,02 \text{ meter}$$

$$A = 1 \text{ cm}^2 = 0,0001 \text{ m}^2$$

Beräkna permeabiliteten

$$\mu = 800 \cdot 1,257 \cdot 10^{-6} = 1,01 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{a) } L = \frac{(1,01 \cdot 10^{-3}) \cdot 60^2 \cdot 0,0001}{2 \cdot \pi \cdot 0,02} \approx \mathbf{2,9 \text{ mH}}$$

$$\text{b) } B = \frac{(1,01 \cdot 10^{-3}) \cdot 60 \cdot 0,5}{2 \cdot \pi \cdot 0,02} \approx \mathbf{0,24 \text{ T}}$$

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

$$B = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

Sammanfattning magnetfält och spolen

Magnetiskt flöde - Weber

Det vi ritar som kraftlinjer motsvaras av det magnetiska flödet. Styrkan hos det magnetiska flödet illustreras med fler och tätare kraftlinjer. Magnetiskt flöde anges i Weber (Wb) och betecknas med Φ (fi).

Magnetisk flödestäthet - Tesla

Magnetiskt flödestäthet motsvarar Wb/m² och anges i SI-enheten Tesla (T), betecknas med bokstaven B . Flödestäthet kallas även för B-fältet och är det vanligaste sättet att ange styrkan hos ett magnetfält. Styrkan på magnetflödet gäller för ytan (A) som de magnetiska fältlinjerna skär genom (m²) och beräknas enligt:

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

Magnetisk fältstyrka, H-fältet

Den magnetiska fältstyrkan anges med SI-enheten A/m, ampere per meter och betecknas med H . Fältstyrkan brukar beskrivas som styrkan hos det magnetiserande fältet (magnetiseringsstyrka) medan flödestätheten B är styrkan i det magnetiserade fältet (magnetstyrka). Fältstyrkan är direkt proportionell mot strömstyrkan och indirekt proportionell mot avståndet från källan. Beräknas enligt:

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \quad H = \frac{B}{\mu}$$

N = Lindningsvarv hos spolen

I = Ström (ampere)

l = Längd (meter)

Permeabilitet

Beskriver hur bra (eller dåligt) det magnetiska flödet leds genom ett material. Betecknas med bokstaven μ (my). Utgångsvärdet är permeabiliteten i tomrum (vakuum) som är en konstant och betecknas μ_0 . Det gäller att $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am. För olika material gäller en korrigeringsfaktor vilken anges som den relativa permeabiliteten μ_r . Vakuum har $\mu_r = 1$ medan hos ferromagnetiska är $\mu_r = 50$ till 800 000 ggr.

Beräkning av permeabiliteten:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

Ju högre den relativa permeabiliteten är hos ett material desto mer förstärks det magnetiska fältet.

Inducerad spänning i rak ledare

När ett varierande magnetfält skär vinkelrätt genom en spole induceras en motriktad elektrisk spänning i spolen (eller en ledare). En ström som genereras av en inducerad spänning skapar ett magnetfält som motverkar orsaken till dess uppkomst (Lenz lag), detta sker för att spolen vill bibehålla sitt uppbyggda magnetfält. Motspänningen (U) som genereras kallas för motemk (elektromotorisk kraft). Emk betecknas med e och mäts i volt. Beräkning av inducerad spänning från ledare som rör sig vinkelrätt genom ett magnetfält:

$$e = l \cdot v \cdot B$$

e = Spänning (emk)

l = Längd på ledare (m)

v = Hastighet (m/s)

B = Flödestätheten (tesla)

Induktionslagen

För att inducera spänning från en spole krävs ett varierande magnetfält. Det kan tillföras av en magnet som förs in och ut genom spolen, en kraft tillförs. Detta är grunden för en generator. I och med att det magnetiska flödet från magneten varierar kommer också emk (e) att variera, detta enligt induktionslagen:

Induktionsspänning, medel

Medelinduktionsspänningen under tidsintervallet beskrivs som:

$$e = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

där emk (e) är flödesändringen ($\Delta \Phi$) per tidsenhet (Δt).

Sammanfattning magnetfält och spolen

Induktionsspänning, momentan

Momentan (under ett visst ögonblick) induktionsspänning beskrivs som tidsderivatan av magnetflödet:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

där emk (e) är tidsderivatan av det magnetiska flödet.

Spolen eller induktorn

Induktorer reagerar på strömandringar genom att avge spänning i motsatt polaritet (motspänning) för att motverka förändringarna, denna egenskap sammanfattas i Lenz lag och kallas för självinduktion eller bara induktans. När en induktor utsätts för en ökande ström fungerar den som en belastning, spänningen sjunker när den absorberar energi. När en induktor utsätts för en minskande ström fungerar den som en källa, den inducerar spänning när den frigör lagrad energi.

Inducerad spänning i en spole

Den inducerade spänningen i det varierande magnetfältet är direkt proportionell mot antalet lindningsvarv hos spolen enligt formeln:

$$e = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

Induktans och självinduktion

Induktans eller självinduktion betecknas med L och har SI-enheten Henry (H). Induktans är en induktors egenskap att motstå förändringar av ström, detta genom att lagra eller avge energi från sitt magnetfält. Induktansen hos en spole är således kvoten mellan den inducerade spänningen (emk) och derivatan av strömförändringen med avseende på tiden.

$$L = e \cdot \frac{dt}{dI}$$

Induktansfaktor, A_L -värde

A_L -värdet används för att ta reda på hur många varv som krävs för att uppnå ett önskat induktansvärde eller för att ta reda vilken induktansen blir för ett visst antal varv. Formel för att räkna induktansen (L) eller antalet varv (N) med hjälp av A_L -faktorn:

$$L = N^2 \cdot A_L \quad N = \sqrt{\frac{L}{A_L}}$$

Om A_L -värdet anges i μH , blir även induktansen L angivet i μH .

Seriekoppling av induktanser

Vid seriekoppling av induktanser blir ersättningsinduktansen större, den ökar med antalet delinduktanser.

$$L_{\text{tot}} = L_1 + L_2 + L_3 \dots$$

Parallellkoppling av induktanser

Vid parallellkoppling blir ersättningsinduktansen mindre. Den nya ersättningsinduktansen kommer att bli mindre än den minsta ingående delinduktansen. Beräknas på samma sätt som för parallellkopplade motstånd dvs.

$$\frac{1}{L_{\text{tot}}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \dots$$

Induktiv reaktans X_L

Reaktans det frekvensberoende motståndet hos en induktor. Induktiv reaktans anges som X_L och mäts i Ω . Induktiv reaktans beräknas genom:

$$X_L = 2\pi f L \quad \text{eller} \quad X_L = \omega L$$

Där f är frekvensen i Hz och L är induktansen i H (Henry). Vinkelhastigheten $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

Q-värde eller godhetstal

En spoles Q-värde eller godhetstal är ett mått på dess förmåga att lagra och avge energi utan att förlora den. Q-värdet för en spole är kvoten mellan dess reaktans X_L och serieresistansen R .

$$Q = \frac{X_L}{R}$$

Ett högre Q-värde innebär att R är låg jämfört med X_L . Det ger lägre förlustfaktor och bättre lämplighet för högre frekvenser.