

Ellära och magnetism på gymnasiet: Viktiga begrepp och principer

Några grundläggande storheter och kretsteoretiska lagar

Två viktiga egenskaper hos partiklar:

- massa (ger upphov till gravitationskraften och tröghet mot acceleration),
- elektrisk laddning (ger upphov till elektromagnetiska kraften)

Laddning (laddningsmängd): $Q = N \cdot q_e$ där N är ett heltal och q_e är en naturkonstant (elementarladdningen, som är den minsta laddningsmängden som en fri elektriskt laddad partikel kan ha). En elektron har $Q = -q_e$ och protonen har $Q = +q_e$. I SI-enheter är $q_e \approx 1,602 \cdot 10^{-19}$ coulomb. I ett slutet system bevaras den totala laddningen, d.v.s. laddning varken skapas eller förstörs.

Ström: Transport av laddning. Strömstyrkan (I) är laddningsmängden som passerar en tänkt tvärsnittsytta per tidsintervall, $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$. Strömriktningen definieras som riktningen för transport av positiv laddning. För negativt laddade partiklar gäller då att deras rörelseriktning är motsatt den definierade strömriktningen. I kretsscheman anges strömriktningen med en pil. Positiv ström innebär att strömmen flyter i pilriktningen medan negativ ström innebär att strömmen flyter motsatt pilens riktning.

I en graf av strömmen som funktion av tiden kan man bestämma nettoladdningen (som i tidsintervallet $\Delta t = t_2 - t_1$ passerat mätpunkten) genom att beräkna arean under grafen. Omvänt, i en graf av laddningsmängden som funktion av tiden, så kan strömmen vid tidpunkten t_1 bestämmas genom att beräkna riktningskoefficienten till kurvans tangent vid t_1 .

Spänning: Om laddningen $+\Delta Q$ avlägsnas från en neutral (oladdad) kropp och förflyttas en viss sträcka i rummet, från punkt 1 till punkt 2, så måste ett arbete W utföras. Detta p.g.a. att den kvarvarande kroppen får laddningen $-\Delta Q$ och utövar en attraherande kraft på $+\Delta Q$. Samma gäller om laddningen $+\Delta Q$ skulle förflyttas i närvaro av andra elektriskt laddade kroppar. Arbetet W är lika med ändringen hos elektriska lägesenergin ΔE_{pot} . Elektriska spänningen (U) mellan punkterna 2 och 1 definieras som utfört arbete per laddningsmängd,

$$U = \frac{W}{\Delta Q} = \frac{\Delta E_{pot}}{\Delta Q}.$$

Resistans: Resistans beskriver hur dåligt en komponent leder elektricitet. Den beräknas som kvoten mellan spänningen över och strömmen genom en komponent. När ström flyter genom en komponent med resistans så hettas komponenten upp. Detta leder även till utsändning av elektromagnetisk strålning. I processen omvandlas elektrisk energi till termisk energi och elektromagnetisk strålning. Partiklarna i strömmen (t.ex. ledningselektronerna i en metall) "kolliderar" med positiva kärnor (och bundna elektroner) som vibrerar p.g.a. termisk rörelse. Kollision i detta sammanhang innebär att en ledningselektron ändrar sin rörelseriktning. Vid kollisionen ökar vibrationerna och därmed höjs temperaturen. Samtidigt utstrålas elektromagnetiska vågor eftersom laddade partiklar som accelererar strålar.

Värdet på resistansen bestäms av komponentens geometri (t.ex. längd och tvärsnittsarea) och materialet. Materialegenskapen kallas resistivitet. Resistiviteten beror av antalet laddningsbärare och hur lätttröliga de är. Ökad temperatur leder till fler lätttröliga laddningsbärare (minskning av resistiviteten), men samtidigt sker fler kollisioner (ökning av resistiviteten). Hos halvledare dominerar ofta den förstnämnda processen, medan hos metaller dominerar normalt den sistnämnda processen.

Kirchhoffs strömlag: Sammanlagda strömmen in i en knutpunkt=sammanlagda strömmen ut från knutpunkten. Lagen har sitt ursprung att laddningen i ett slutet system bevaras.

Spänningsaddition: Sammanlagda spänningen över seriekopplade komponenter=summan av spänningarna över respektive komponent. Denna beräkningsprincip är ett specialfall av Kirchhoffs spänningslag, som i sin tur baseras på att energi bevaras.

Joules lag: Effektutveckling $P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{\Delta E_{pot}}{\Delta t} = U \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta t} = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}$.

Ohms lag: $R = \frac{U}{I}$ (kvoten mellan spänningen över en komponent och strömmen genom komponenten)

Seriekoppling av resistorer: Vid seriekoppling av resistorer flyter samma ström genom samtliga resistorer. Totala resistansen beräknas genom att addera de enskilda resistanserna, $R_{total} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$. Formeln härleds t.ex. genom att använda sig av att effektutvecklingen i resistorn med resistansen R_{total} är lika med summan av effekterna i de enskilda resistorerna.

Parallellkoppling av resistorer: Vid parallellkoppling av resistorer ligger samma spänning över samtliga resistorer. Totala resistansen beräknas genom att addera inverterade värden av de enskilda resistanserna, $\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$. [Man kan uttrycka detta även med en annan storhet, konduktansen $G = \frac{1}{R}$. Då gäller vid parallellkoppling att $G_{total} = G_1 + G_2 + G_3 + \dots$].

Formeln för $\frac{1}{R_{total}}$ härleds t.ex. genom att använda sig av att effektutvecklingen i resistorn med resistansen R_{total} är lika med summan av effekterna i de enskilda resistorerna.

Modell för en spänningskälla: $\mathcal{E}$ =elektromotorisk spänning ("ems")=spänningen som genereras i källan (ex.vis av kemiska reaktioner), U_{pol} =polspänningen=spänningen mellan källans poler och som kan anslutas till en belastning (R_{last}).

- ideal källa: $U_{pol} = \mathcal{E}$ d.v.s. polspänningen är oberoende av belastningen R_{last} .
- icke-ideal källa: Källan har en inre resistans (R_{inre}). $U_{pol} = \mathcal{E} - I \cdot R_{inre}$, polspänningen beror nu av belastningen p.g.a. att strömmen beror av R_{last} och R_{inre} .

Elektrisk kraftverkan, elektriskt fält

Växelverkan (kraftverkan) mellan elektriskt laddade partiklar/kroppar:

- *Elektrisk fältstyrka*: Partikel (eller kropp eller generellt en laddningsfördelning) "1" omges av ett elektriskt fält ($\mathbf{E}$) och en partikel "2" med laddningen Q_2 känner av "1":ans fält och påverkas av kraften $\mathbf{F} = Q_2 \cdot \mathbf{E}$. **Fältet är alltså en kraftförmedlare.** Storlek och riktning för 1:ans fält skall beräknas precis i "2":ans position.
- *Potential*: Partikel (eller kropp eller generellt en laddningsfördelning) "1" omges av en potential (V) och en partikel "2" med laddningen Q_2 känner av "1":ans potential. Systemets ("1" och "2") elektriska lägesenergi (potentiella energi) är $E_{pot} = Q_2 \cdot V$
- *Elektrisk spänning*: Spänningen U mellan två positioner i rummet är lika med skillnaden i potential mellan positionerna, $U = \Delta V$.

Växelverkan är ömsesidig: "2":an påverkar genom "sitt" fält (och potential) "1":an.

Fältet är en vektor (d.v.s. har både storlek och riktning) och kan representeras med "pilar" eller med "riktade linjer". Linjetätheten är mått på fältets styrka och tangentens riktning anger fältets riktning. Varje punkt i rummet kan sägas innehålla en liten pil som talar om det sammanlagda fältets storlek och riktning i just den punkten. Addition av fält sker därmed på samma sätt som addition av krafter (vektoriellt): Man beräknar pilarnas resultant.

Potentialen däremot är en skalär, d.v.s. den har bara storlek, men ingen riktning.

Fältstyrkan är mått på hur snabbt potentialen varierar i rummet, t.ex. om V varierar endast i en rumsdimension (längs x -axeln) så blir $E = |\mathbf{E}| = \left| \frac{\Delta V}{\Delta x} \right|$. *Obs! Förväxla inte elektrisk fältstyrka med energi, även om beteckningarna kan vara mycket lika.* Potentialen ökar vid förflyttning i en riktning som är helt eller delvis (d.v.s. huvudsakligen) motriktad fältet. Potentialen ändras inte vid förflyttning i en riktning som är vinkelrät mot fältet (eller när man förflyttar sig inne i eller längs ytan på en strömlös perfekt ledare).

Riktningen för $\mathbf{E}$: Ut från en positivt laddad yta, och in mot en negativt laddad yta.

*Fältet och potentialen **utanför** en punktladdning eller en sfäriskt symmetrisk laddningsfördelning med laddningen Q (t.ex. i form av ett tunt likformigt laddat sfäriskt skal, eller ett laddat men strömlöst, perfekt ledande, klot):*

$$E = |\mathbf{E}| = \frac{k \cdot Q}{r^2} \quad (\mathbf{E} \text{ är riktat radiellt ut från ytan om } Q > 0 \text{ och radiellt in mot ytan om } Q < 0)$$

respektive $V = \frac{k \cdot Q}{r}$ där r är avståndet från sfärens centrum. I området **innanför** det sfäriska skalet (eller inne i klotet) är $\mathbf{E} = 0$ och $V = \text{konstant}$ (ej nödvändigtvis noll).

Fältet i området mellan två plattor med laddningen $+Q$ respektive $-Q$:

$E = |\mathbf{E}| = \frac{U}{d}$ (d.v.s. konstant fältstyrka med riktning från positiva plattan till negativa plattan) där U är spänningen mellan plattorna och d är avståndet mellan plattorna. För att formeln ska gälla skall plattornas utsträckning vara mycket större än avståndet mellan dem. Utanför plattorna är $\mathbf{E} \approx 0$. Även följande formel beskriver styrkan hos fältet mellan två plattor:

$E = |\mathbf{E}| = \frac{Q}{\varepsilon \cdot A}$ där A är arean hos ena plattan och ε är en materialkonstant (som kallas permittivitet) för ämnet mellan plattorna. Vakuum och luft har $\varepsilon \approx 8,854 \cdot 10^{-12}$ farad/meter.

Fält och potential inne i goda ledare: $\mathbf{E} = 0$ och $V = \text{konstant}$ (ej nödvändigtvis noll) om ledarens laddning är i statisk jämvikt (strömlös), $\mathbf{E} \neq 0$ och V beror av positionen om ledaren är strömförande (fältet driver strömmen). I en ideal (resistansfri) ledare är $\mathbf{E} = 0$ och $V = \text{konstant}$ även om ledaren är strömförande (denna approximation gör vi nästan alltid i beräkningar i elektriska kretsar).

Energiändring hos partikel som förflyttas i ett område där potentialen varierar med positionen: Om en partikel (med laddningen q) flyttas från position A till position B, så ändras partikelns elektriska potentiella energi med $\Delta E_{\text{pot}} = q\Delta V = q(V_B - V_A) = qU_{BA}$.

Om det är en extern kraft (d.v.s. inte $\mathbf{E}$ -fältet i området), exempelvis ”vi”, som flyttar partikeln och partikelns kinetiska energi är samma (t.ex. noll) i både start- och slutpositionen, så utför den externa kraften ett arbete W som ändrar partikelns totala energi genom att potentiella energin ändras med $\Delta E_{\text{pot}} = W$. Om den potentiella energin ökar eller minskar avgörs av om kraften som arbetar är samriktad med riktningen för flytten ($W > 0$ och $\Delta E_{\text{pot}} > 0$), eller motriktad förflyttningsriktningen ($W < 0$ och $\Delta E_{\text{pot}} < 0$). Notera att tecknet hos partikelns laddning (q) spelar roll för energiändringen, det räcker inte att enbart se om potentialskillnaden (ΔV) är positiv eller negativ. Potentialen är ju en egenskap hos rumspositioner medan energi en egenskap hos ett partikelsystem.

Om partikelns förflyttning orsakas av det elektriska fältet i området (d.v.s. då en extern kraft inte är inblandad ...) så sker detta så att totala energin bevaras $E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}} = \text{konstant}$ vilket innebär potentiell energi övergår i rörelseenergi så att $\Delta E_{\text{pot}} + \Delta E_{\text{kin}} = 0$. Jämför rörelse som sker i jordens gravitationsfält (t.ex. en kula som faller fritt).

Elektrostatisk potential

Potential och spänning: Spänning = potentialskillnad. Punkten där potentialen är noll kan väljas (i vissa fall är detta redan inbyggt i formeln, t.ex. potentialen kring en laddad sfär där man antagit att $V=0$ i positioner på ett oändligt avstånd från sfärens centrum). I kretsar sägs denna punkt vara ”jordad”. Spänningar är mätbara. Potentialens absoluta värde kan enbart mätas om man känner till positionen där potentialen är noll (”jord”), d.v.s. man mäter i så fall spänningen mellan aktuell position och jordad punkt.

Potentialvandring i elektriska kretsar: Potentialen ökar om man förflyttar sig i en riktning helt eller delvis (d.v.s. huvudsakligen) motsatt $\mathbf{E}$ -fältet. I kretsar innebär detta exempelvis att, går man igenom ett batteri från minuspol till pluspol så ökar potentialen (ökningen=batteriets spänning), går man igenom en resistor motsatt strömriktningen (=motsatt det $\mathbf{E}$ -fält som är inne i resistorn och driver strömmen) så ökar potentialen med $R \cdot I$, medan vid förflyttning längs en ideal (resistansfri) ledare (som då blir en ekvipotentiallinje) så ändras inte potentialen.

Kirchhoffs spänningslag: Om man går ett helt varv runt i en slinga, så är summan av alla potentialändringar lika med noll.

Ekvipotentialytor (eller linjer eller volymer) kring laddade kroppar: Ytor (eller linjer) längs vilka potentialen inte ändras. E-fältet är riktat vinkelrätt mot en sådan yta. Ett sätt bestämma dessa ytor är alltså att börja i en punkt och röra sig hela tiden vinkelrätt mot E .

Elektrostatisk energi, kondensator

Kondensator: En komponent som kan binda laddning och lagra energi (i E-fältet), t.ex. en metallyta som inte är i kontakt med andra ledande föremål (isolerad från omgivningen). Förmågan att göra detta beskrivs med egenskapen *kapacitans* (C) som mäts i enheten farad (F). Uppladdning kan ske t.ex. genom anslutning till en spänningskälla med spänningen U och resulterar i $Q = C \cdot U$ och $E_{upplagrad} = \frac{Q \cdot U}{2} = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{Q^2}{2 \cdot C}$.

Obs! Förväxla inte energi & elektrisk fältstyrka trots snarlika beteckningar!

En *plattkondensator* består av två parallella plattor, där plattavståndet (d) är mycket mindre än plattornas utsträckning. Arean för en platta är A och isoleringsmaterialet (dielektrikumet) mellan plattorna har permittiviteten $\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$, där ε_0 ($\approx 8,8542 \cdot 10^{-12}$ farad/meter) är värdet i vakuum ($\approx$ samma i luft) och ε_r är relativa permittiviteten som är en materialberoende koefficient. Plattkondensatorns kapacitans beräknas enligt $C = \frac{\varepsilon \cdot A}{d}$.

Polarisation och isolermaterialets inverkan på kondensatorns egenskaper: E-fältet p.g.a. laddningar på plattorna utövar krafter på laddade partiklar i isolermaterialet; bundna elektroner förskjuts då lite relativt kärnorna (materialet *polariseras*). Denna laddningsförskjutning resulterar i ett "inre E-fält" som är motriktat fältet från plattorna. Om plattorna inte är anslutna till en spänningskälla (laddningen på plattorna är då konstant) så minskar det totala E-fältet och därmed även spänningen mellan plattorna. Om plattorna är anslutna till en spänningskälla (nu är spänningen konstant) så kommer polarisationsladdningarna hos isolermaterialet att attrahera fler laddningar (från källan) till plattorna. Då ökar plattornas laddning och E-fältet p.g.a. av dem, så att det totala E-fältet förblir oförändrat (trots motriktat fält från polarisationen).

Om kondensatorn är del av en "RC-krets" (en seriekoppling av resistor och kondensator ansluts till en spänningskälla) så kan tiden som det tar att ladda upp eller ladda ur kondensatorn beskrivas med "tidskonstanten" $\tau = R \cdot C$. Om en likspänning U_0 ansluts vid tiden noll till RC-kretsen, så har spänningen över kondensatorn vuxit till $\approx 0,63 \cdot U_0$ vid tiden $t = \tau$. Om kondensatorn är fullt uppladdad med spänningen U_0 och laddas ur via en resistor R så har spänningen efter tiden $t = \tau$ sjunkit till $\approx 0,37 \cdot U_0$. Vidare kan man observera att vid uppladdning når strömmen sitt maximum innan spänningen gör det och kondensatorer sägs därför vara "spänningströga".

Parallellkoppling av kondensatorer: Totala upplagrade energin hos de enskilda kondensatorerna = energin hos ersättningskondensatorn. Alla har samma spänning över sig. Sammanlagda kapacitansen är då $C_{total} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$

Seriekoppling av kondensatorer: Samma energibetraktelse som vid parallellkoppling. Men nu har alla samma laddning. Sammanlagda kapacitansen fås då ur

$$\frac{1}{C_{total}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

Magnetisk kraftverkan, magnetfält

Magnetfält & magnetisk kraftverkan: Permanentmagneter och elektriska strömmar omges av ett magnetfält. Samma gäller en laddad partikel i rörelse (motsvarar en transport av laddning, d.v.s. en liten ström). Strömmar (magneter) påverkar andra strömmar (magneter) med en magnetisk kraft. Idén är densamma som vid elektrisk kraftverkan: ett fält, "magnetfältet", förmedlar kraften. Ström 1 omges av fält, ström 2 känner av fältet och påverkas av en kraft med styrkan $F = |\mathbf{F}| = l I B \sin \theta$, där $B = |\mathbf{B}|$ är storleken hos den *magnetiska flödestätheten* $\mathbf{B}$ (enhet tesla=voltsekund/kvadratmeter), l är längden på den del av den strömförande ledande som befinner inom området med magnetfält, I är strömstyrkan i ledaren och θ är vinkeln mellan strömriktningen och magnetfältets riktning. Även storheten *magnetisk fältstyrka* ($\mathbf{H}$, enhet ampere/meter) finns, men den förekommer inte explicit i formeln för kraften. Styrkan hos magnetiska kraften på en partikel med laddningen Q som rör sig med hastigheten $\mathbf{v}$ är $F = |\mathbf{F}| = |Q|v B \sin \theta$, där θ är vinkeln mellan rörelseriktningen och fältets riktning, d.v.s. $\mathbf{v}$ och $\mathbf{B}$.

Att laddade partiklar i rörelse utövar förutom elektriska krafter även magnetiska krafter på varandra bottnar i speciell relativitetsteori. Vilka fält och fältens styrka & riktning som observeras beror på hur observatören rör sig relativt den laddade partikel/strömmen. Exempel: tänk dig en laddad partikel som rör sig med en konstant hastighet relativt observatör 1, medan observatör 2 rör sig precis på samma sätt som partikeln. Då kommer observatör 2, som ser en laddad partikel i vila, att endast registrera ett elektriskt fält. Observatör 1 ser däremot en laddad partikel i rörelse (liten ström) och kommer att registrera såväl ett elektriskt fält som ett magnetfält.

Högerhandsregel för riktningen hos kraften som ett magnetfält utövar på en elektrisk ström (eller en positivt laddad partikel i rörelse): Tummen i strömriktningen, utsträckta fingrar i fältriiktningen, kraften upp ur handflatan. Samma regel kan tillämpas på en positivt laddad partikel i rörelse, men med tummen i partikelns rörelseriktning (tänk partikeln som en "liten ström"). Har partikeln istället negativ laddning så kan man bestämma kraftriiktningen som om partikeln vore positiv och kasta sedan om riktningen 180 grader. Alternativt tänker man sig den negativa partikeln som en ström; strömriktningen är då motsatt partikelns rörelseriktning.

Högerhandsregel för cirkulationsriktningen hos magnetfältet kring en ström: Tummen i strömriktningen, krökta fingrar ger fältets cirkulationsriktning.

Fältbilder: Magnetfält bildar slutna slingor. Inga magnetiska enhetsladdningar (monopoler) har observerats! Fältet kring en rak strömförande ledare bildar med ledarens axel koncentriska cirklar. Flödestätheten på avståndet a från ledarens axel är $B = |\mathbf{B}| = \left| \frac{\mu \cdot I}{2\pi \cdot a} \right|$ där har permeabiliteten $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$, där $\mu_0 (= 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ henry/meter})$ är värdet i vakuum och μ_r är relativa permeabiliteten som är en materialberoende koefficient. För "omagnetiska" material (=de flesta) gäller att $\mu_r \approx 1$ d.v.s $\mu \approx \mu_0$. För magnetiska material (t.ex. järn) så är μ_r ofta flera tusen. [En kommentar: ϵ_0 och μ_0 har med värdet på ljusets fart i vakuum att göra! Det är nämligen så att $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$.]

Fältet kring en permanentmagnet i form av en stav har en dipolform. Riktningen är ut ur magneten på "Nordsidan" (=röd) och in i magneten på "Sydsidan" (=vit). Inne i magneten går $\mathbf{B}$ -fältet från syd mot nord. En kompass riktar sig så att nordändan pekar i magnetfältets riktning.

Elektromagnetisk kraftverkan

- Kraften som ett E -fält utövar på en laddad partikel är riktad längs fältet (antingen samriktad eller precis motriktad): $\mathbf{F}_e = Q\mathbf{E}$.
- Kraften som ett B -fält utövar på en partikel är vinkelrät mot det plan där magnetfältet och partikelns rörelseriktning (ges av "hastighetspilen") ligger: $\mathbf{F}_m = Q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. I formeln har en speciell typ av multiplikation (betecknas med symbolen $\times$, förväxla inte med symbolen för pil riktad in i pappret ...) använts, nämligen "vektorprodukt" (eller "kryssprodukt" som den också kallas.) Vektorprodukten multiplicerar två vektorer ("pilar") på ett sådant sätt att resultatet är en ny vektor med en riktning som ges av högerhandsregeln för magnetiska kraften på en ström. [För fullständighets skull påpekas att det finns även andra sätt att multiplicera två vektorer.]

[En alternativ metod för bestämning av kraftriktningen på en ström är att studera det sammanlagda B -fältet (summan av det externa fältet som utövar kraften och strömmens eget fält). I vissa områden kommer de två fälten att samverka och ge ett förstärkt fält, medan i andra områden kommer de att motverka varandra och ge ett försvagat fält. Kraften på strömmen är riktad dit det totala fältet har försvagats. Man kan jämföra detta med tryckkrafter i gaser där kraften riktas dit trycket avtar.]

- En **observatör** registrerar att fälten utövar en total elektromagnetisk kraft $\mathbf{F} = Q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$ på en laddad partikel. Notera, att storheterna $\mathbf{E}$, $\mathbf{v}$ & $\mathbf{B}$ gäller i det **koordinatsystem** där **observatören är i vila**.
- Angående partikelrörelse och resulterande partikelbanor i områden med elektriskt och/eller magnetfält: Se ett separat dokument.
- En påminnelse om beteckningarna för storleken av vektorer: $E = |\mathbf{E}|$, $B = |\mathbf{B}|$, $v = |\mathbf{v}|$.

Generator- och motorverkan

- Den elektromagnetiska kraften kan användas till att omvandla rörelseenergi till elektrisk energi till ("**generatorverkan**"). Exempelvis kan man låta en (helt eller delvis) joniserad gas eller vätska (som då har fria positivt och negativt laddade partiklar) flöda (med farten v) genom ett område mellan två inledningsvis oladdade plattor (plattavstånd d). I området finns ett magnetfält ($\mathbf{B}$) som avlänskar positiva partiklar till ena plattan och negativa partiklar till den andra plattan. Ett E -fält byggs då upp i området och det resulterar i en spänning mellan plattorna. Elektrisk energi har genererats och lagrats i systemet! Denna typ av generator kallas "MHD-generator", där MHD står för magnetohydrodynamik. När plattorna laddats upp helt är spänningen mellan dem $U = v B d$. Liknande mekanism förekommer i *Halleffekten*, där en elektrisk ström drivs genom ett material som genomkorsas av ett magnetfält. En spänning (s.k. Hallspänningen) byggs upp mellan de två av materialets sidor som är parallella med strömriktningen. Hallsonder används i en del mätinstrument.

- Generatorverkan fås även i en ledande stav som dras fram i ett magnetfält. I och med att staven rör sig så är även dess ledningselektroner i rörelse och känner då av en magnetisk kraft. Resultatet blir att ledningselektroner pressas mot stavens ena ände som laddas negativt (och den andra änden blir därmed positiv). Laddningsseparationen bygger upp ett E -fält och en spänning ($U_{inducerad}$) "framkallas" (induceras) mellan staven ändpunkter. Uppladdningen av staven upphör när $F_e = F_m$ d.v.s. $E = vB$ och spänningen är då $U_{inducerad} = v B d$. Denna typ av spänning som uppstår p.g.a. rörelse i magnetfält kallas också "rörelse-ems" (ems står i andra spänningskällor för elektromotorisk spänning).
- Den elektromagnetiska kraften kan användas till att omvandla elektrisk energi till rörelseenergi ("motorverkan"). Ett exempel på detta är en "MHD-motor" (eller en MHD-pump) där ett elektriskt fält alstras med två uppladdade plattor och ett magnetfält appliceras vinkelrätt mot E -fältet. En (helt eller delvis) joniserad gas eller vätska förs in i området och påverkas där av en elektromagnetisk kraft, som driver gasen/vätskan i en riktning vinkelrätt mot E & B med farten $v_{drift} = \frac{E}{B}$.
- Ett annat exempel på motorverkan är "linjärmotorn" (eller "rälskanonen"), som är en stav som kan glida friktionsfritt längs en räls och accelereras av den magnetiska kraften p.g.a. ett externt magnetfält (B) och strömmen som drivs genom staven m.h.a. en spänningskälla ($U_{batteri}$) som anslutits till rälsen. I samband med detta uppträder dock alltid induktion (se ovan om generator i form av stav), som kan sägas reglera den resulterande accelerationen så att ändlig slutfart resulterar. I vårt fall blir stavens slutfart $v_{slut} = \frac{E}{B} = \frac{U_{batteri}}{B d}$, där E är i staven inducerad elektrisk fältstyrka, $U_{batteri}$ är slutvärdet hos den mellan stavens ändpunkter resulterande inducerad spänning ($U_{inducerad}$), d är längden på den del av staven som är strömförande och ligger i magnetfältet.

Man kan göra en beräkningsmodell av linjärmotorn där den rörliga staven ersätts av en spänningskälla ($U_{inducerad}$). All resistans i ledare, stav etc. läggs in en resistor R . Strömmen i kretsen blir $I = \frac{U_{batteri} - U_{inducerad}}{R}$. När stavens fart (v) ökar, så ökar $U_{inducerad}$ och strömmen (I) avtar. Men detta ger en lägre acceleration (ty kraften beror av strömmen) och en långsammare ökningstakt hos v . $U_{inducerad}$ fortsätter att öka men i lägre takt osv... Slutligen går $U_{inducerad} \rightarrow U_{batteri}$, $I \rightarrow 0$, acceleration $\rightarrow 0$, och $v \rightarrow v_{slut}$.

- Ovan nämnda exempel på *induktion* [det finns ytterligare en mekanism som ger induktion, se nedan] innebär att ett E -fält och en *ems* byggs upp i en ledare som är i rörelse i närvaro av magnetfält. Ledarens ändpunkter har "laddats upp" och vi har då erhållit en *generator*, som omvandlar rörelseenergi (eller generellt sett mekaniskt arbete) till elenergi. Under uppladdningen omfördelas laddning och därmed flyter en ström. Strömmen påverkas av magnetfältet och en bromskraft verkar i en riktning motsatt rörelseriktningen. Ett arbete utförs och generatoren är förknippad med en "motorverkan".
- *Motorverkan & generatorverkan uppträder alltid tillsammans*. I motorer uppstår en motverkande inducerad spänning. I generatorer uppstår en motorverkan som motverkar rörelsen som driver generatoren.

Induktion

- Den elektromagnetiska kraften kan användas till att omvandla elektrisk energi till rörelseenergi ("motorverkan"). Exempel på detta är en stav som kan glida friktionsfritt längs en räls och accelereras av den magnetiska kraften p.g.a. ett externt magnetfält och strömmen som via rälsen drivs genom staven. I samband med detta uppträder dock alltid ett fenomen (induktion) som kan sägas reglera den resulterande accelerationen så att ändlig slutfart resulterar.
- *Induktion, rörelse-ems*: Om en ledande stav med längden d dras med farten v vinkelrätt ett externt magnetfält så induceras en spänning $U_{ind.} = v B d$ mellan stavens ändpunkter ("ems", elektromotoriska spänningen).
- *Induktion, transformator-ems*: En annan mekanism för induktion som inte kräver rörelse bygger på att ett cirkulerande elektriskt fält alltid förekommer tillsammans med ett tidsvarierande magnetfält. E-fältet medför att en inducerad spänning finns mellan rumspositioner. Denna typ av inducerad spänning kallas ibland för "transformator-ems" och beräknas med Faradays induktionslag. Dessutom, om ämnet där magnetfältet varierar är ledande, så driver det cirkulerande E-fältet strömmar (induktionsströmmar).
- *Magnetiskt flöde*: Det magnetiska flödet Φ genom en yta beräknas som $\Phi = B A$. Denna formel förutsätter ett konstant magnetfält (samma storlek och riktning i varje position i rummet) och att det genomkorsar ytan vinkelrätt [om B riktas annorlunda så ska man räkna med den komposant som är vinkelrät mot ytan; om B varierar med positionen så delar man upp området i tillräckligt små delområden, och adderar flödena genom dessa]. Enheten för Φ är weber [Wb], vilket är det samma som en voltsekund.
- *Faradays lag*: Betrakta ett område som genomkorsas av ett magnetfält och anta att området även innehåller en slinga (av ledande material). Notera att magnetfältet inte alstras av slingan utan är ett externt fält p.g.a. andra magneter/strömmar. Om magnetiska flödet Φ genom slingan (d.v.s. dess tvärsnittsytan) varierar i tid, så samexisterar ett cirkulerande elektriskt fält (och en inducerad spänning, elektromotorisk spänning, "ems") i området och i slingan.

Om slingan är sluten (och ledande, med resistansen R) så fås en inducerad ström ($i_{inducerad} = \frac{u_{inducerad}}{R}$). Lika hög ström fås också i fallet med en slinga med resistansen noll, som klipps upp så att en last i form av en resistor (med resistansen R) kan anslutas till slingans ändpunkter. Slingan har nu rollen av en spänningskälla och spänningen mellan dess ändpunkter har en polaritet så att strömmen genom lasten flyter från plus till minus, medan strömmen *inne* i slingan flyter från minus till plus (d.v.s. precis som i ett batteri).

Spänningen beräknas med *Faradays induktionslag*: I en slinga med tvärsnittsarean A och *ett* varv ledning induceras en spänning med storleken $|u_{inducerad}| = \left| \frac{d\Phi}{dt} \right|$ där $= BA$ (här antas att B genomkorsar slingans öppning vinkelrätt). Består slingan av N varv ledning så blir $|u_{inducerad}| = N \left| \frac{d\Phi}{dt} \right|$. Tar man hänsyn till "referenspolariteter" m.m. så skrivs induktionslagen: $u_{inducerad} = -N \frac{d\Phi}{dt}$. Om man ritar en graf av $u_{inducerad}$ som funktion av tiden, så är *arean* under grafen lika med $N \cdot |\Delta\Phi|$ där

$|\Delta\Phi| = |\Phi_{slut} - \Phi_{start}|$ är nettoändringen av magnetiska flödet genom slingans tvärsnittsarea under tidsintervallet $\Delta t = t_{slut} - t_{start}$ som induktionen varar. Arealen har enheten voltsekunder.

- *Lenz lag:* Minustecknet i Faradays lag innebär att *induktionsströmmen är riktad så att den motverkar sin uppkomst*. Strömmens eget magnetfält (genom slingan) har alltså en sådan riktning att den är motriktad *förändringen* hos det externa flödet Φ .

Det finns flera metoder för bestämning av strömriktningen. Rekommendationen är att lära sig metod 1 ordentligt, och därefter *eventuellt* ge sig i kast med 2 & 3.

Metod 1: Bestäm riktningen hos det externa flödets *förändring* ($\Delta\Phi$) d.v.s. skillnaden mellan pilarna som beskriver flödet strax efter respektive innan förändringen (tidsdifferensen mellan "efter" och "innan" skall vara litet då det är *tidsderivatan* av flödet som är av intresse). Enligt Lenz lag är induktionsströmmens riktning sådan att den motverkar förändringen hos det externa flödet, $\Delta\Phi$. Magnetiska flödet p.g.a. induktionsströmmen är alltså motriktat förändringen. Högerhandsregeln för ström och dess eget fält ger nu induktionsströmmens riktning (krökta fingrar *motsatt* $\Delta\Phi$ och tummen ger strömriktningen).

Metod 2: Se det externa flödet som orsakat av en magnet som förflyttas och därmed ger en flödesändring genom slingan. Bestäm riktningen för flödesförändringen och utred hur en magnet ska röra sig för att ge samma förändring (d.v.s. vilken magnetisk pol som är närmast slingan och om magneten ska närma sig eller fjärma sig slingan). Slingans reaktion blir att motverka förändringen genom att själv bli en magnet med lämplig pol riktad mot magneten. Exempelvis, om det externa flödet har sin nordpol mot slingan och flyttas närmare, så ökar det externa flödet genom slingan. Då induceras en ström så att slingan blir en magnet med nordpolen riktad mot externa magneten, som då repelleras.

Metod 3: Bestäm riktningen för flödesförändringen och tillämpa följande *vänsterhandsregel*: tummen i flödesändringsriktningen = tummen *längs* (samriktad) $\Delta\Phi$, krökta fingrar ger induktionsströmmens riktning.

- *Självinduktion.* Om förändringen i magnetiska flödet genom en slinga orsakas av en förändring i slingans egen ström så uppträder även i detta fall en inducerad *ems* och en induktionsström. I en elektrisk krets kan den självinducerade *ems:n* koncentreras i ett litet område, genom att ha med en komponent som består av en ledning som har lindats ett stort antal varv. Magnetflödet p.g.a. slingans egen ström genomkorsar då totalt sett en stor area (=summan av varje individuell varvs area; tänk dig att alla varven skulle rätas ut). Denna typ av komponent, som "binder" ett magnetiskt flöde samt lagrar energi i magnetfältet så länge som ström flyter genom den, kallas *induktor* (spole, drossel). Förmågan att lagra flöde och energi beskrivs av storheten *induktans* (beteckning L , enhet henry [H]). L beror av materialet som genomkorsas av magnetfältet och geometrin hos lindningen. Exempelvis för en solenoid (N varv, längd l , tvärsnittsarea A) är $L = \frac{\mu N^2 A}{l}$.

- Vid en given strömstyrka i är det sammanlagda flödet genom en induktor med N varv ledning $\Phi_{total} = N \cdot \Phi = L \cdot i$ (ty flödet genom *ett* varv, d.v.s. induktorns tvärsnittsarea är $\Phi = BA$) och den i induktorn upplagrade energin $E_{upplagrad} = \frac{L \cdot i^2}{2}$. Jämför motsvarande formler för laddningen respektive upplagrade energin i en kondensator.
- Om induktorn är del av en "RL-krets" (en seriekoppling av resistor och induktor ansluts till en spänningskälla), så kan tiden som det tar att *magnetisera* (=bygga upp ett magnetfält) eller *avmagnetisera* (=bli av med magnetfältet) induktorn beskrivas med tidskonstanten $\tau = L/R$. Om en likspänning U_0 ansluts vid tiden noll till RL-kretsen, så har strömmen genom induktorn vuxit till $\approx 0,63 \cdot I_0$ (där $I_0 = U_0/R$ är strömmens slutvärde) vid tiden $t = \tau$. Om induktorn är fullt magnetiserad med strömmen I_0 och avmagnetiseras via en resistor R så har strömmen efter tiden $t = \tau$ sjunkit till $\approx 0,37 \cdot I_0$. Vidare kan man notera att vid magnetisering når strömmen sitt maximum efter att spänningen gör det och induktorer sägs därför vara "*strömtröga*". Jämför egenskaperna hos en RC-krets, där kondensatorn är "*spänningströg*".
- *Induktionslagen (Faradays lag i kretsar)*: När strömmen $i(t)$ genom induktorn är tidsvarierande så beräknas den inducerade spänningen av följande form av Faradays lag, $u_{inducerad} = -L \frac{di}{dt}$. Ofta betecknas spänningen över induktorn med u_L . Induktorn blir därmed en spänningskälla som försöker att fortsätta ha samma ström genom sig som innan, d.v.s. *polariteten blir sådan att förändringar motverkas* (denna bestäms med liknande resonemang som tidigare för flödesändringar; ta reda cirkulationsriktningen för *strömförändringen* (Δi) och lägg en polaritet hos induktorn så att detta motverkas, löst talat kan man säga att induktorn *försöker* driva ström i motsatt riktning...). Man kan också säga att induktorn fördröjer strömändringar. Då spänningen beror av strömmens tidsderivata, så kan det under ett kort ögonblick uppstå mycket höga spänningar om strömmen bryts i en induktiv krets (krets som innehåller induktor(er)).

Avslutningsvis kan man uttrycka en slingas natur som sådan att den är "nöjd" med det magnetiska flöde som den har just nu och motsätter sig alla förändringar. Dock ger den med sig efter att först ha stretat emot och accepterar så småningom det nya flödet... En induktor är därmed "nöjd" med strömstyrkan som den har just nu och motsätter sig (fördröjer) strömförändringar.

Jämför med en kondensator, som i sin tur är "nöjd" med spänningen mellan plattorna just nu och motsätter sig spänningsförändringar.

Generellare sagt, så motverkar en kondensator förändringar hos det "elektriska flödet" mellan plattorna. Elektriskt flöde = $\epsilon \cdot E \cdot A$, där ϵ = permittiviteten hos materialet mellan plattorna, A = plattarean och E = elektriska fältstyrkan.