

Forelesning i Fysikk 6.

Magnetiske Felt
og Magnetiske krefter

Hans Jakob Rivertz
IDI-avdeling-kalvskinnet
19. november 2019

Plan

Mål for timen

Magnetisme

Magnetiske felt og feltlinjer

Magnetisk fluks

Ladde partikler i bevegelse i magnetiske felt

Anvendelser med ladde partikler i bevegelse

Magnetisk kraft på strømførende leder

Krefter og kraftmoment på strømsløyfer og Likestømsmotorer

Hall-effekten



Mål for timen



- Kjenne til magnetiske krefter felt og feltlinjer.
- Kjenne til hvordan ladde partikler beveger seg i elektrisk felt.
- Kjenne til hva magnetisme kan brukes til.
- Kunne regne ut kraften fra et magnetfelt på en strømførende leder.
- Kjenne prinsippene bak en likestrømsmotor.
- Kjenne til Hall-effekten

Oversikt



Mål for timen

Magnetisme

Magnetiske felt og feltlinjer

Magnetisk fluks

Ladde partikler i bevegelse i magnetiske felt

Anvendelser med ladde partikler i bevegelse

Magnetisk kraft på strømførende leder

Krefter og kraftmoment på strømsløyfer og Likestømsmotorer

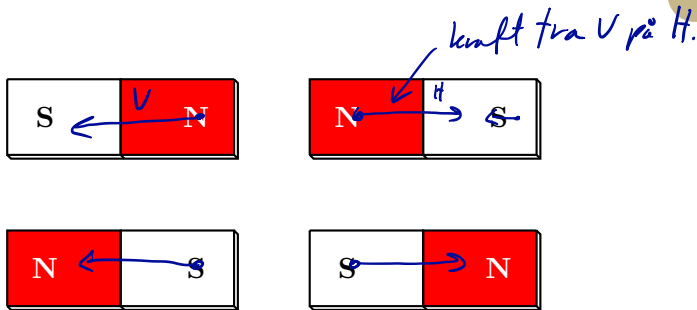
Hall-effekten

Magnetisme



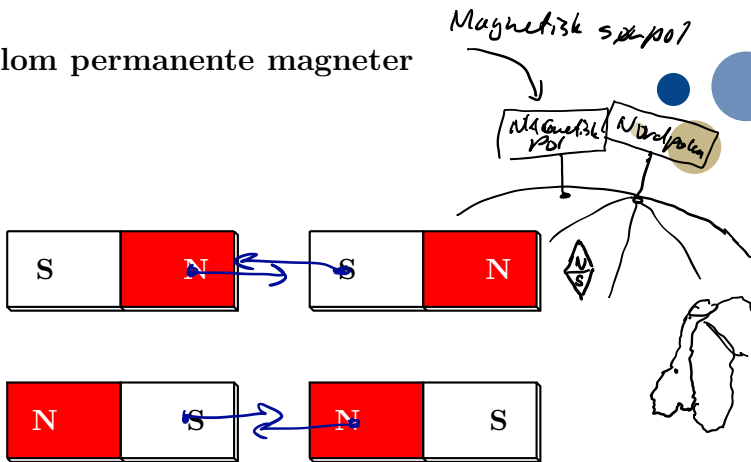
- Magnetiserte biter av jern ble oppdaget for minst 2500 år siden ved byen **Magnesia**.
- Disse var såkalte **permanente magneter**.
- Permanente magneter tiltrekker og frastøter andre permanente magneter alt etter hvordan de snus mot hverandre.
- Permanente magneter tiltrekker også umagnetisk jern.

Krefter mellom permanente magneter



Figur: Like poler frastøter hverandre

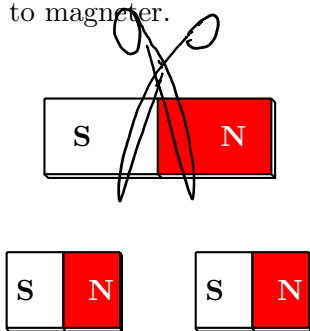
Krefter mellom permanente magneter



Figur: Ulike poler tiltrekker hverandre

Deling av magneter og monopoler

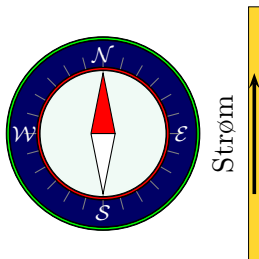
Det er aldri blitt påvist magnetiske monopoler. Om man deler en magnet i to blir den til to magneter.



Figur: Oppdeling av magneter gir to mindre magneter.

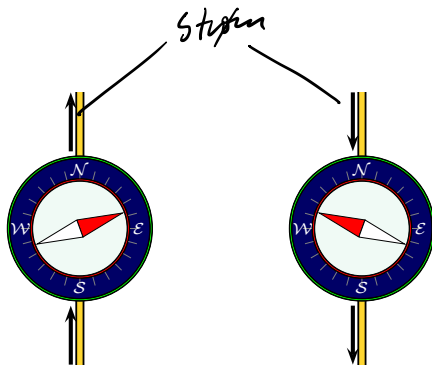
Magnetisme og elektrisitet

Lenge trodde man at magnetisme og elektrisitet ikke hadde noe med hverandre å gjøre.



Dette forsøket ble gjort i fysikkforelesninger. Strømmen i lederen til høyre ga ikke synlig utslag på magnetnålen.

Ørsted's oppdagelse



Dette skjedde da Ørsted la kompasset oppå lederen i stedet for ved siden av lederen.

Oversikt



Mål for timen

Magnetisme

Magnetiske felt og feltlinjer

Magnetisk fluks

Ladde partikler i bevegelse i magnetiske felt

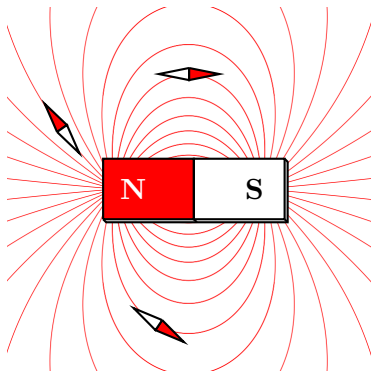
Anvendelser med ladde partikler i bevegelse

Magnetisk kraft på strømførende leder

Krefter og kraftmoment på strømsløyfer og Likestømsmotorer

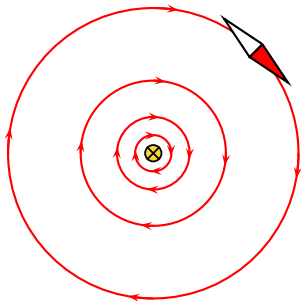
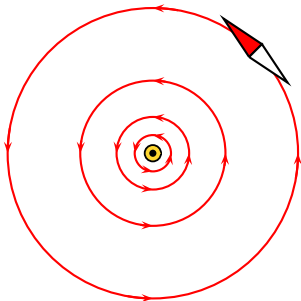
Hall-effekten

Magnetiske feltlinjer



Kompassnålene peker langs feltlinjene.

Feltlinjene rundt en leder



Magnetisk felt

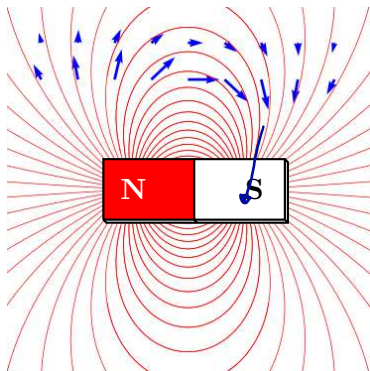


Det magnetiske feltet beskrives som et vektorfelt \mathbf{B} , det vil si i hvert punkt (x, y, z) er det en vektor

$$\mathbf{B}(x, y, z, t). \quad \text{ved tiden } t.$$

- Retningen til \mathbf{B} er i samme retning som feltlinjene (Den veien de røde pilene peker.)
- Feltet er sterkere når linjene er tette og svakere der det er mer rom mellom linjene.

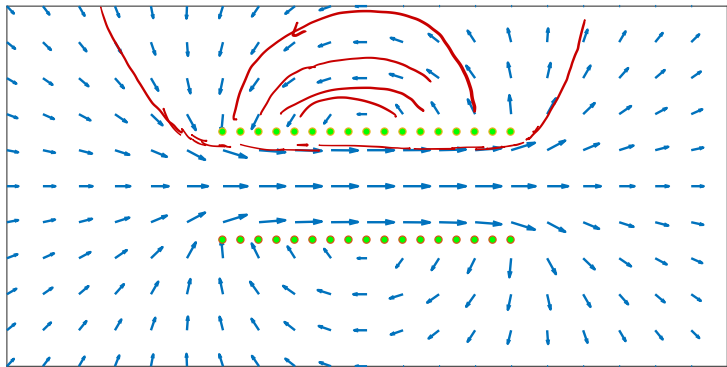
Magnetisk felt



- Lengden på pilene angir styrken på \mathbf{B} -feltet.
- Feltet er tegnet i kun utvalgte punkter.
- Sammenhengen mellom feltstyrke og krefter på ladninger er **ikke** som for elektrisk felt.

Feltet rundt en spole

Figuren under viser magnetfeltet rundt en spole i et plan som deler spolen i to på langs. (Korte vektorer er tegnet lengre enn de er.)



En spole er en elektrisk leder som er kveilet opp på en sylinder.

Oversikt



Mål for timen

Magnetisme

Magnetiske felt og feltlinjer

Magnetisk fluks

Ladde partikler i bevegelse i magnetiske felt

Anvendelser med ladde partikler i bevegelse

Magnetisk kraft på strømførende leder

Krefter og kraftmoment på strømsløyfer og Likestømsmotorer

Hall-effekten

Magnetisk fluks

Magnetisk felt kalles ofte for **magnetisk flusktetthet**. Vi måler flusktetthet i Tesla, [T]. Fluks måles i Weber [Wb]. Det er flere måter vi kan beskrive magnetisk fluks.

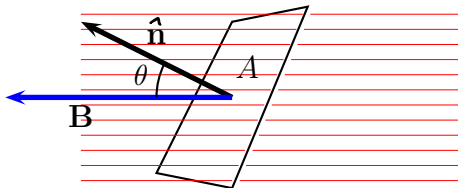
- Den magnetisk fluksen igjennom et areal A angir hvor mange feltlinjer som går igjennom arealet.
- Om arealet A er lite og \mathbf{B} står normalt på A så er den magnetiske fluksen gjennom A lik

$$\Phi_{\mathbf{B}} = A \cdot B.$$

- Om arealet A er lite og vinkelen mellom \mathbf{B} og normalen til A er θ så er den magnetiske fluksen gjennom A lik

$$\Phi_{\mathbf{B}} = A \cdot B \cdot \cos \theta.$$

Magnetisk fluks



$$\Phi_B = A B \cos \theta = A \hat{n} \cdot \vec{B}.$$

\hat{n} er en
enhets vektor.

$$\hat{n} = [a, b, c]$$

$$a^2 + b^2 + c^2 = 1.$$

Oversikt



Mål for timen

Magnetisme

Magnetiske felt og feltlinjer

Magnetisk fluks

Ladde partikler i bevegelse i magnetiske felt

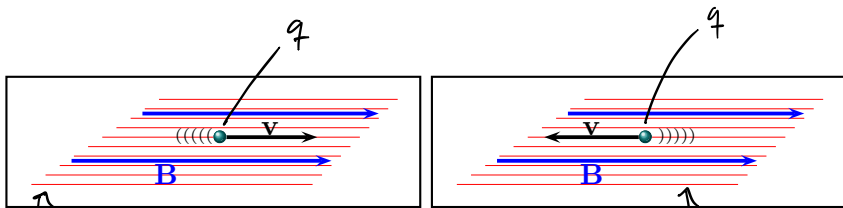
Anvendelser med ladde partikler i bevegelse

Magnetisk kraft på strømførende leder

Krefter og kraftmoment på strømsløyfer og Likestømsmotorer

Hall-effekten

Ingen magnetisk kraft på ladning i bevegelse parallelt med feltet



Det er ingen krefter på partikkelen når vinkelen mellom hastigheten og partikkelen er null grader.

Vinkel mellom
 \vec{v} og \vec{B} er 0°

Vinkel mellom
 \vec{v} og \vec{B} = 180°

Magnetiske krefter på ladninger i bevegelse



Kraften fra et magnetfelt på en ladning i bevegelse er

- Proporsjonal med magnetfeltets styrke.
- Proporsjonal med ladningens absolutte størrelse
- Proporsjonal med farten til ladningen
- Proporsjonal med sinus til vinkelen mellom farten og magnetfeltet.

Forrige side $\sin \theta = 0$.

$\theta = 180^\circ$, $\theta = 0^\circ$ da farten er
parallel med magnetfeltet

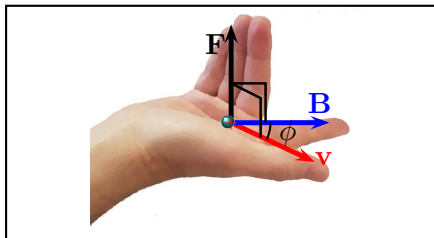
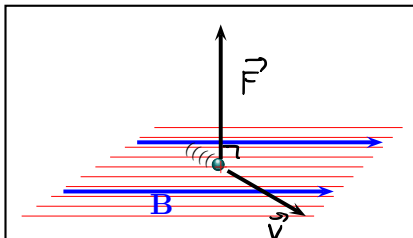
Magnetiske krefter på ladning i bevegelse, vektorform

Kraften som virker på en ladning q med hastighet \mathbf{v} i et magnetfelt \mathbf{B} er lik

$$\vec{F} \perp \vec{v} \text{ og } \mathbf{B}$$

$$\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}.$$

$$|\vec{F}| = q |\vec{v}| |\vec{B}| \cdot \sin\phi$$



Retningen til \mathbf{F} er bestemt ved “**Høyrehåndsregelen**” som vist i figuren til høyre.

Magnetiske enheters relasjoner til andre SI-enheter

Vi skriver om enhetene for flukstetthet \mathbf{B} og fluks Φ_B .

- Fra formelen $F = |q|vB \sin \phi$ fås

$$|B| = \frac{|F|}{|q| \cdot |v| \cdot \sin \phi}$$

$$1 \text{ T} = 1 \text{ N s/C m}$$

$$= 1 \text{ N/A m}$$

$$= 1 \text{ Wb/m}^2.$$

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \hat{n} \cdot A$$

- Fra den spesielle formelen for fluks $\Phi_B = A \cdot B \cos \theta$, fås at

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ N m/A}$$

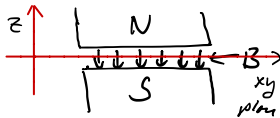
$$= 1 \text{ J/A}$$

$$= 1 \text{ V s.}$$

Eksempel på ladning i bevegelse i uniformt magnetfelt

Et magnetfelt er **uniformt** i et område hvis det har samme retning og størrelse i området. En ladet partikkel som har hastighet vinkelrett på et uniformt magnetfelt beveger seg i en sirkelbane med radius.

$$R = \frac{mv}{qB}.$$



Posisjon $(x(t), y(t)) = R(\cos \omega t, \sin \omega t)$.

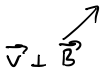
Hastighet $(x'(t), y'(t)) = R\omega(-\sin \omega t, \cos \omega t)$. Fart $v = R\omega$.

Akselerasjons vektor $(x''(t), y''(t)) = -R\omega^2(\cos \omega t, \sin \omega t)$.

Akselerasjon i sirkelbevegelse $a = R\omega^2 = v^2/R$

Løser følgende for R :

$$qvB = F = ma = mv^2/R.$$



Anvendelse: Syklotron

partikkelen akselereres av E-feltet vekselvis mot høyre og venstre.

Bane farten $\omega = \frac{v}{R}$ konstant

$$R = \frac{mv}{qB} \quad \omega = v \frac{qB}{vm} = \frac{qB}{m}$$

Innviden grunnleggende faser

til $\omega = \frac{qB}{m}$, Akselerasjon

synkronisert med banen.

Radiusen øker jevnt med farten

$$B = 2.37 \text{ T} \quad m = m_p \quad R_{\text{max}} = 1.2 \text{ m} \quad q = 1.603 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

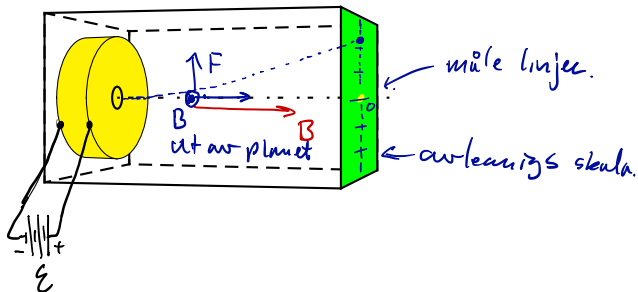
$$v_{\text{max}} = \frac{R_{\text{max}} q B}{m_p} =$$



Kilde gir både partiklen av ladning q $m = m_e, e_p$

Måling av magnetisk felt

Vi kan bruke formelen $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ til å måle magnetfelt. Den gule boksen sender ut en stråle av elektroner med konstant hastighet v . Elektronene lager et lyspunkt på den grønne fluoriserende skjermen. Lyspunktet er i midten når strålen er parallell med feltet. Vrir man 90 grader vil vi kunne lese av størrelsen til B .



Oversikt



Mål for timen

Magnetisme

Magnetiske felt og feltlinjer

Magnetisk fluks

Ladde partikler i bevegelse i magnetiske felt

Anvendelser med ladde partikler i bevegelse

Magnetisk kraft på strømførende leder

Krefter og kraftmoment på strømsløyfer og Likestømsmotorer

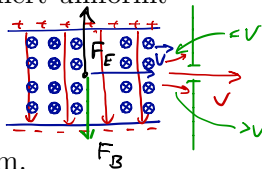
Hall-effekten

Anvendelser av ladde partikler i bevegelse

Massespektroskop (Eksperiment for å veie atomer.)

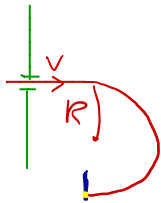
- Først akselereres en ladet partikkel i et elektrisk potensial.
- Så sorteres de med ønsket hastighet i et kombinert uniformt elektrisk felt og uniformt magnetfelt.

$$F_E = qE_0, F_B = qvB_0.$$



Partiklene med farten $v = E_0/B_0$ farer rett frem.

- Så bøyes partikkelstrålen i et uniformt magnetfelt. Vi måler radiusen R til banen og finner massen



$$m = \frac{RqB}{v}$$

Eksempel

Atomer av karbon ioniseres slik at de har ladning $-1e$. Ionene aksellereres til 300000 m/s . Magnetfeltet i massespektroskopet er $B = 0.100 \text{ T}$ og radius måles til 43.5 cm . Hvilken isotop er det snakk om?

C_{12} eller C_{14}

$$m = \frac{RqB}{v} = \frac{43,5 \cdot 10^{-2} \text{ m } 1,603 \cdot 10^{-19} \text{ C } 0,1 \text{ T}}{3 \cdot 10^5 \text{ m/s}} =$$



Oversikt



Mål for timen

Magnetisme

Magnetiske felt og feltlinjer

Magnetisk fluks

Ladde partikler i bevegelse i magnetiske felt

Anvendelser med ladde partikler i bevegelse

Magnetisk kraft på strømførende leder

Krefter og kraftmoment på strømsløyfer og Likestømsmotorer

Hall-effekten

Kraft fra magnetfelt på strømførende leder.



Benevningen for magnetfelt er Tesla, T. Formelen $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ gir at

$$\text{N} = \text{C Tm/s} = \text{AmT}.$$

Det vil si: **Strøm** ganger **lengde** ganger **magnetfelt**, eller

$$F = I L B.$$

$$1\text{N} = 1\text{A m T}$$
$$T = \frac{\text{N}}{\text{Am}}$$

Formelen er riktig men fremgangsmåte er ikke 100% god. Alikevel virker denne måten å finne formler på overraskende ofte. metoden kalles **dimensjonsanalyse** og er god til komme på formeler.

Kraft fra magnetfelt på strømførende leder.



Gitt en rett leder som har lengde L og som fører strømmen I og at denne lederen befinner seg i et magnetfelt \mathbf{B} . La \mathbf{L} være en vektor med lengde L og retning i strømmens retning i lederen. Da er kraften som virker på lederen lik

$$\mathbf{F} = I \mathbf{L} \times \mathbf{B}.$$

Kraften som virker på lederen er summen av kraften på hvert enkelt-elektron i lederen.

Utleiding av formelen for kraft på strømførende leder.

Fra forelesning 4 hadde vi

$$I = n|q|v_d A$$

der n er antall frie elektroner per kubikkmeter, v_d er drifthastighet, q er ladningen til elektronet og A er lederens tverrsnitt. La L være lengden til lederen. Da er

$$I \mathbf{L} = (nLA)q\mathbf{v}_d = N q \mathbf{v}_d$$

der N er antall frie elektroner i lederen. Da er

$$I \mathbf{L} \times \mathbf{B} = N q \mathbf{v}_d \times \mathbf{B} = \mathbf{F}.$$

Eksempel

En leder som ligger i øst-vest retning har lengde $L = 10.0$ cm leder en strøm på $I = 2.3$ A i retning øst. Et magnet felt har retning nord-vest og styrke $B = 1.43$ T. Finn kraften fra magnetfeltet på lederen. Hvilken retning virker kraften.

Oversikt



Mål for timen

Magnetisme

Magnetiske felt og feltlinjer

Magnetisk fluks

Ladde partikler i bevegelse i magnetiske felt

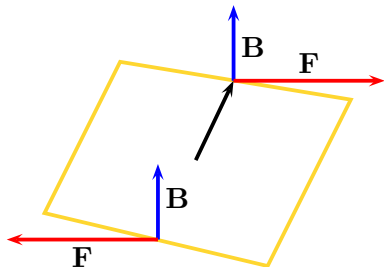
Anvendelser med ladde partikler i bevegelse

Magnetisk kraft på strømførende leder

Krefter og kraftmoment på strømsløyfer og Likestømsmotorer

Hall-effekten

Kraftmoment på strømførende sløyfe i magnetfelt.



Kraftmomentet på sløyfen er definert ved arm ganger kraft. I dette tilfellet er det to krefter og to armer:

$$\tau = 2\mathbf{a} \times \mathbf{F}$$

Prinsippet bak likestømsmotorer

Ved å sørge for at strømmen snur ved hver halve omdreining av sløyfen i forrige foil vil kraftmomentet ha samme retning hele tiden. Det gjør at sløyfen dreier samme retning hele tiden.



Oversikt



Mål for timen

Magnetisme

Magnetiske felt og feltlinjer

Magnetisk fluks

Ladde partikler i bevegelse i magnetiske felt

Anvendelser med ladde partikler i bevegelse

Magnetisk kraft på strømførende leder

Krefter og kraftmoment på strømsløyfer og Likestømsmotorer

Hall-effekten

Hall-effekten

I et metall er det elektroner som beveger seg. Atomkjernene holder seg i ro. I en såkalt p-type leder er det (hull) en slags positive “partikler” beveger seg mellom atomene. Det finnes et eksperiment som kan teste ut dette. Det bygger på Hall-effekten.

Prinsippet bak Hall-effekten

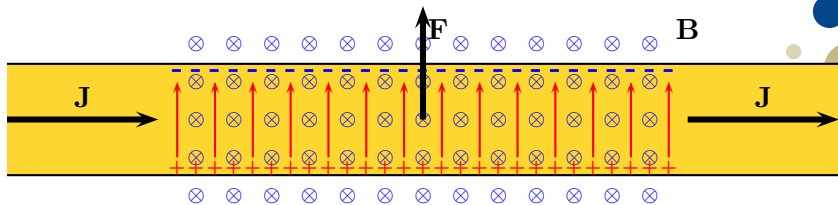


Uansett hvilken ladning ladningsbærerene i en leder har vil de påvirkes av kraften

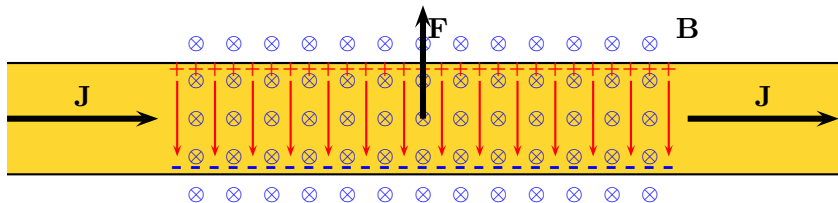
$$\frac{1}{N} I \mathbf{L} \times \mathbf{B}$$

der N er frie ladningsbærerene i lederen. De vil da bevege seg i kraftens retning med mindre en motsatt rettet like stor elektrisk kraft virker. Ved likevekt vil det være overskudd av ladningsbærere på den siden av lederen kraften virker.

Negativ ladningsbærer:



Positiv ladningsbærer:



Måling av tetthet av frie elektroner.



Vi kan bruke halleffekten til å måle antall frie elektroner.

Stabilitet oppstår når

$$qE + qv_d B = 0$$

Strømtettheten er $J = nqv_d$ Vi får da formelen

$$n = \frac{JB}{Eq}$$