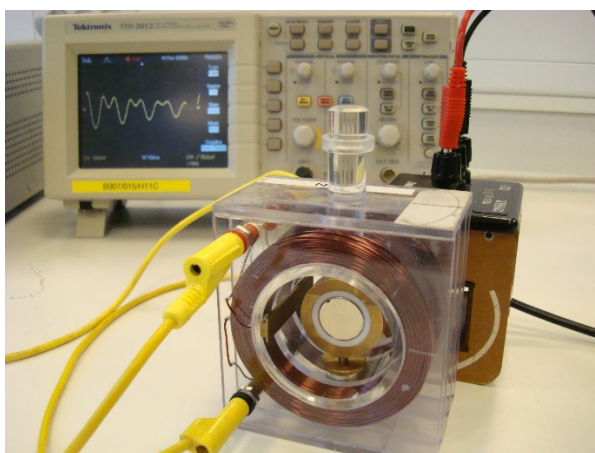


Elektromagnetisme – ”Ånden i naturen” ...og hvad deraf fulgte

Hans Christian Ørsted, en helt i dansk naturvidenskab
Nanoteket, DTU Fysik





Ørsted som ung. Kobberstik af Gilles-Louis Chrétien, ca. 1800. Foto: Teknologihistorie DTU. Fra [1]. H. C. Ørsted var en ledende kraft i oprettelsen af Polyteknisk Lærestalt (nu Danmarks Tekniske Universitet, DTU).

Copyright: Hel eller delvis gengivelse af denne vejledning er tilladt med kildeangivelse.

Forsidebilleder: Øverst: Svingning af permanent magnet i Helmholtzspole, Nanoteket, DTU Fysik, Nederst: Hans Christian Ørsted, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=192090>.

Tak til Mogens Stibius Jensen + Jørn Otto Bindslev Hansen for ideer og hjælpsomme kommentarer.

Rettelser til: ole.trinhammer@fysik.dtu.dk

Indledning

Med lidt god vilje kan man se den svingende magnet på forsiden som en glorie over Ørsteds hoved. Vi skriver at han er en helt. Man kunne forestille sig, at vi havde skrevet, at han var en helgen. Men det ville ikke være en rigtig betegnelse. Helgener æres for åbenbaringer, som andre kan tro på. Videnskabelige helte fremsætter teorier og rapporterer om eksperimenter. Men de står først til troende, når andre har gennemprøvet dem. I denne øvelse skal I arbejde med de fænomener og teknologier, som fulgte af Hans Christian Ørsteds opdagelse af "Den elektriske vekselkamp" – som han selv kaldte det. I dag kalder vi det elektromagnetisme. Det skrives som et ord, fordi det skal udtrykke, at med elektromagnetismen har elektriske og magnetiske fænomener fundet en fælles beskrivelse.

I Helmholtz-spolen på forsiden løber en jævnstrøm, som danner et nogenlunde homogent magnetfelt. Den ophængte cylinderformede magnet svinger frem og tilbage som en magnetnål vil gøre det i Jordens magnetfelt. Den svingende magnet inducerer en spænding i den sorte opsamlingspole som skimtes bag Helmholtz-spolen og som er koblet til oscilloskopet i baggrunden. Med denne opstilling er det muligt at bestemme det magnetiske moment for den svingende magnet, dvs. magnetens "styrke". Der er ikke langt til at forestille sig, at man kan bygge en elektromotor med en lignende konstruktion, hvor vekselstrøm i spolen holder gang i magnetens bevægelse. I dag er anvendelsen af elektromotorer overordentlig udbredt og særdeles effektive. Helt op til 95 % af den elektriske energi, der sendes ind i en elektromotor kan omdannes til mekanisk arbejde (trække og løfte ting). Dette takket være ingeniørmæssig snilde og et nu meget grundigt kendskab til vekselvirkningen mellem elektricitet og magnetisme. Et kendskab der historisk forudsatte Ørsteds opdagelse af, at når man sender strøm gennem en leder, vil en magnetnål i nærheden slå ud. Det er i år 2020 netop 200 år siden han gjorde sin opdagelse. Hans egen verdensopfattelse blev bestyrket af opdagelsen, som jo viste en "enhed" i naturen idet elektricitet og magnetisme viste sig at være forbundne fænomener. Han skrev faktisk en bog om sine tanker "*Aanden i Naturen*". Det blev Michael Faraday der som den første konstruerede en simpel motor, der virker ved elektricitet og magnetisme. Denne står stadig til skue på The Royal Institution i London, hvor Faraday arbejdede. Faraday er bedst kendt for sin opdagelse af induktion [2] kun 11 år efter Ørsteds opdagelse. Og i 1873 blev det James Clerk Maxwell [3], der som den første opstillede de samlede formler, som beskriver elektromagnetismen matematisk, samlet i hans "*A Treatise on Electricity and Magnetism*" – 53 år efter Ørsteds opdagelse.

Det fremføres ofte, at Ørsted gjorde sin opdagelse ved en tilfældighed. Så vidt vi har kunnet læse os til, er det korrekt, at han opdagede magnetnålels udsving under en forelæsning, hvor han havde udstyr fremme til demonstrationsforsøg. MEN, han havde haft "vekselkampen" mellem elektricitet og magnetisme i tankerne længe allerede da. Det ses tydeligt af dette citat: "Samtidig skulle man forsøge, om man ikke i en af de tilstande, hvori elektricitet er meget forbunden, kunne frembringe en virkning på magneten som magnet. Sagen ville ikke være uden vanskeligheder, fordi elektriciteten ville virke på det magnetiske legeme som på det umagnetiske; måske var det dog muligt at få noget information herom gennem sammenligning af magnetiske og ikkemagnetiske nåle." Citatet er fra bogen *Ansicht Der Chemischen Naturgesetze*, som blev udgivet i 1812, altså 8 år før han gjorde sin store opdagelse. Vi har citatet fra reference [1].

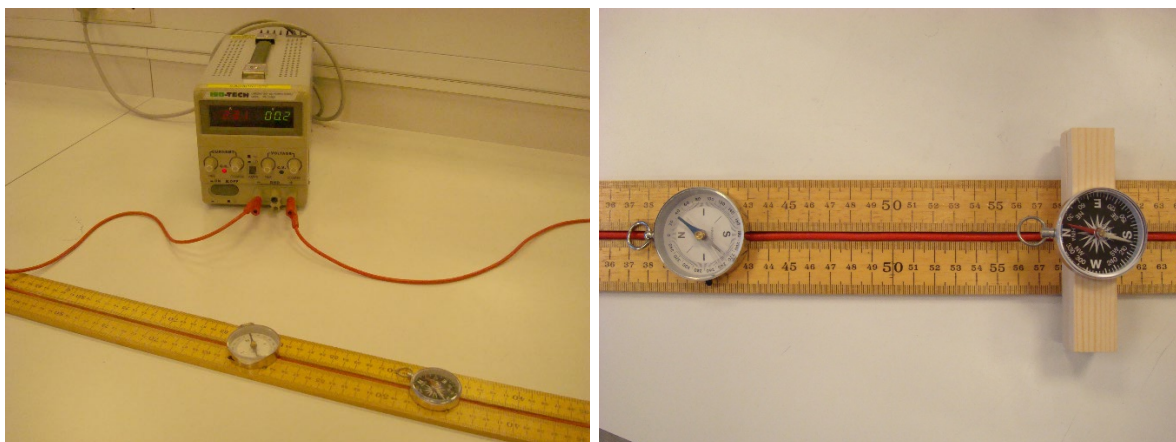
Hans Christian Ørsted var ikke særlig interesseret i en matematisk naturbeskrivelse og havde diskussioner herom med den franske matematiker André-Marie Ampère, som var den første til at sætte vekselvirkningen mellem strømelementer på formel. Ampère var til gengæld ikke så god til at få sine forsøg til at virke, da han skulle demonstrere dem for Ørsted. Man kan sige om Hans Christian som om pigen hvis skudsmålsbog jeg læste engang på et lille museum i Sydsjælland: "Forstår at se, og drage slutninger af det set"! Ørsted var klar over at han havde opdaget en "tværkraft" og denne form for kraft brød med de kendte centralkræfter: Newtons masseiltækning og Coulombs elektrostatisk kraft [4]. Den mere udviklede form for vekselvirkning gjorde det vanskeligere at sætte kraften på formel.

Læs mere om Hans Christian Ørsted og elektromagnetismen i nyhedsbrevet fra DTU Teknologihistorie [1] og i temanummeret fra Kvant [4]. Kig også på hjemmesiden for 200-året [5].

Eksperimenter

- | | |
|----------------------|--|
| 1 Magnetnål i sving | (magnetnål påvirket af strømførende leder) |
| 2 Jordens magnetfelt | (måling af komponenter) |
| 3 Faradays motor | (video + konstruktion) |
| 4 Induktion | (leg med spoler) |
| 5 Magnetisk moment | (magnet i Helmholtzspole) |

1 Magnetnål i sving



Figur 1: Ørsted's forsøg. Løfter man kompassene, vil man se hvordan magnetfeltet aftager med voksende afstand til lederen. Se også eksperiment 2 med tangensboussole til bestemmelse af Jordens magnetfelt (fr. boussole = kompas). Positionerne på meterstokkene bruges ikke i dette forsøg. Stokken havde bare en passende tykkelse og længde til at holde ledningen!

2 Jordens magnetfelt

Udstyr: Kompas m/træstykker til underlæg, Helmholtzspole ($N = 130$), strømforsyning, prøvemagnet og vinkelmåler.

Udførelse: Kompasset placeres vandret midt i en slukket Helmholtzspole. Hvilken vej skal spolen vende, for at dens magnetfelt B_{spole} kommer til at stå vinkelret på jordfeltets vandrette komponent $B_{Jord,vandret}$? Når spolen tændes vil magnetnålen rette sig ind efter det samlede vandrette magnetfelt. Det betyder, at nålen drejer en vinkel ϕ , således at (tegn skitse og overvej)

$$\tan \phi = \frac{B_{spole}}{B_{Jord,vandret}}$$

Helmholtzspolen er konstrueret med en afstand mellem de to delspoler som er lig med radius af spolerne. Det betyder, at feltet B_{spole} bliver nogenlunde homogent. Det kan findes af formlen

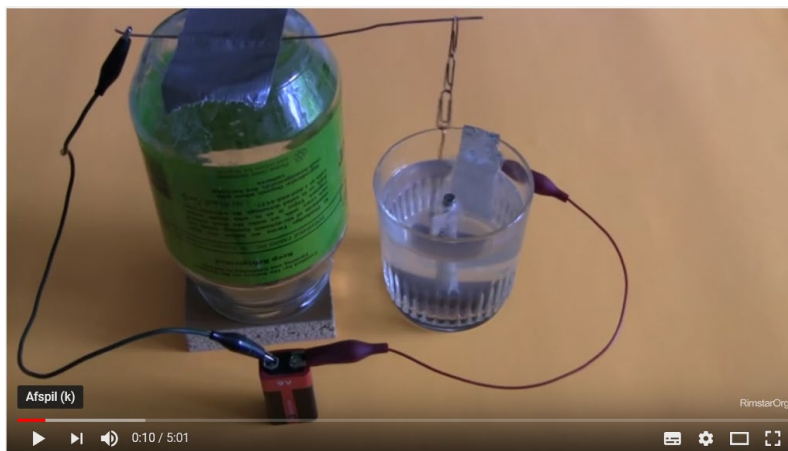
$$B_{spole} = \mu_0 \frac{8}{5\sqrt{5}} \frac{NI}{R}$$

Her er $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$, og kaldes vakuumpermeabiliteten, N er vindingstallet pr. delspole og R er spolens radius, som altså er lig afstanden mellem delspolerne. Vis at udtrykket for magnetfeltet i vores spoler kan skrives som

$$B_{spole} = 3340 \mu\text{T/A} \cdot I$$

- Find jordfeltets vandrette komponent ved at vælge en strømstyrke, som giver et passende udslag af magnetnålen.
- Brug nu prøvemagneten til at finde jordfeltets vinkel med lodret og bestem dermed styrken af det totale magnetfelt.
- Sammenlign med oplysninger fra nettet, hvor man finder at feltet er ca. $58 \mu\text{T}$ ved 50° bredde [6].

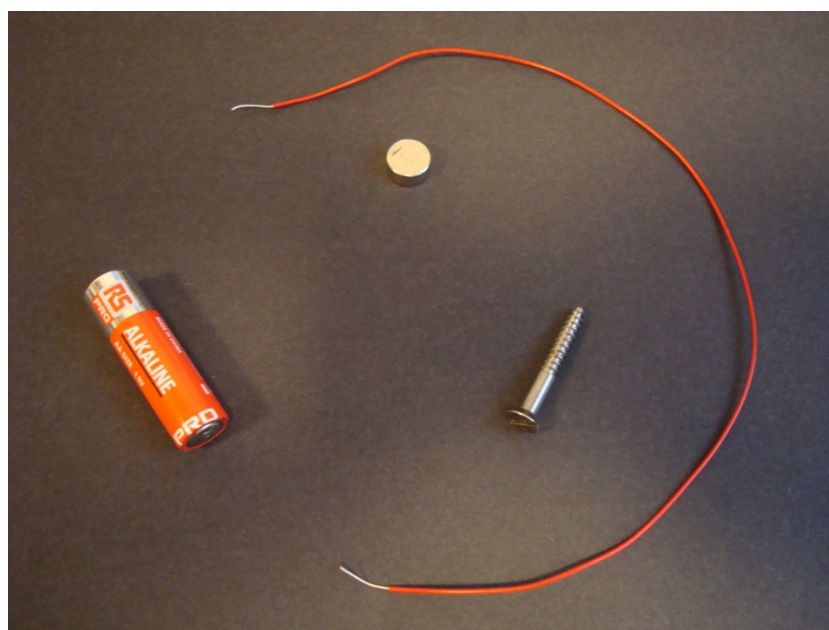
3 Faradays motor på YouTube



Figur 2. "Faraday Motor How to Make How it Works". RimstarOrg. Fra reference [7].

Se videoen. Gengiv forklaringen for hinanden på dansk.

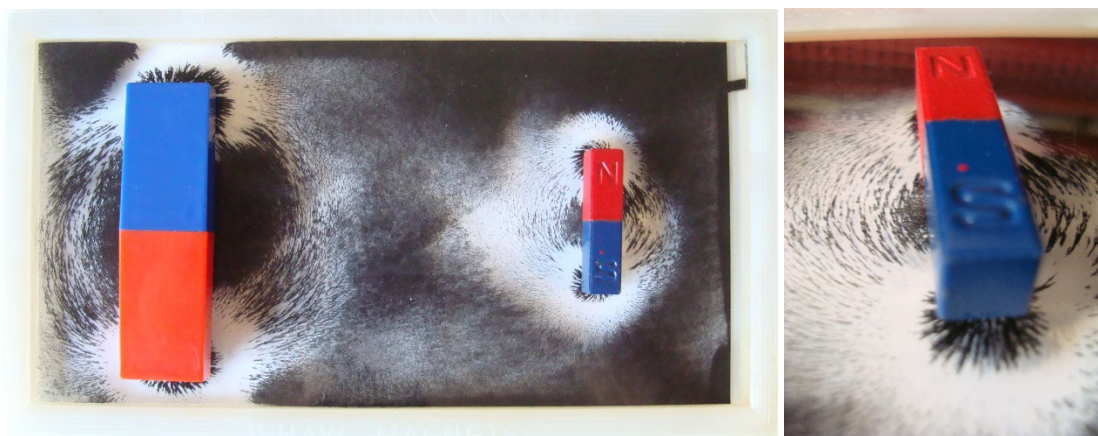
Faradaymotor i lommeformat



Figur 3. Lav en motor af fire stumper som disse.

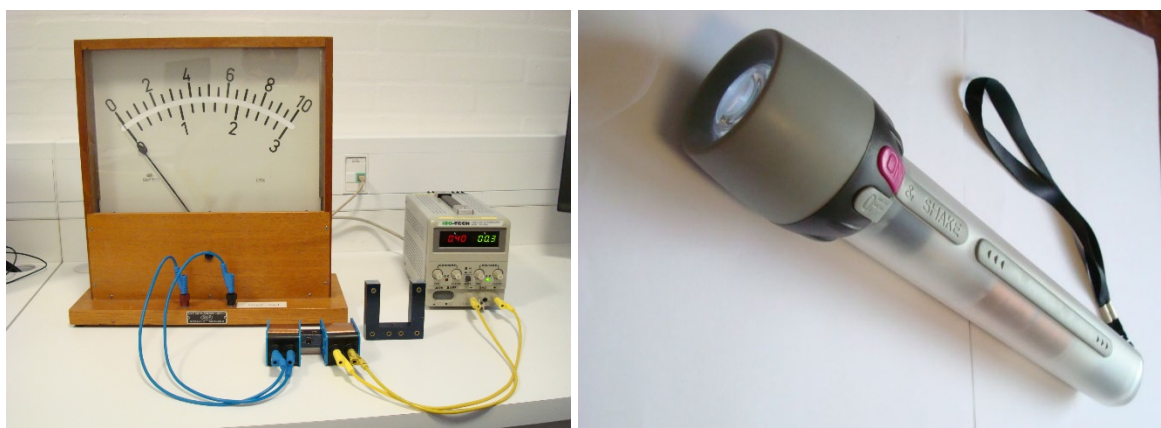
Udstyr: 1,5 V AA-batteri, lang træskrue med fladt hoved, neodymmagnet ($\varnothing = 1$ cm, $h = 5$ mm), 20 cm ledning afisoleret i begge ender.

Udførelse: Saml stumperne så I får skruen til at rotere om sin egen længdeakse. Tegn en skitse af jeres konstruktion. Diskuter funktionen af motoren og prøv at finde en forklaring på dens funktion. Inddrag skitser med feltlinjer uden for og inden i magneten. I kan eventuelt få hjælp til at forestille jer feltlinjerne ved at prøve forskellige magneter i nærheden af jernfilspåner. Se figur 4.



Figur 4. To stangmagneter lagt på plade med jernfilspåner i olielag under pladen. Bemærk den tredimensionale fordeling, som kan fornemmes på nærbilledet til højre, hvor spånerne stikker op under sydpolen.

4 Induktion

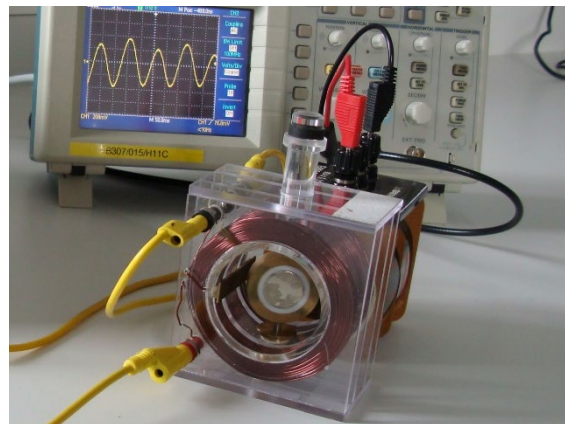


Figur 5. Tv: Hvordan mon Faraday opdagede induktion? Th: Ved at ryste lygten frem og tilbage i ca. 1 minut kan man lade den op til at lyse i ca. en halv time.

Udstyr: Drejespolegalvanometer (max 60 mV/10 mA), strømforsyning, spoler (200 vdg, max 2 A), jernkerner, ledninger.

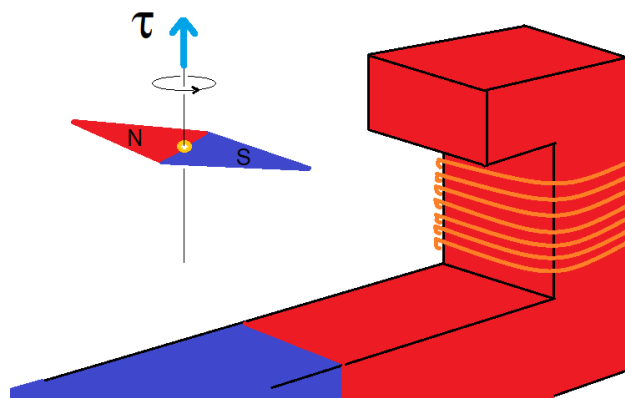
Udførelse: Tænd for en spole med strømstyrke f.eks. 0,4 A u/jernkerne. Placer en anden spole nær ved den første og forbind den til et galvanometer. PAS PÅ: Galvanometret MÅ IKKE kobles til strømforsyningen. Kan man måle noget på den anden spole? Prøv at slukke pludseligt for strømmen til den første spole. Hvad sker der? Prøv nu med jernkerne gennem begge spoler. Prøv også med åben og lukket U-kerne. Kan man se nogen forskel? Find ud af, om Faraday kan have påvist induktion på denne måde [8].

5 Magnetisk moment



Figur 6. Opstilling til bestemmelse af det magnetiske moment for en permanent magnet.

Udstyr: Permanent neodymmagnet monteret i teflon og messing ($I_{tp} = 6,006 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$), Helmholtzspole m/pinollejer til montering af permanent magnet, strømforsyning, opsamlingsspole, oscilloskop, ledninger.



Figur 7. Definition af magnetisk moment (magnetstyrke). Drejes en magnet væk fra sin ligevægtsstilling i et magnetfelt, vil den blive påvirket af et kraftmoment $\vec{\tau}$, som vil søge at dreje magneten tilbage til sin ligevægtsstilling. Jo større kraftmoment, des hurtigere vil nålen svinge om sin ligevægtsstilling. Måles svingningstiden, kan magnetens styrke bestemmes.

Kraftmomentet τ i figur 7 definerer det magnetiske moment $\vec{\mu}$ af magneten, således at

$$\tau = \mu \times B$$

Svingningstiden T afhænger af magnetfeltet og det magnetiske moment (magnetens "styrke"). Svingningstiden afhænger også af inertimomentet I_{tp} af det svingende system, som magneten med sin indkapsling udgør (" tp " står for tyngdepunkt, og antyder at rotationsaksen går lodret gennem tyngdepunktet for det svingende system). Inertimomentet kan beregnes til i vores tilfælde at være $I_{tp} = 6,006 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Formlen for svingningstiden

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_{tp}}{\mu B}} = 2\pi \sqrt{\frac{I_{tp}}{\tau}} \sim 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

ligner lidt formelen for harmonisk svingning af en masse i en fjeder. "Blot" med inertimoment i stedet for masse m og kraftmoment τ i stedet for fjederkonstant k . Det er ikke tilfældigt, for begge formler kan udledes fra samme type differentialligninger, se tillægget.

Udførelse: Mål svingningstiden ved forskellige strømstyrker. Start f.eks. ved 0,4 A. Noter strømstyrken nøjagtigt med de cifre, som strømforsyningen viser, men brug ikke tid på at ramme "pæne" værdier. Bemærk, at den mekaniske svingningstid, som er den, I skal bruge, rækker hen over to toppe i den inducerede spænding i opsamlingsspolen. Dette ses og forklares lettest, hvis I prøver at sætte opsamlingsspolen forskudt i forhold til aksen i Helmholtzspolen. Hvad ser man da? Og hvordan forklares det? For at lette forklaringen, definerer vi begrebet flux. Fluxen ind i spolen er den del af magnetfeltet, som strømmer gennem indgangsarealet til spolen. Den beregnes som styrken B af magnetfeltet ganget med spolens tværsnitsareal A^1 . Faradays induktionslov siger, at den inducerede spænding $\mathcal{E}$ i opsamlingsspolen afhænger af hastigheden i fluxændringen fra den svingende magnet, altså

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Her er Φ den øjeblikkelige værdi af fluxen BA . Overvej, hvordan denne ændrer sig gennem en hel mekanisk svingning af magneten.

Databehandling: Beregn det magnetiske moment ifølge måling ved en enkelt strømstyrke. Prøv at gentage ved en anden strømstyrke. Sammenlign og kommenter! Hvis tiden tillader det, kan I undersøge hvordan svingningstiden afhænger af strømstyrken i Helmholtzspolen og lave en grafisk fremstilling. Vi foreslår at tegne en graf med strømstyrken på 1.aksen og kvadratet på svingningstiden på 2.aksen. Hvad ser man? Hvordan kan det magnetiske moment bestemmes ud fra grafen?

¹ Mere præcist definerer man den magnetiske flux gennem en flade som magnetfeltstyrken ganget med fladens areal og ganget med cosinus til vinklen mellem magnetfeltet og fladens normal.

Referencer

- 1: Nyhedsbrev fra Teknologihistorie DTU - Januar 2018, Historien om elektromagnetismen. <http://www.historie.dtu.dk/formidling/nyhedsbreve/nyhedsbrev-3-januar-2018>
- 2: Wikipedia, H. C. Ørsted. https://da.wikipedia.org/wiki/H.C._%C3%98rsted
- 3: Wikipedia, James Clerk Maxwell. https://en.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell
- 4: Temanummer. Kvant December 2019: H. C. Ørsted og 200-året for elektromagnetismen. <http://www.kvant.dk/>
- 5: Danmark fejrer 200-året for H. C. Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen. <https://hco2020.dk/>
- 6: Wikipedia, Orders of magnitude (magnetic field). https://en.wikipedia.org/wiki/Orders_of_magnitude_%28magnetic_field%29
- 7: Faradaymotor. YouTube video. <https://www.youtube.com/watch?v=MRFqYRHT3Wk>
- 8: Wikipedia, Electromagnetic induction. https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_induction

Tillæg. Harmoniske svingninger

Her udleder vi formler for svingningstider af det velkendte system af en masse ophængt i en fjeder og for det magnetiske system af en svingende magnet i et magnetfelt.

Betragt et lod med masse m ophængt i en fjeder med fjederkonstant k . Positionen i forhold til ligevægt betegnes x , dvs lodret x -akse². Loddets acceleration a er den 2. afledede af positionen

$$a = \frac{d^2x}{dt^2}$$

Ifølge Newtons 2. lov har vi så med den samlede kraft $F = -kx$

$$ma = F \quad \rightarrow \quad m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx$$

Løsningerne til differentialligningen til højre er harmoniske funktioner, dvs. sinus, cosinus eller kombinationer heraf. Startes i hvile med amplitude A væk fra ligevægt har vi løsningen

$$x(t) = A \cos \omega t$$

Her er $\omega^2 = \frac{k}{m}$ kvadratet på vinkelfrekvensen (Gør prøve ved at differentiere $x(t)$ to gange med hensyn til t). Svingningstiden T er bestemt ved $\omega T = 2\pi$, som giver

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Betragt nu den svingende magnet med inertimoment I_{tp} . Hvis magneten drejer en lille vinkel θ væk fra ligevægt gælder en lignende naturlov for vinkelaccelerationen $\alpha = \frac{d^2\theta}{dt^2}$ i drejningen

$$I_{tp} \alpha = \tau \quad \rightarrow \quad I_{tp} \frac{d^2\theta}{dt^2} = \tau \rightarrow I_{tp} \frac{d^2\theta}{dt^2} = -\mu B \sin \theta \rightarrow I_{tp} \frac{d^2\theta}{dt^2} = -\mu B \theta$$

Den første formel kan man tænke på som Newtons 2. lov for rotation. I den sidste formel er udnyttet at for små vinkler gælder (målt i radianer), at $\sin \theta \approx \theta$. Den sidste formel er helt analog til differentialligningen for loddets svingning i en fjeder. Vi har derfor en løsning af samme form hvor magneten startes i en vinkel A væk fra ligevægt, dvs.

$$\theta(t) = A \cos \omega t$$

Her er $\omega^2 = \frac{\mu B}{I_{tp}}$. Svingningstiden er igen bestemt ved $\omega T = 2\pi$, som nu giver

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_{tp}}{\mu B}}$$

Man kan tænke på inertimomentet I_{tp} som en træghed mod ændring i rotationshastigheden, ligesom massen m er en træghed (inerti) mod ændring i hastigheden. For en stang med masse m og længde L , som drejer om en akse vinkelret på længdeaksen er inertimomentet $\frac{1}{3}mL^2$ for rotation om stangens ene ende og inertimomentet er $\frac{1}{12}mL^2$ for rotation om stangens midte.

² Bemærk, at x (egentlig Δx) måles som afvigelse fra ligevægtspositionen x_0 , hvor fjederkraften udbalancerer tyngdekraften på loddet, dvs. $kx_0 = mg$.