

Bygging av DC-motor med utredning av de underliggende fysiske prinsipper

En prosjektoppgave i FY1013



Forfattere

**Lars Erik Klemetsen
Henrik Sivertsen
Jørgen Tande**

Innholdsfortegnelse

1. Sammendrag.....	s. 3
2. Kort historikk.....	s. 4
3. Bakgrunnsstoff fysiske fenomener i DC-motor.....	s. 5 - 17
▪ 3.1 Magnetiske felt	
• 3.1.1 Strømførende leder.	
• 3.1.2 Strømførende sløyfe.	
• 3.1.3 Strømførende spole	
▪ 3.2 Hvorfor magnetiseres jern?	
• 3.2.1 Beregning	
▪ 3.3 Strøm og magnetisering	
▪ 3.4 Dipolmoment og spinn	
▪ 3.5 Reluktans	
4. Bygging av DC motor og dens komponenter.....	s. 18 - 25
▪ 4.1 Komponenter	
• 4.1.1 Ytre skall og permanentmagnet	
• 4.1.2 Bunn- og topplokk.	
• 4.1.3 Rotor og aksling.	
• 4.1.4 Modell av jernet i spolen	
• 4.1.5 Spole	
• 4.1.6 Kommutator	
• 4.1.7 Når enden er god er allting godt	
5. Effekttap.....	s. 26 - 35
• 5.1 Virvelstrømmer	
• 5.2 Kobbertap	
• 5.3 Luftgaptap og gyroeffekt	
• 5.4 Hysterese	
• 5.5 Effekttap av selvinduktans	
6. Målinger og resultat.....	s. 36 - 40
7. Noen elektromotorer i dag.....	s. 41 - 42
8. Kommentarer.....	s. 43
9. Kilder.....	s. 44

1. Sammendrag:

I dette prosjektet gikk vi inn på de fysiske prinsippene som ligger bak en DC-motor. Vi tok da utgangspunkt i en enkel prototyp motor som vi laget selv og brukte teori fra elektromagnetismen til å forklare de ulike elementene som spiller inn. For å gi leseren tilstrekkelig bakgrunnsteori startet vi med å gi en kort innføring i begreper og sammenhenger som man ser igjen i motoren. Videre beskrev vi byggeprosessen for vår egen motor for at leseren skulle kunne orientere seg om det byggetekniske aspektet ved DC-motoren. Tanken var å vise at man, med litt oppfinnsomhet, tilgang til diverse materialer og kjennskap til feltteori og magnetisering, skulle kunne ”oppfinne” en motor basert på induksjon. Det neste som stod for tur var å gjøre fysiske målinger på komponentene og motoren i ett. Særlig var effekt og effekttap interessant i testingen, og vi har lagt ekstra vekt på teorien rundt dette. I industrien er effektanalysen avgjørende for at en prototyp skal få livets rett og masseproduseres. Med høy reluktans, store virvelstrømmer, hysterasetap, selvinduktans og en lite optimalisert konstruksjon, ble nok motoren vår lite effektiv. Likevel fungerte motoren relativt bra uten ekstra belastning med en omdreingshastighet på 3000 RPM (rounds per minute) ved ca 8 Volt.

Prosjektet har virkelig vært svært lærerikt og motiverende; mye fordi vi har fått kombinert teori med praksis og at vi valgte å skrive innenfor et felles interesseområde.

2. Kort historikk:

Hans Christian Ørsted var den første som oppdaget en sammenheng mellom elektrisitet og magnetisme, rundt år 1820. Allerede året etter kunngjorde Ampère en rekke resultater fra de første forsøk han utførte med utgangspunkt i Ørsteds arbeid. Tidlig på 1830 tallet oppdaget Michael Faraday og Joseph Henry uavhengig av hverandre sammenhengen mellom det å endre på magnetiske felt og det å indukere elektrisk energi i elektriske kretser. Dette ble kjent som elektromagnetisk induksjon.

De tidligste elektromotorene var en del annerledes enn de som brukes i dag. Datidens elektromotorer brukte ikke rotasjonsprinsippet, men forskerne hentet heller sin inspirasjon fra den horisontale dampmaskinen. De fleste elektromotorene på denne tiden var essensielt solenoider som dro et metallstykke inn i spolen når de ble strømførende. Metallstykket var festet til en stang og et drivhjul, akkurat som i en dampmotor. Joseph Henry utviklet blant annet, i 1831, det som antas å være den første automatiske elektromotoren av denne typen, en som ikke manuelt trengtes å omstilles eller nullstilles. Han viet mye av sin tid til elektromagnetisme og i 1893 ble navnet hans gitt til den elektriske enheten induktans, Henry.

Amerikaneren Frank J. Sprague(1857-1934) var en pioner i utvikling og bruk av likestrømsmotorer slik vi kjenner dem i dag. I 1884 installerte han en motor til å drive en heis i Boston, og rundt år 1900 var elektromotorene allerede godt i gang med å fortrenge turbiner og dampmaskiner som drivkraft i industrien.

3.1 Bakgrunnsstoff:

3.1.1 Magnetiske felt:

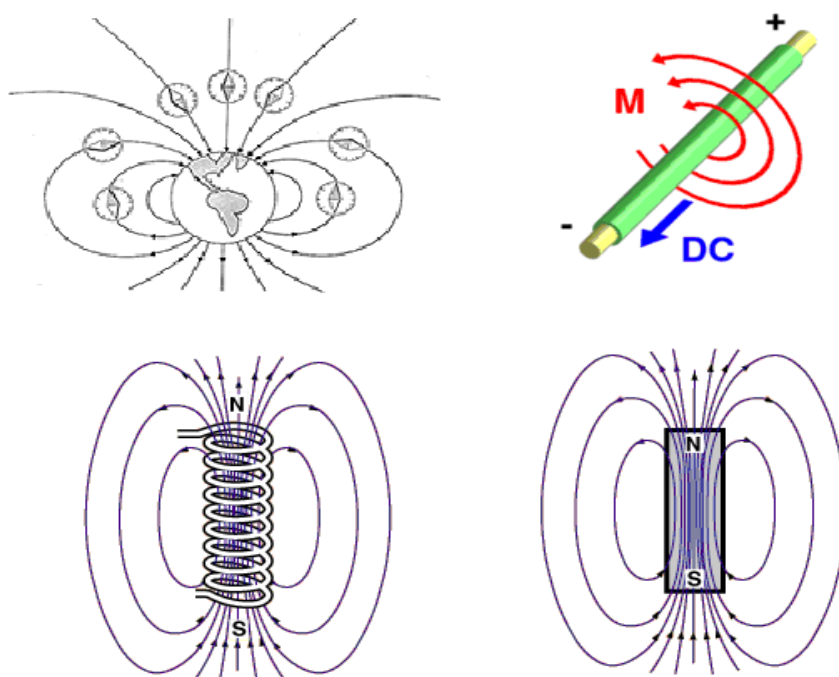
For å skjønne de fysiske prinsippene som ligger til grunn for at den elektromagnetiske motoren faktisk fungerer, er det essensielt å ha en viss forståelse av magnetiske felt. I vår elektromotor danner vi et magnetisk felt ved å føre strøm gjennom en spole, og det er nettopp dette som er drivkraften.

Magnetiske felt dannes ved at elektrisk ladde partikler beveger seg. Dette kan f.eks være en strøm av elektroner i en ledning, eller elektroner i sirkulære baner rundt atomer. Magnetfeltet er tenkte linjer som viser retningen til kraften på en "løs nordpol". Tette magnetfeltlinjer betyr sterkt magnetfelt og spredte linjer betyr svakt magnetfelt. For en strømførende leder er magnetfeltet gitt ved retningen på strømmen. For å finne retningen på feltet har vi noen tommelfingerregler, eller høyrehåndsregler, som vi kommer tilbake til.

De magnetiske feltlinjene oppstår rent skematisk svært ulikt de to andre fjernkreftene i naturen, elektrisk kraft og gravitasjonskraft. De sistnevnte går f.eks i linjer radielt ut fra kuler med masse m og/eller ladning q , eller i linjer mellom objekter, mens magnetfeltet alltid oppstår i lukkede kurver.

Illustrasjon: Typiske magnetfelt for henholdsvis jorda, en strømførende ledning, en spole og en stavmagnet:

Figur 3.1:

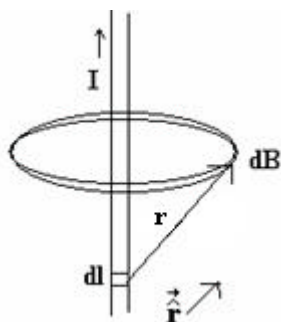


Når man skal «oppfinne» elektromotoren, trenger man i utgangspunktet bare vite hvordan magnetfeltet oppfører seg rundt en strømførende leder for videre å kunne forutse hvordan spolens magnetfelt ville se ut. Siden oppdagelsen av elektisitet går hånd i hånd med utviklingen av generatoren, kan det være vanskelig å påstå at vi ikke visste om **B**-feltet i en spole når vi forutsetter at elektrisitet er oppfunnet. Generatoren er nemlig bygget på samme prinsipp som elektromotoren, så man kan ironisk si at vi oppfinner en el.mag.-motor ved å bruke en el.mag.-motor.

3.1.2 Strømførende leder:

Magnetfeltet til en strømførende ledning kan utledes fra **Biot-Savarts lov**, som gir en sammenheng mellom punktladninger i bevegelse og magnetfelt. Vi ser da på magnetfeltet rundt en infinitesimal del av en uendelig lang strømførende leder, i en avstand **r**:

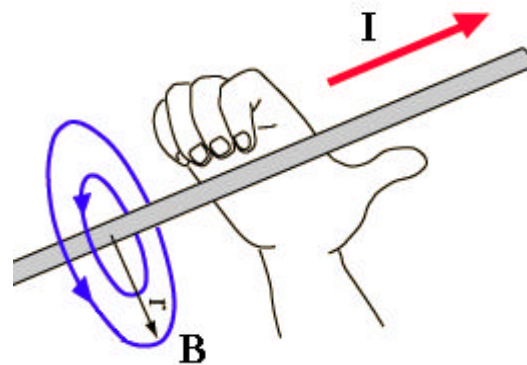
Figur 3.2



$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}.$$

Det totale magnetiske feltet får vi ved å summere alle bidrag **dl** langs lederen. Av symmetriårsaker får vi kun bidrag til **B**-feltet i sirkulær retning. Med høyrehåndsregelen blir retningen på **B** og styrken:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r}$$

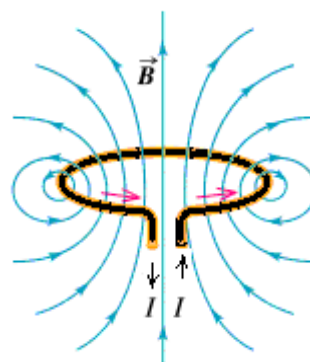


Figur 3.3

3.1.3 Strømførende sløyfe:

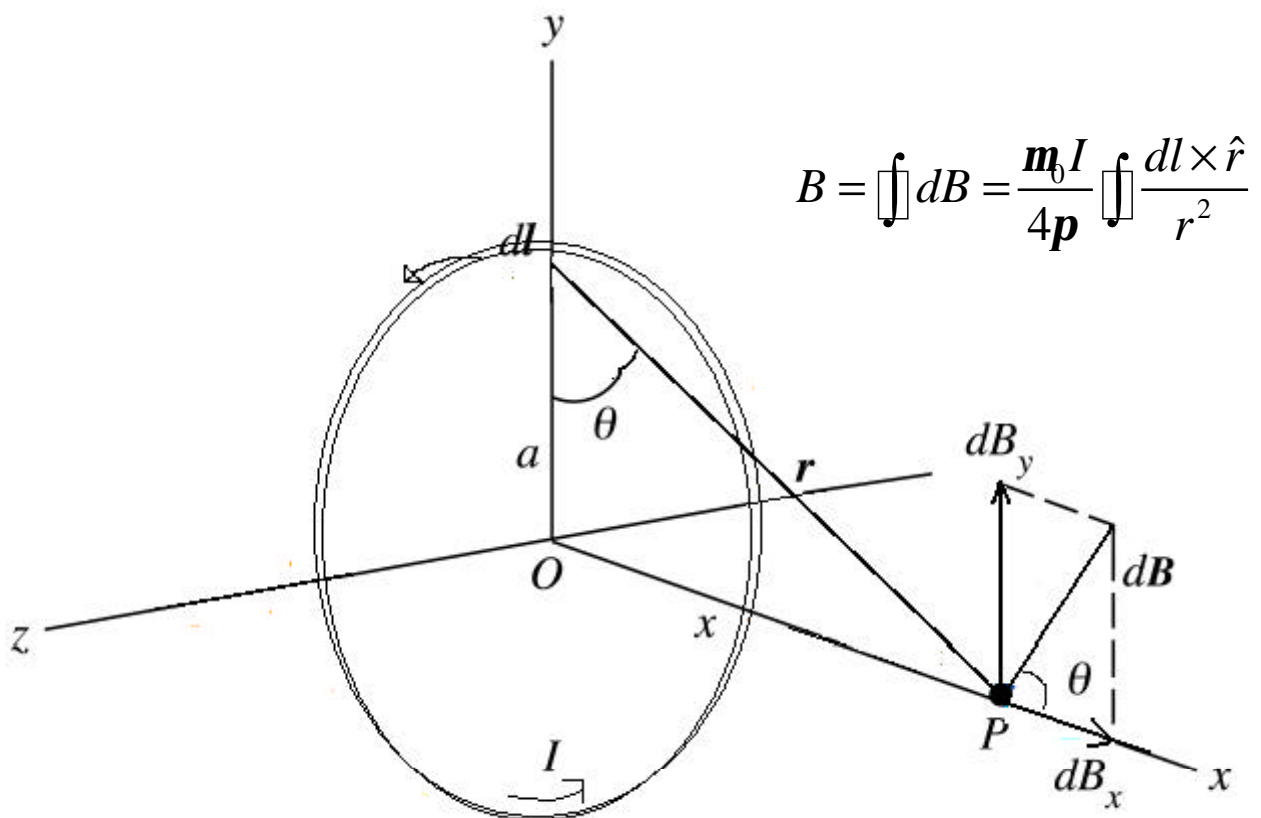
Hvis vi bøyer ledningen til å bli sirkulær, vil vi få en strømførende sløyfe. Magnetfeltet i denne vil intuitivt se slik ut:

Figur 3.4



Det totale magnetfeltet \mathbf{B} på aksen til en slik lukket strømsløyfe finner vi ved å summere opp bidraget fra alle differensielle lederstykker som til sammen utgjør den lukkede strømsløyfa, dvs ved å integrere uttrykket for $d\mathbf{B}$ rundt sløyfa:

Figur 3.5



Symmetrien når vi skal integrere $d\mathbf{l}$ rundt sløyfen gjør at vi bare får bidrag i x-retningen:

$$dB_x = dB \cdot \cos \theta = dB \cdot \frac{a}{r} = dB \cdot \frac{a}{(a^2 + x^2)^{1/2}}$$

$$= \frac{\mu_0 I dl}{4\pi} \frac{a}{(a^2 + x^2)^{3/2}}$$

Det totale feltet vi får ved å integrere rundt kurven blir da

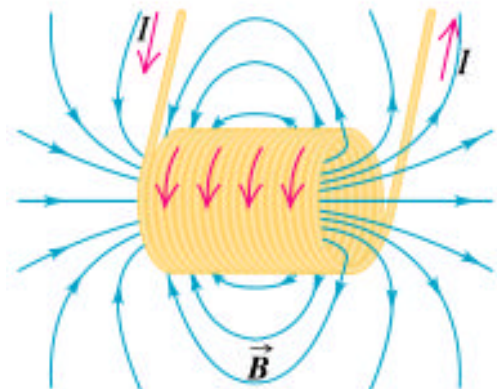
$$B_{total} = \oint dB_x = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{a}{(a^2 + x^2)^{3/2}} \oint dl$$

$$= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{a}{(a^2 + x^2)^{3/2}} \cdot 2\pi a = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{a^2}{(a^2 + x^2)^{3/2}}$$

Når vi beveger oss videre til spolen vil vi også få en tilsvarende symmetri langs aksene, og tilnærmet homogent med hele innsiden av spolen avhengig av lengden på spolen, viklingstetthet, relativ permeabilitet inne i spolen og radius.

3.1.4 Strømførende spole:

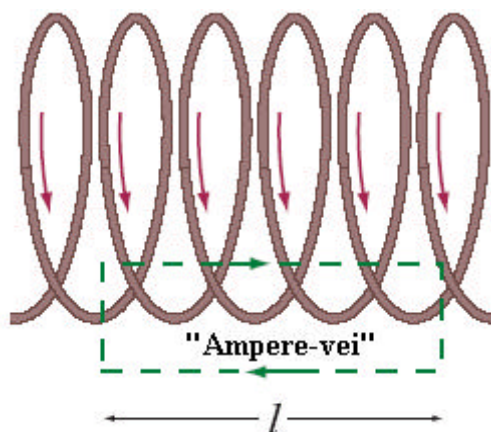
Vi går så videre med å sette sammen mange slike strømsløyper som i forrige side, slik at vi danner en spole, eller solenoide. Magnetfeltet blir da som på figuren:



Figur 3.6

La oss si at den har \$n\$ sløyfer pr lengde og strøm \$I\$. Magnetfeltet kan finnes ved å bruke Ampères lov og en integrasjonsvei som vist i figuren. Integrasjonsveien er valgt slik at strømmene i viklingene har riktig retning ut fra høyrehåndsregelen. Når spolen er lang i forhold til diameteren kan vi gjøre tilnærmingen at magnetfeltet er homogent og parallelt med aksene inne i solenoiden og at feltet er null på utsiden.

Figur 3.7



Ampères lov sier:

$$\oint B dl = \mu_0 I_{(\text{gjennom } A)}$$

Der $I_{\text{gjennom } A}$ er lik $l \cdot n \cdot I$

$$B = \mu_0 n I$$

Denne tilnærmingen blir enda bedre når man fyller spolen med et ferromagnetisk materiale. Magnetiseringen av materialet er proporsjonalt med det ytre feltet og kan forsterke B-feltet inne i en spole med flere hundre størrelsesordener. Les om ferromagnetisme på side 9 til 11.

Vi skal i dette prosjektet lage en spole som omsluttet et slikt ferromagnetisk materiale, og vi vil på side 39 og 40 gjøre en tilnærming til hvor stort magnetfelt vi får i denne hjemmesnekrede elektromagneten.

3.2 Hvorfor magnetiseres jern:

Elektroner i baner, uten påtrykt magnetfelt, rundt atomkjerner er mikroskopiske strømsløyfer som vil sette opp magnetfelter rundt seg. Denne magnetismen slukker seg ofte ut, enten fordi to elektroner går i samme bane, men i motsatt retning, eller fordi naboatomer er tilfeldig orientert slik at magnetismen fra hver mikroskopiske strømsløyfe kansellerer hverandre. Materialer med en slik innstilling på atomært nivå, vil være magnetiske nøytrale. For mer om spinn se egen del side 15 og 16.

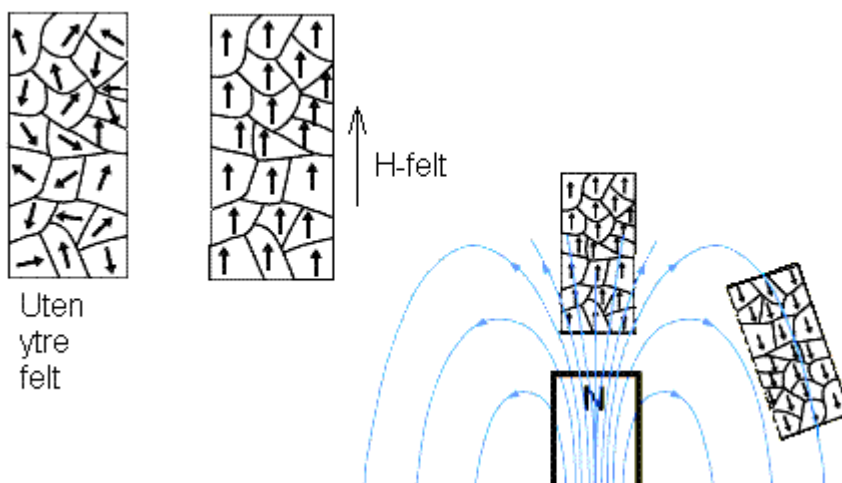
Ferromagnetiske materialer har den egenskapen at når de utsettes for et ytre magnetfelt vil dipolene i materialet rette seg inn etter retningen til det ytre magnetiske feltet og forbli slik etter den ytre påvirkningen er fjernet. I tillegg til å bevare sin magnetisering vil slike materialer ha en veldig sterk magnetisering når de settes i et ytre magnetfelt. Dette gjør sitt til at total feltet blir mange ganger forsterket. Jern, kobolt og nikkel er slike ferromagnetiske materialer. I vår motor bruker vi bløt jern i spolen.

For å forklare dette må vi innføre noe som kalles Paulis eksklusjonsprinsipp og noen av Werner Heisenbergs tanker. Eksklusjonsprinsippet går ut på to elektroner i en begrenset mengde av et materiale ikke kan oppta samme energitilstand samtidig. Heisenberg mente

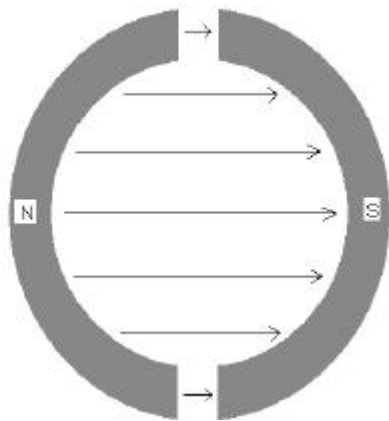
at som en konsekvens av dette ville vi ha at to uparede elektroner med tilnærmet parallelle spinn vil innrette seg i baner slik at midlere avstand mellom dem blir størst mulig. Dette fordi coulombfrastøtningen mellom dem reduseres og dermed blir den potensielle energien minst mulig. Naturen foretrekker den laveste energitilstanden og dermed vil elektronene ordne seg slik at spinnene deres og dermed deres magnetiske dipolmoment \mathbf{m}_s er parallelle. I analogi med den elektriske dipolen er energien til en magnetisk dipol \mathbf{m} i et uniformt magnetisk felt \mathbf{B} gitt ved $U = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{B}$, slik at dipolen har sin laveste energi når \mathbf{m} og \mathbf{B} er parallelle.

Sagt på en enklere måte vil alle de tre ytterste elektronene i jern gå i samme retning. Det gjør at jern, når alle jernatomene ligger parallelt, gir et meget sterkt magnetfelt. Denne spontane innretningen skjer ikke gjennom hele materialstykket, men innenfor såkalte magnetiske områder eller domener, hvor alle de magnetiske dipolene er parallelle. Domenene varierer i volum, men har ofte en lineær utstrekning på 0,1 og 1mm og inneholder mellom 10^{17} og 10^{21} atomer. I en stor, uniform krystall kan lengden av et magnetisert område være opptil flere centimeter. Innretningen på det magnetiske feltet varierer fra område til område. Domenene kan forandre seg på to måter ved at et ytre magnetfelt påvirker dem: Enten kan områder med magnetisering tilnærmet parallelle med det ytre feltet øke i størrelse på bekostning av nabo domener. Eller så kan områder få en ny spontan innretning mer lik det ytre feltet, men uten å endre fysisk størrelse.

Figur 3.8

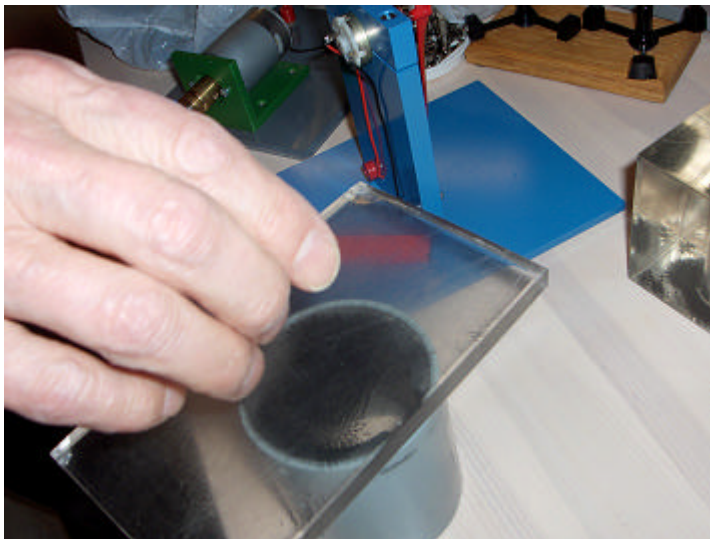


I den permanente magneten vi brukte i vår elektromotor var feltet rettet horisontalt i hele magneten.



Figur 3.9

Dette fant vi ut ved å plassere en glassplate med jernspon i seg over magneten, se bildet nedenfor. Inne i glassplaten fløt det en væske som inneholdt jernspon. Disse jernsponene vil magnetiseres og rette seg inn etter det påtrykte feltet, i dette tilfellet vår permanentmagnet.



Elektriske felt fører til innretning av atomære eller molekylære elektriske dipoler i et dielektrikum. Det samme foregår med magnetiske dipoler i et magnetfelt. I et dielektrikum vil dette føre til en svekkelse av det elektriske feltet, men i magnetisk felt vil innrettingen av dipoler derimot styrke det magnetiske feltet. Dette er fordi magnetfeltlinjene alltid danner lukkede sløyfer.

Det finnes flere materialer som påvirkes av ytre magnetfelt enn de ferromagnetiske. I paramagnetiske materialer vil magnetfeltet bare få en liten økning. I diamagnetiske materialer vil faktisk det magnetiske feltet svekkes.

3.2.1 Beregning:

Magnetisering, \mathbf{M} , er størrelse vi kan bruke for å bestemme stoffenes magnetiske egenskaper. Denne størrelsen er definert som: *magnetisk dipolmoment per volumenhet*. Enheten for magnetisering er dermed den samme som (strømstyrke x areal)/volum, det vil si A/m. Dette er den samme enheten som for B/μ_0 . Magnetfeltet kan skrives som summen av virkningen fra det påtrykte feltet og magnetiseringen, slik at

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mu_0 \mathbf{M} \quad (1)$$

Vi innfører en størrelse \mathbf{H} som bare avhenger av det ytre feltet, for eksempel den påtrykte strømmen, og er uavhengig av magnetiseringen. Denne vektoren kalles *magnetisk intensitet*, har samme enhet som \mathbf{M} og er definert ved

$$\mathbf{H} = \mathbf{B}_0/\mu_0 \quad (2)$$

Vi kan nå omskrive ligning (1) til $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$ (3)

For et isotropt (et materiale som har samme fysiske egenskaper i alle retninger) og homogent materiale vil \mathbf{M} være proporsjonal med \mathbf{H} og i tillegg ha samme retning. Dermed får vi

$$\mathbf{M} = x_m \mathbf{H} \quad (4)$$

Hvor størrelsen x_m kalles *magnetisk susceptibilitet* (mottakelighet) og er en materialkonstant uten benevning. Ved hjelp av denne størrelsen kan vi skrive

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + x_m \mathbf{H}) = \mu_0(1 + x_m)\mathbf{H} = \mu \mathbf{H} \quad (5)$$

Hvor

$$\mu = \mu_0(1 + x_m) \quad (6)$$

kalles *permeabiliteten* for mediet og har same enhet som μ_0 , altså Tm/A eller H/m.

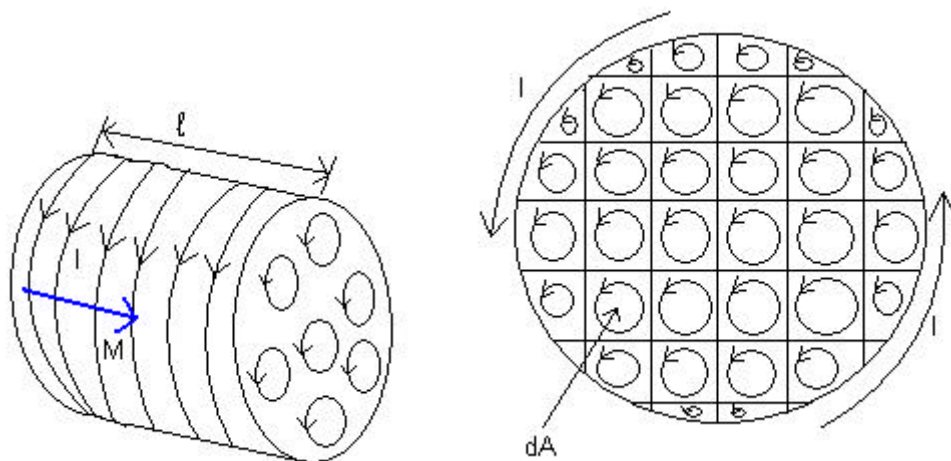
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Henry} \cdot \text{m}^{-1} \quad \text{magnetisk permeabilitet}$$

Den *relative permeabiliteten* er definert som

$$\mu_r = \mu/\mu_0 = 1 + x_m \quad (7)$$

og er en materialkonstant uten benevning. Stor x_m betyr stor magnetisering. I ferromagnetiske materialer er den relative permeabiliteten stor (størrelsesorden 1000). Sammenhengen mellom det totale magnetfeltet og det påtrykte feltet er ikke lineær og kurven man da får kalles hysteresekurve. Dette fenomenet kommer vi nærmere inn på senere.

3.3 Strøm og magnetisering:



Figur 3.10

Vi ser på små, men makroskopiske volumelementer av sylindere som vist på figur 3. Volumelementene har samme lengde l og, bortsett fra langs sylindrens ytterside, samme tverrsnitt dA , som vist på figuren. Hver dipol tenkes som en strøm I som går i en sløyfe rundt elementenes yttersider og vinkelrett på sylinderaksen. Dipolene vil derfor ha dipolmomenter $dm = IdA$, alle med retning langs sylinderaksen. Ved å addere alle disse dipolene, får vi et totalt dipolmoment

$$m = \int dm = I \int dA = IA$$

Dette gir en magnetisering

$$M = \frac{\text{dipolmoment}}{\text{volum}} = \frac{IA}{Al} = \frac{I}{l}$$

Når vi setter sammen elementene, vil strømmen langs yttersiden av ett element inne i sylindere oppheves av en like stor, men motsatt rettet strøm i naboelementene. Den eneste nettostrømmen vil derfor være strømmen I rundt sylindrens krumme ytterflate. Sylindere kan dermed sees på som en "spole" med tverrsnitt A og lengde l . \mathbf{B} -feltet for en uendelig lang spole med konstant \mathbf{B} -felt er gitt ved

$$B = \mu_0 \frac{I}{l}$$

Her har vi erstattet n med $N/l = 1/l$. Vi ser at dette stemmer overens med resultatet over når $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{M}$. Der vi har erstattet n med $N/l = 1/l$. Vi ser at dette stemmer med resultatet over når $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{M}$.

Dermed blir magnetiseringens bidrag til det totale magnetfeltet er derfor gitt ved ligning

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$$

Beregning av magnetfelt i materie fra for eksempel strømmer kan nå gjøres forholdsvis enkelt ved å starte med magnetfeltet i vakuum. Vi kan erstatte Ampères lov for \mathbf{B} -feltet med en tilsvarende lov for \mathbf{H} -feltet, slik at

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{r} = I_{fri}$$

Her ser vi at proporsjonalitetskonstanten ikke μ_0 er med, dermed ser vi at \mathbf{H} -feltet uavhengig av materialet. Når vi har funnet \mathbf{H} -feltet, finner vi \mathbf{B} -feltet fra ligning

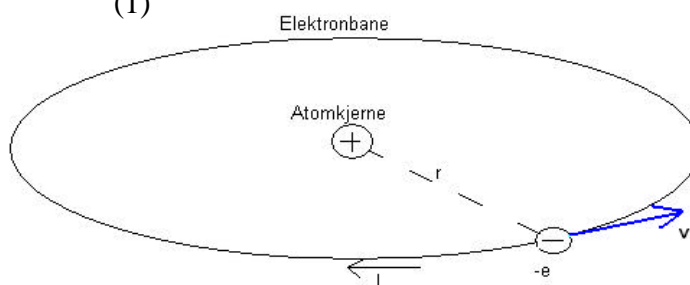
$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + x_m\mathbf{H}) = \mu_0(1 + x_m)\mathbf{H} = \mu\mathbf{H}$$

3.4 Dipolmoment og spinn:

I en klassisk modell av atomet vil elektronene bevege seg i sirkulære baner rundt atomkjernen, og vil dermed sette opp en strøm med retning motsatt baneretningen;

$$I = \frac{e}{T} = \frac{ev}{2\pi r} \quad (1)$$

Figur 3.11



Magnetiske dipolmoment er en egenskap til en magnet som indikerer hvor raskt magneten vil rette seg inn etter et ytre magnetfelt.

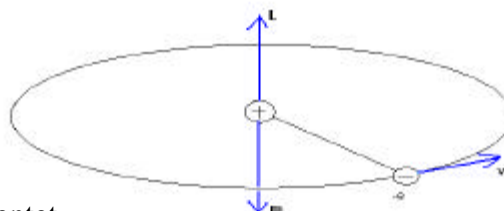
Et magnetisk moment vil oppstå pga av denne sirkulasjonsstrømmen, gitt ved

$$m_L = IA = \frac{ev}{2\pi r} \pi r^2 = \frac{evr}{2} \quad (2)$$

Banespinnet for elektronet i den sirkulære banen er

$$L = rm_e v \quad (3)$$

Figur 3.12



Dermed kan vi skrive det magnetiske momentet

$$\mathbf{m}_L = -\frac{e}{2m_e} \mathbf{L} \quad (4)$$

Minustegnet i ligningen skyldes at for elektronet er det magnetiske momentet og banespinnet i motsatt retning. Sammenhengen mellom \mathbf{m}_L og \mathbf{L} er utledet under forutsetning av at den elektriske ladningen beveger seg i sirkelbane, men dette gjelder også for andre periodiske banebevegelser selv om det ikke er en sirkelbane. Et prinsipp fra kvantemekanikken sier at størrelsen på banespinnet er kvantisert, slik at det alltid er et helt tall multiplisert med konstanten $\hbar = h/2\pi$ der h er Plancks konstant. Dermed vil mulige verdier av banespinnet være $L=l\hbar$ der l er null eller et positivt heltall.

I tillegg til banebevegelsen har elektronet en egenrotasjon eller et egenspinn \mathbf{S} . Også dette vil bidra til det magnetiske momentet, slik at elektronet kan oppfattes som en liten magnet;

$$\mathbf{m}_s = -\frac{e}{m_e} \mathbf{S} \quad (5)$$

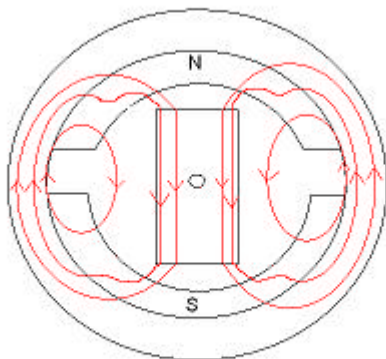
For et proton eller nøytron vil det magnetiske momentet fra spinnnet være nesten 2000 ganger mindre enn for elektronet. En kan dermed konkludere at for et atom er det totale magnetiske momentet dominert av elektronets magnetiske momenter. Det magnetiske momentet for et atom er derfor lik summen av m_L og m_s for alle elektronene i atomet. I klassisk fysikk er det ingen regler for hvordan de forskjellige elektronene beveger seg i forhold til hverandre, slik at de forskjellige dipolmomentene ville ha vilkårlige retninger i forhold til hverandre. Men kvantemekanikken sier noe helt annet, elektronene i et atom og i kovalente molekylbindinger opptrer parvis. Hvilket betyr at for et atom i grunntilstanden vil elektronenes magnetiske momenter oppheve hverandre parvis. Vi kan dermed trekke følgende konklusjon: Atomer med et odde antall elektroner må ha et netto magnetisk dipolmoment.

3.5 Reluktansmoment:

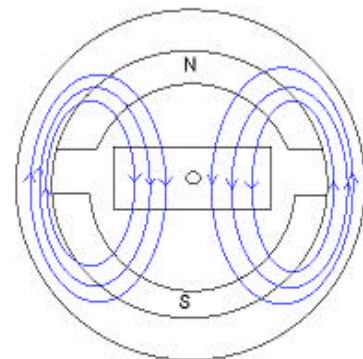
For å forklare dette fenomenet skal jeg bruke energiligningen for et magnetfelt. Den ser slik ut

$$W_{magn} = \frac{1}{2} \int_V (\vec{B} \cdot \vec{H}) dv$$

Siden magnetfeltet vil få et større volum av jernet å gå gjennom når den er dreid 90⁰ grader enn når den står vertikalt i magneten, vil den også få større energi i denne posisjonen. Naturen søker etter lavest energi vil rotoren stå vertikalt inne i motoren. Se figurer neste side. Den kraften vi må bruke på å dreie rotoren og dermed øke energien, kalles reluktansmomentet. For å få motoren vår til å gå av seg selv måtte vi ha minst 2 ampère og da dreie den i gang med menneskekraft. Når vi hadde fått den i gang måtte vi ha minst 1,5 ampère for at den skulle opprettholde bevegelsen sin.



Figur 3.13 vertikal



Figur 3.14 horisontal

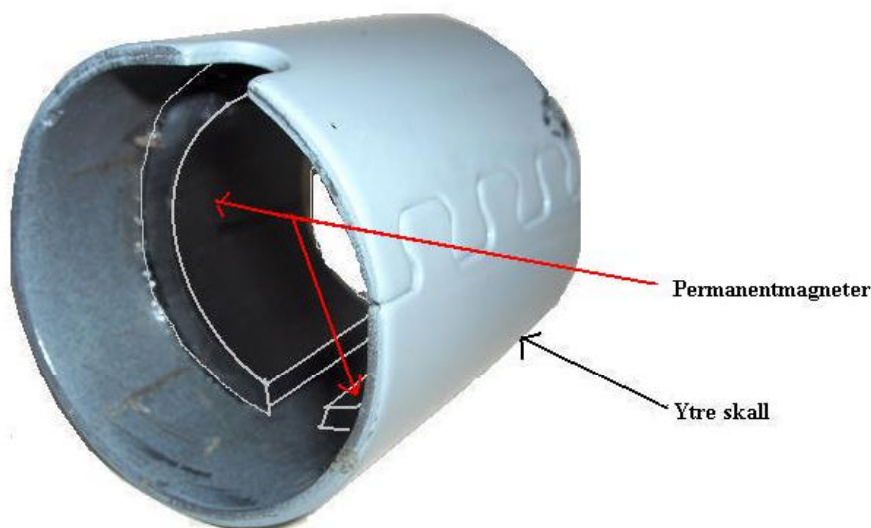
4.0 Bygging av DC-motoren og dens komponenter:

Den mest tidkrevende delen av dette prosjektet har den praktiske. Da vi fikk ideen om å skrive prosjekt om elektromotoren, falt det oss naturlig å også bygge en. Tanken var videre at vi skulle kunne komme frem til en elektromotor prototyp kun på teoretisk grunnlag og uten kjennskap til andre byggetekniske løsninger. Med andre ord var planen å «oppfinne» elektromotoren på nytt.

Etter hvert som vi gikk nærmere inn på byggeprosessen og fant ut hva som var tilgjengelig av utstyr og materialer på diverse laber og verksteder på NTNU, kom vi frem til at en fullt ut egenprodusert motor ville kreve veldig mye tid på verksted og «produktutvikling og design». Vi ble enig om at det ville bli mer gjennomførbart å bruke deler fra andre motorer for å sette sammen vår egen. Etter mye diskusjon med stipendiater, amanuensiser og professorer samt endeløs trasking mellom fakulteter, fikk vi tilslutt samlet nok deler til å kunne bygge noe som i teorien skulle kunne fungere. Da var det i hovedsak på elektrobygget vi høstet de fleste komponentene. Enkelte deler måtte justeres noe for å passe inn i modellen vår, og andre deler måtte spesiallages ved å sende skjematiske tegninger til de ansatte ved teknisk verksted nede i U3 ved Institutt for Fysikk.

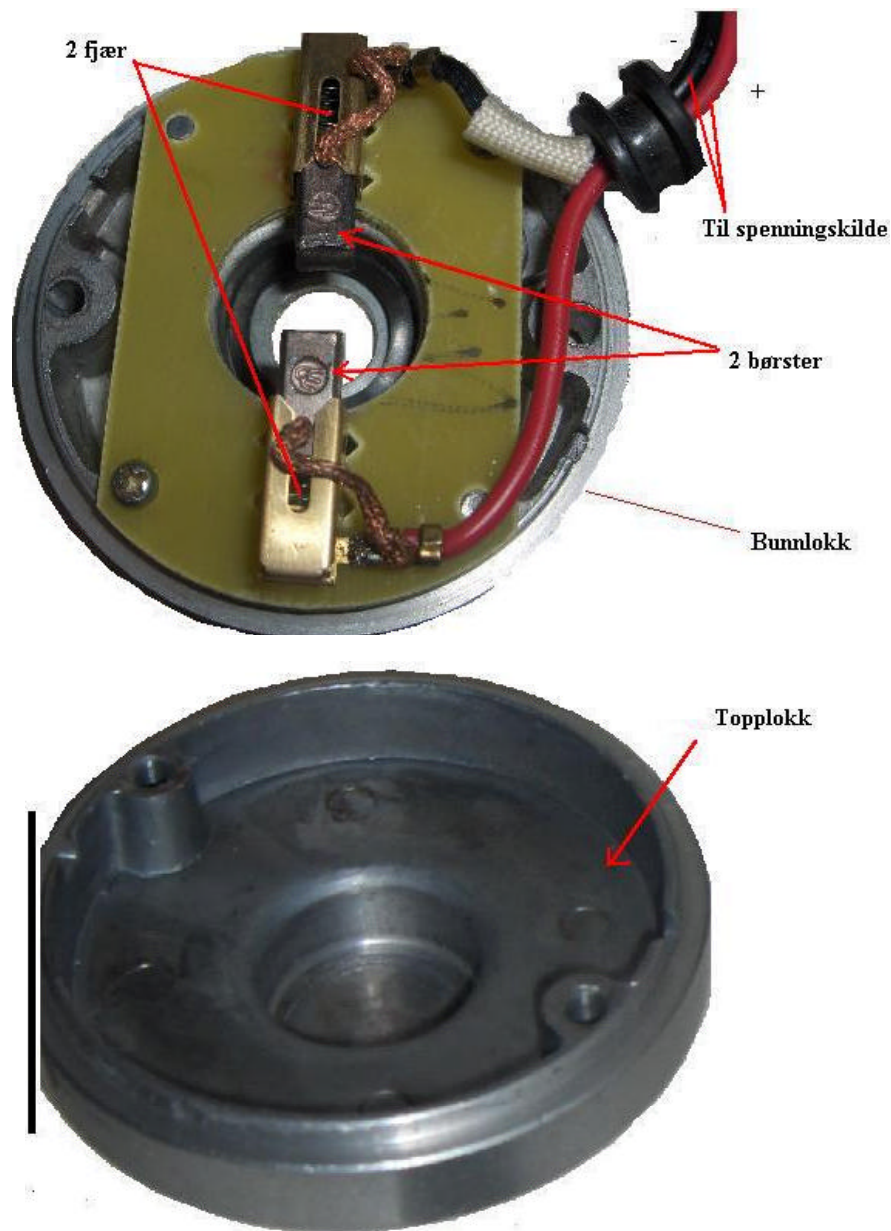
4.1 Komponenter:

4.1.1 Ytre skall og permanentmagneter:



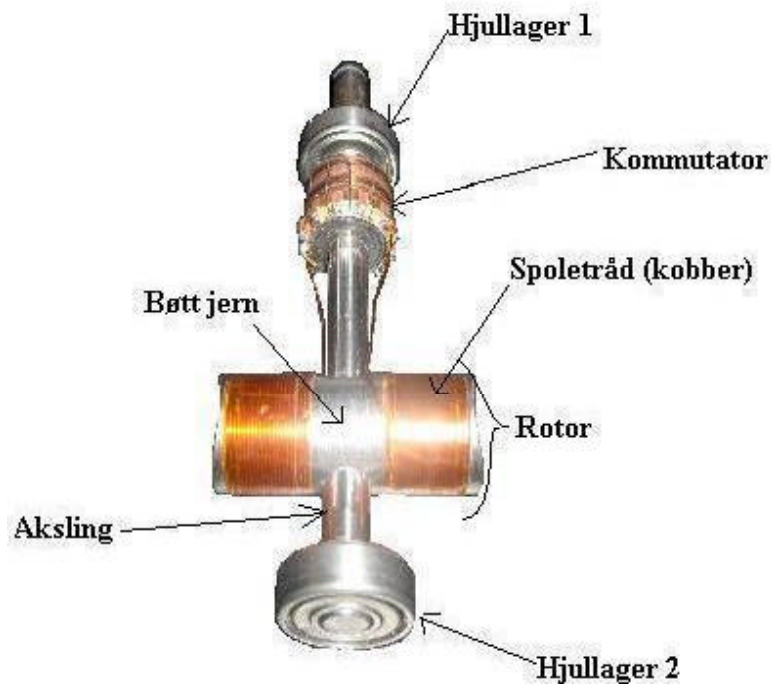
Det første vi anskaffet var de permanente magnetene. Vi ville ha sirkulære magneter slik at vi fikk minst mulig luftgap mellom dem og en sirkulerende rotor, og dette fant vi i en el-motor for sparksykkel som vi fikk lov til å demontere. Denne var vi heldige med siden permanentmagnetene var festet til en metallsylinder akkurat slik vi hadde lagt opp til i skissene våre. Vi testet de også mot en stavmagnet og bekreftet av de var av to motsatte poler. Bunn- og topplokk tok vi også med oss for å bruke i egen motor.

4.1.2 Bunn- og topplokk:



Bunnlokket bestod av 2 ledende børster som kunne kobles enkelt til en strømkilde ved at vi byttet ut de originale uttakene. I midten var der også et hull som kunne brukes som utgang til akslingen. Børstene presses mot sentrum (eller kommutatoren) ved hjelp av to fjærer. Bunnlokket var formet med en innhuling i midten. Dette slik at akslingen kunne stå stabilt inne i motoren og for at permanentmagneter og rotor ikke skulle skrape sammen. Når den enden av akslingen som hadde hjullager var satt inn i innhulingen ble det helt optimalt og lite friksjon. Sammen med metallsylinderen dannet da bunn- og topplokk statoren.

4.1.3 Rotor og aksling:



Her er motorens «innmat» med tilhørende topp- og bunnlokk på henholdsvis bunn og topp. Særlig har denne delen har voldt oss mye arbeid. Vi brukte også her noen deler fra sparksykkelmotoren, men måtte gjøre litt nye innstillinger på kommutator etter at vi kvittet oss med den eksisterende rotoren. Vi tok da i bruk heftig utstyr fra 2.verdenkrig under Knut Gjervans ekspertise for å gjøre de nødvendige inngrepene;

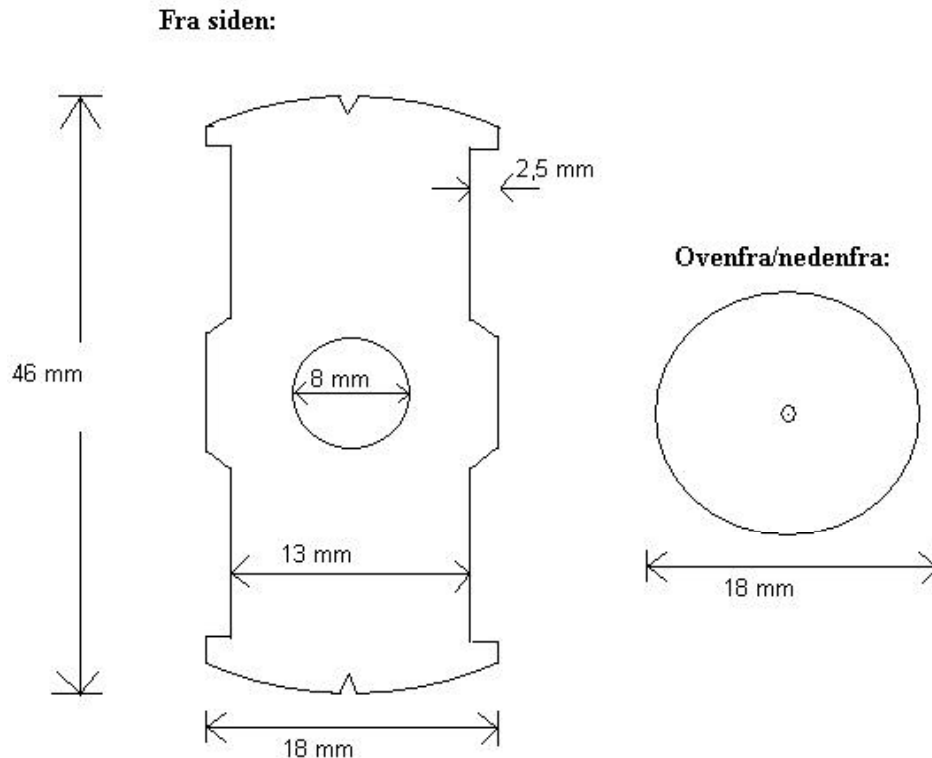


Med tanke på at vi i utgangspunktet skulle lage en motor som skulle være mulig å regne på, så valgte vi innlysende nok å forme det magnetiserbare materialet inne i kobberviklingene som en sylinder. Samtidig måtte vi prøve å lage den slik at den induserte så kraftig magnetfelt som mulig og overgikk styrken på feltet til de permanente magnetene.

Siden vi bare hadde plass til en 4,6 cm lang rotor så måtte vi lage en elektromagnet med så mange viklinger som mulig på et veldig lite metallstykke for å få til dette. Se tegning av vårt bløte jern nedenfor:

4.1.4 Modell av jernet i spolen:

Figur 4.1

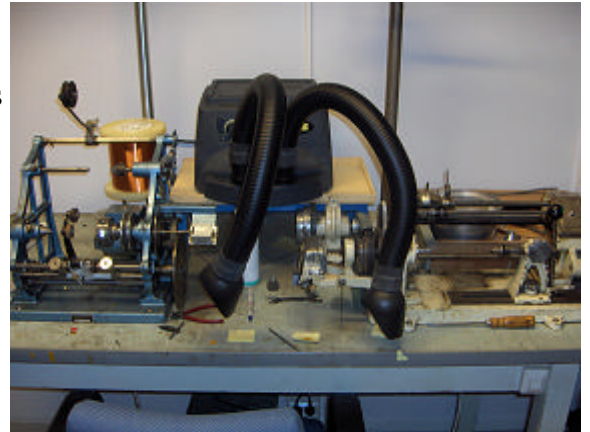


Ovenfor er utformingen som ga plass til flest mulig viklinger på metallet og hadde minst mulig luftgap mellom permanentmagnetene og rotoren for vår én-spulers DC-motor.

- ∞ De to innrissene på endene av metallet var for å senere kunne bruke en viklingsmaskin til å vikle spolen. Her ble det gjort en liten feil i utformingen pga. en litt misvisende tegning fra vår side (vi tegnet ikke ovenfra). Vi fikk altså et langt hakk på tvers av begge endene av metallet i stedet for kun et innriss. Men dette fikset vi fort.
- ∞ Grunnen til innskjæringene på 2,5mm på sidene er for å kunne vikle flere lag med kobber rundt metallet. Hullet i midten er for akslingen. Dette måtte også være pinlig nøyaktig for at vi skulle kunne banke inn akslingen slik at den stod fast og rett. Heldigvis tok mekanikerne våre disse kravene seriøst, og vi fikk tilbake en overraskende symmetrisk og korrekt metallbit, som bestilt.
- ∞ Luftgapet mellom metallet og magnetene var kun 1,5mm, så symmetrien i metallet måtte være nærmest perfekt, særlig med tanke på at den senere skulle gå 50 runder i sekundet

4.1.5 Spole:

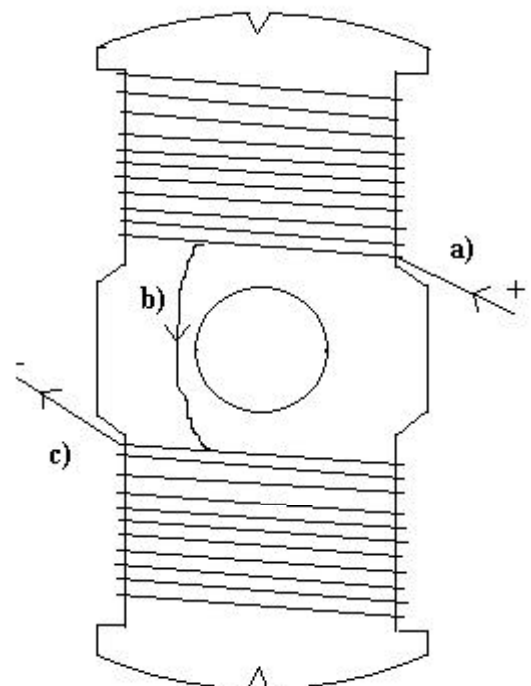
Etter at det bløte jernet var ferdig utformet stod spolen for tur. Vi hadde allerede vært flere ganger på besøk hos Arne Moholt ved det elektriske verkstedet i 3.egt på realfagsbygget, og diskutert gjennomførelse mang en gang med han tidligere, så det var da bare å sende over stafettpinnen. Viklemaskinen de hadde der fikk vi dessverre ikke prøve uten opplæring, men for orienteringens skyld såg den slik ut:



Vi hadde tidligere kommet frem til at å bruke 0,65mm kobbertråd og vikle den i fire lag utenpå metallet ville gi best utslag for indusering av magnetfelt i spolen. Det var altså denne diameteren som best ville kunne snurres i fire lag rundt metallet.

Forklaring av vikling:

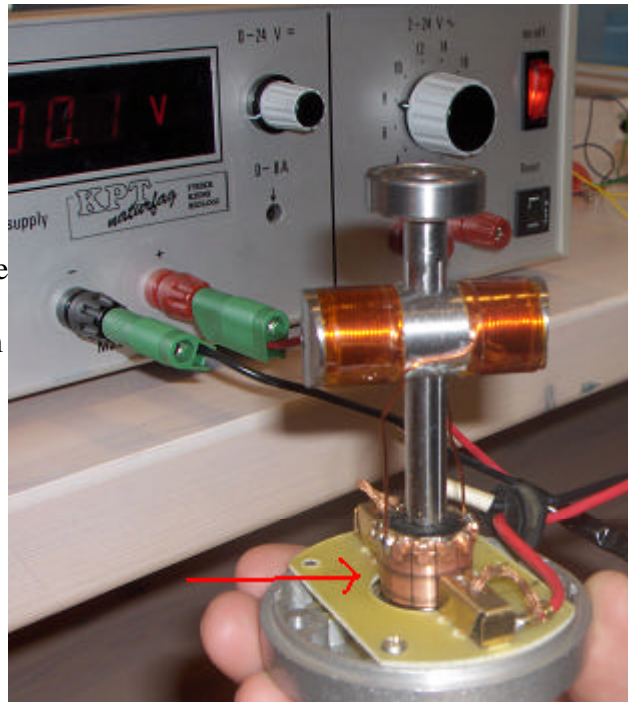
Strøm fra spenningskilde sendes inn gjennom **a)** og vikles oppover og nedover langs metallet til det er fire lag med kobber rundt det. Deretter går kobberlederen **b)** over til andre siden og vikles som et speilbilde av den motstående siden, og går så ut i **c)**.



Figur 4.2

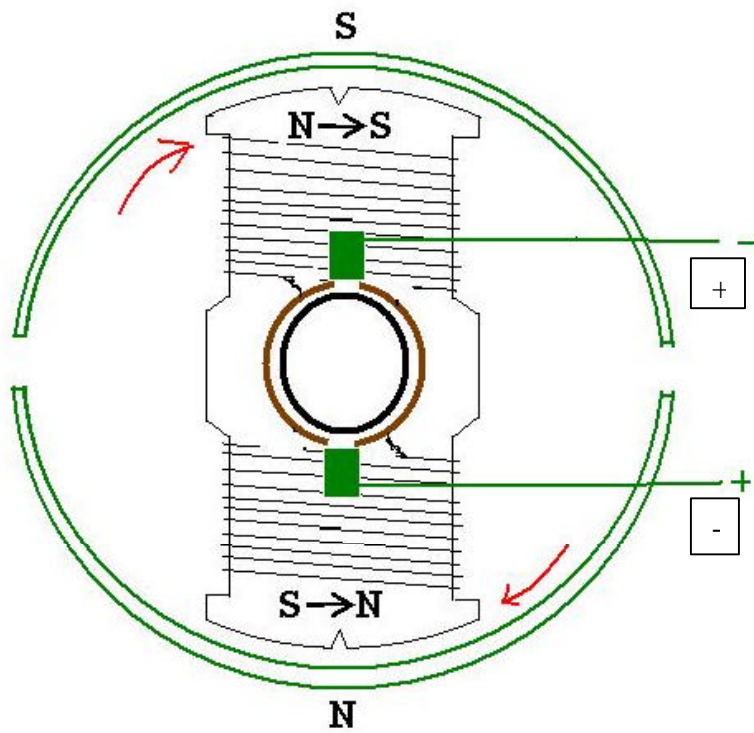
4.1.6 Kommutator:

Kommutatoren er en glidende strømførende kontakt mellom spenningskilde og spole. Kommutatoren skal i en DC-motor med én spole gjøre slik at kretsen hele tiden er lukket og at strømrretningen skifter retning når det er mest hensiktsmessig. I motorer med flere spoler (eller ingen avgrensede spoler) varierer da hvilke spoler som sendes strøm gjennom til enhver tid. For å forklare nærmere vår egen løsning og kommutatorens funksjon har vi illustrert el-motoren i ved to ulike tidspunkt (se neste side).

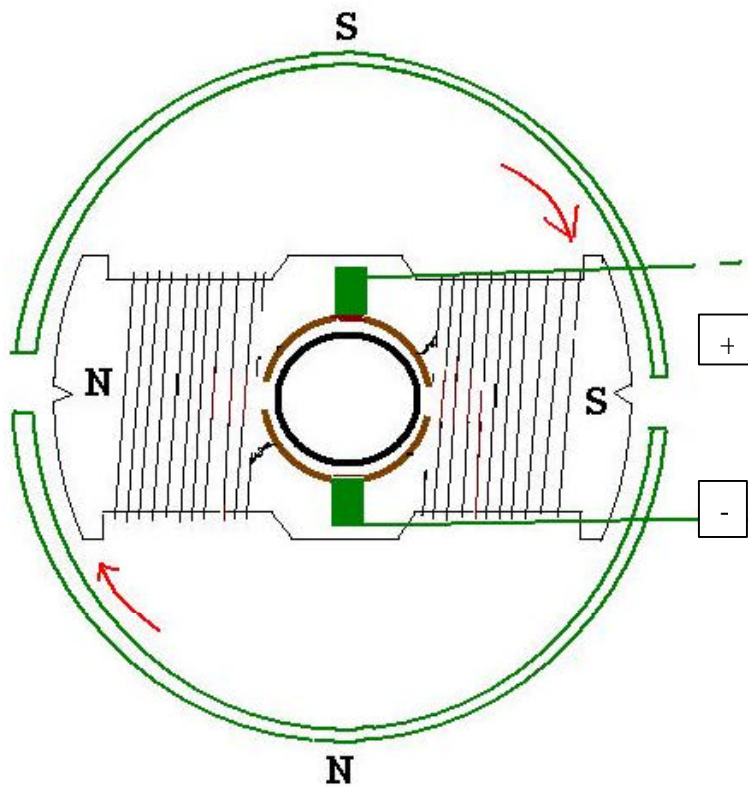


På figuren på neste side ser vi hvordan det induerte feltet i spolen er tidsbestemt og avhengig av hvilken posisjon rotoren står i. Ved høyrehåndsregelen ser vi at det induerte feltet veksler mellom å tiltrekke og frastøte permanentmagnetene hver gang rotoren står vertikalt og horisontalt. Denne løsningen kjennetegner DC-motoren og gjør slik at induert og permanent magnetfelt alltid skaper en drivende kraft i rotasjonsretningen.

Kommutatoren vår hentet vi fra en annen DC-motor, med tolvarmet rotor. For at strømvekslingen skulle virke i til vår motor, måtte vi seriekoble kommutatorplatene i en seksgang, slik at vi fikk to like, sammenhengende kommutatorplater, som på figuren. Dette hjalp Erling Kristiansen ved elektronikkverkstedet oss med. Han loddet sammen platene med tinn uten at det ødela noe for den glidende kontakten mellom kommutator og børster.



Figur 4.3: Likevektsposisjon ved $t = t_0$



Figur 4.4: Vertikal posisjon ved $t = t_0 + (1/4)T$

4.1.7 Når enden er god er allting godt:

Når alt dette var gjort kunne vi endelig teste ut motoren og gjøre fysiske målinger. Til stor jubel fungerte motoren etter to ukers planlegging, diskutering og masing på NTNU-ansatte!



Her er alle komponentene til motoren vår samlet. Monteringen går veldig fort og enkelt, så det er bare å løsne på lokket for de skuelystne.

5. Effekttap:

Vi har en del forskjellige momenter som spiller inn når vi skal regne på effekttap i en elektromotor. Blant annet jerntap, koppertap, luftgaptap, selvinduktans, friksjonstap og gyroeffekttap. Jerntap består av hysteretap og virvelstrømstap. Virvelstrømstapet oppstår i jernet til en elektrisk motor, generator eller transformator. Koppertap er tapet som oppstår på grunn av resistivitet i vindingene til en elektrisk motor, generator eller transformator. Luftgaptap oppstår i mellomrommet mellom stator og rotor. Friksjonstapet oppstår blant annet på grunn av treghet i kulelager i motoren eller mellom børstene og kommutatoren. Utenom luftgaptap og gyroeffekttap vil alle disse energitapene omsettes til varme.

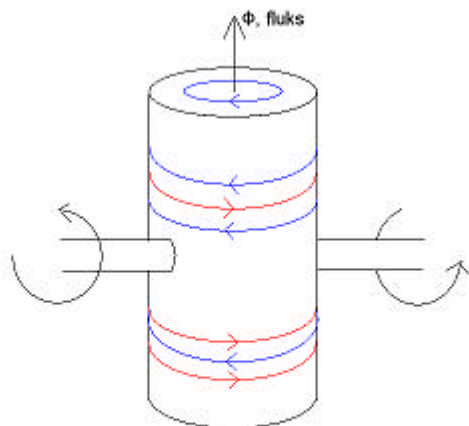
Til sammen utgjør virvelstrøms- og hysteretapene maskinens jerntap. Siden disse er knyttet til frekvensen, vil de være konstante for en gitt hastighet og konstant strøm. Hystereser er ommagnetisering av jernet, dess større frekvens en elektromagnet får dess oftere vil den ommagnetiseres.

5.1 Virvelstrømmer:

Virvelstrømmer, eller eddycurrents, oppstår i vår motor i det bløte jernet omhyllt av spolen. I jernemnet induserer magnetfeltet kraftige virvelstrømmer, som virker som kortsluttede sekundærspoler. De eksisterer bare så lenge det ytre magnetfeltet endrer feltstyrken. Dette er en konsekvens av Lenz' lov som sier at den induserte strømmen motsetter seg fluksforandringen. Mange tenker seg at virvelstrømmene oppfører seg som små tornadoer inne i materialet. Virvelstrømmene setter opp magnetfelder som er rettet mot det ytre magnetfeltet. Strømstyrken i virvelstrømmene er størst helt ute i overflaten av jernstykket vårt, men avtar forholdsvis raskt innover. Inntrengningsdybden blir definert som dybden inn til det stedet der strømstyrken har sunket til 37 % av verdien helt ute i overflaten. Inntrengningsdybden avtar etter som frekvensen øker. Inntrengningsdybden til eddystrømmer kan regnes ut i fra

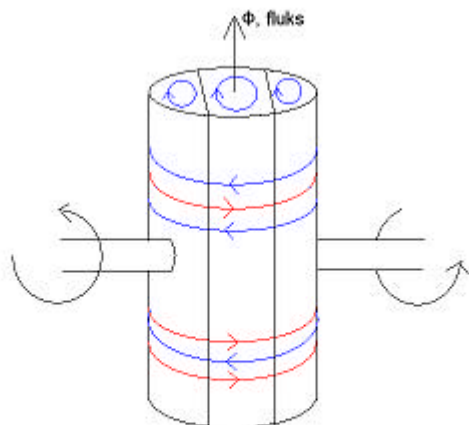
$$d = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\sigma}} \quad (1)$$

hvor $\omega = 2\pi f$ og f er frekvensen. σ er materialets ledningsevne. Varmeutviklingen blir størst der strømstyrken er størst. Siden vi har et massivt stykke bløt jern er energitapet som kommer av virvelstrømmer betydelig. Det merket vi da vi lot motoren gå over noe tid for å finne ulike vinkelhastigheter ved forskjellige strømstyrker. Da økte temperaturen til jernstykket vårt betraktelig.



Figur 5.1

Virvelstrømmene, blå linjer på figur 1 og 2, vil bevege seg i y- og x-retning som små virvler. De vil bore seg inn i materialet. De røde linjene er kobbertråden med retning på den påtrykte strømmen. I de moderne elektromotorene er spolen delt opp i mange små plater som er laminert på utsiden slik at de ikke fører strøm seg i mellom. Dette gjør sitt for å redusere virvelstrømmene siden de får mindre areal å boltre seg på, se figur 2.



Figur 5.2

Siden vår spole er laget av en eneste jernklump vil virvelstrømmene ha et stort vrimleområde og dermed vil mye av tilført energi i motoren gå tapt på grunn av virvelstrømmenes bevegelse. Vi har lett mye i bøker, på internett og spurt en del ansatte ved forskjellige institutt ved NTNU, og alle kommet med samme svar. Det å tallfeste slikt

tap som virvelstrøm er nesten ugjennomførbart. Hvis vi hadde visst hvor mye effekt vi får ut av motoren kunne vi ha prøvd å tallfeste noen av de andre tapene, men både luftgaptapet og gyroeffekttapet lar seg vanskelig tallfeste.

5.2 Kobbertap:

Strømgjennomgangen i et materiale forårsaker spenningsfall i samsvar med ohms lov ($V = R \cdot I$) med tilhørende joulsk effekttap, dette er med på å varme opp motoren vår. Dette innebærer videre at viklingene selv varmes opp. Viklingene vi brukte har en maksimal temperatur på 120° . Ledere med positiv temperaturkoeffisient får økt resistivitet i et proporsjonalt forhold til temperaturøkningen. Ved konstant strømgjennomgang betyr dette at det oppstår en selvforsterkende temperaturstignings-/resistivitetsøkningssprosess mens motoren går, noe som igjen øker av maskinens ohmske tap, gjerne kalt «kobbertap». Formelen for sammenhengen mellom resistivitet og temperatur ser slik ut

$$R = R_0 [1 + a(T - T_0)] \quad a = \text{temperatur koeffisient (for kobber} = 0,0068)$$

R= resistivitet, T= temperatur

5.3 Luftgaptap og gyroeffekt:

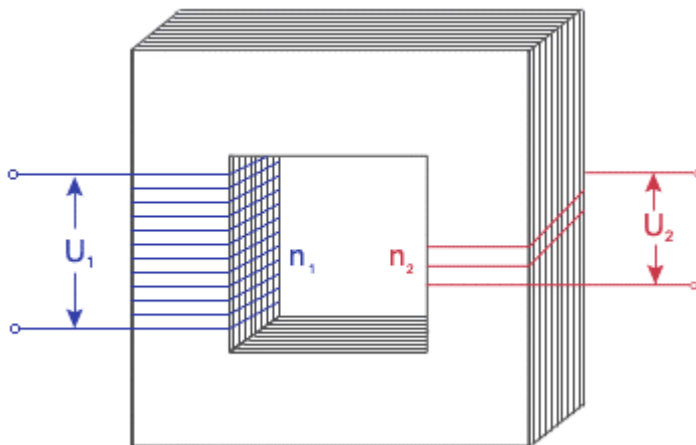
Permeabiliteten til luft er mye mindre enn til gode ferromagneter, rundt størrelsesorden 1 til 1000. Det betyr at evnen til å bli magnetisert og forsterke det totale magnetfeltet er mye større for ferromagneter enn for luft. Det er dette som ligger til grunn når vi snakker om luftgaptap. Siden luftgapet som må være i en elektromotor av bygningsmekaniske årsaker genererer et svakere magnetfelt enn det vi hadde fått hvis det hadde vært magnetiske materialer der, vil det gå ut over dreiemomentet til spolen vår. Det vil bety at vi får mindre kraft (N) av motoren og dermed også mindre effekt (W).

Gyroeffekttapet vil være et tap i form av kinetisk energi. Hvis ikke aksling eller rotor har en masse som er uniformt fordelt vil denne ujevnheten i balansepunkt i enheten skape en gyroeffekt og dermed vibrasjoner i motoren. Dette kunne vi kjenne da motoren gikk. Det er her viktig å ha massesentrum til rotor og aksling nærmest mulig rotasjonsaksen.

5.4 Hysterese:

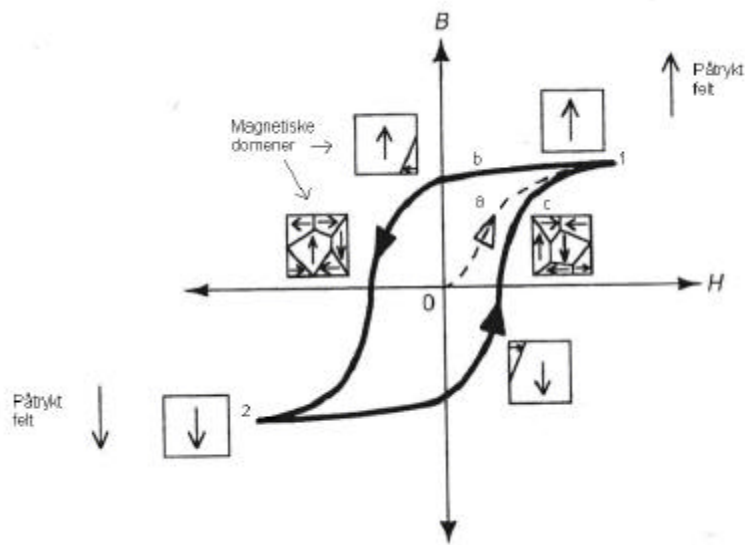
Fenomenet hystereser er ommagnetisering av ferromagnetiske materialer som påvirkes av et ytre magnetfelt. Hystereser er vanskelig å forklare inngående ved bare bruk av ord, så vi skal billedliggjøre fenomenet med et eksempel. Vi kan studere sammenhengen mellom den magnetiske feltstyrke \mathbf{H} og den magnetiske flukstetthet \mathbf{B} inne i et magnetisk materiale, i vårt tilfelle bløt jern, ved hjelp transformator-komponent av bløt jern. Når man skal regne på effekt og ta med energitapet av hystereser med i betraktningen vil det tapet være arealet under hystereser-kurven. Dette vil merkes som varme i det bløte jernet.

Figuren under består av en primærspole U_1 som er viklet rundt en av sidene til materialet vi ønsker å studere. Rundt komponenten er det også viklet en sekundærspole U_2 som har som formål å måle magnetfeltet i firkanten. \mathbf{H} - og \mathbf{B} -feltet varieres ved å variere ved å variere strømmen \mathbf{I} i primærspolen. Den magnetiske intensiteten \mathbf{H} er uavhengig av materialet og direkte proporsjonalt med strømstyrken \mathbf{I} i primærspolen. For denne sammenhengen se egen del om strøm og magnetisering side 13. Sammenhengen mellom \mathbf{B} og \mathbf{H} vil dermed gi oss sammenhengen mellom \mathbf{B} og \mathbf{I} .

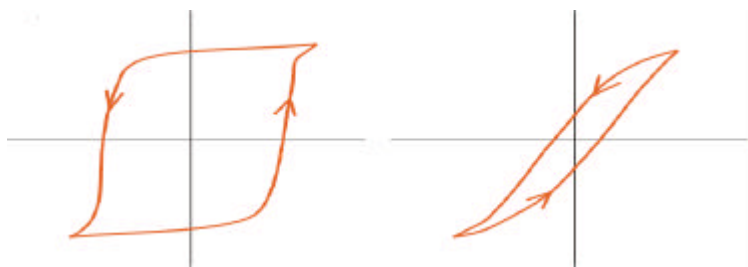


Figur 5.3

Som vi ser av graf 1 vil vi i origo ha \mathbf{I} , \mathbf{B} og $\mathbf{H} = 0$. Vi øker strømmen opp til en viss verdi for deretter å redusere den tilbake til null. Selv om magnetfeltet i utgangspunktet var null, har vi nå fått en permanent magnet med $B \neq 0$, men fortsatt med $\mathbf{I} = 0$. For å redusere \mathbf{B} feltet til null må vi sende en strøm med motsatt retning gjennom primærspolen. Sammenhengen mellom \mathbf{B} - og \mathbf{H} -feltene for et ferromagnetisk materiale er vist på figuren nedenfor. På figuren ser vi at \mathbf{B} -feltet øker raskt langs kurven a opp til en "asymptotisk" verdi (punkt 1). Ved denne verdien har vi oppnådd maksimal magnetisering og får deretter bare en svak økning av \mathbf{B} -feltet som funksjon av \mathbf{H} . For å redusere feltstyrken til $\mathbf{B} = 0$ må det sendes en strøm i motsatt retning, og dette svarer til en verdi $\mathbf{H} = -\mathbf{H}_0$. Kurven fortsetter til vi får maksimal magnetisering i punkt 2. Om strømmen snus igjen, får vi de samme forholdene som fra punkt 1, men med motsatt fortegn. Sammenhengen følger nå kurven c tilbake til punkt 1. Denne kurven, hvor sammenhengen mellom \mathbf{B} og \mathbf{H} avhenger av forhistorien, kalles en hystereser-kurve.



Figur 5.4



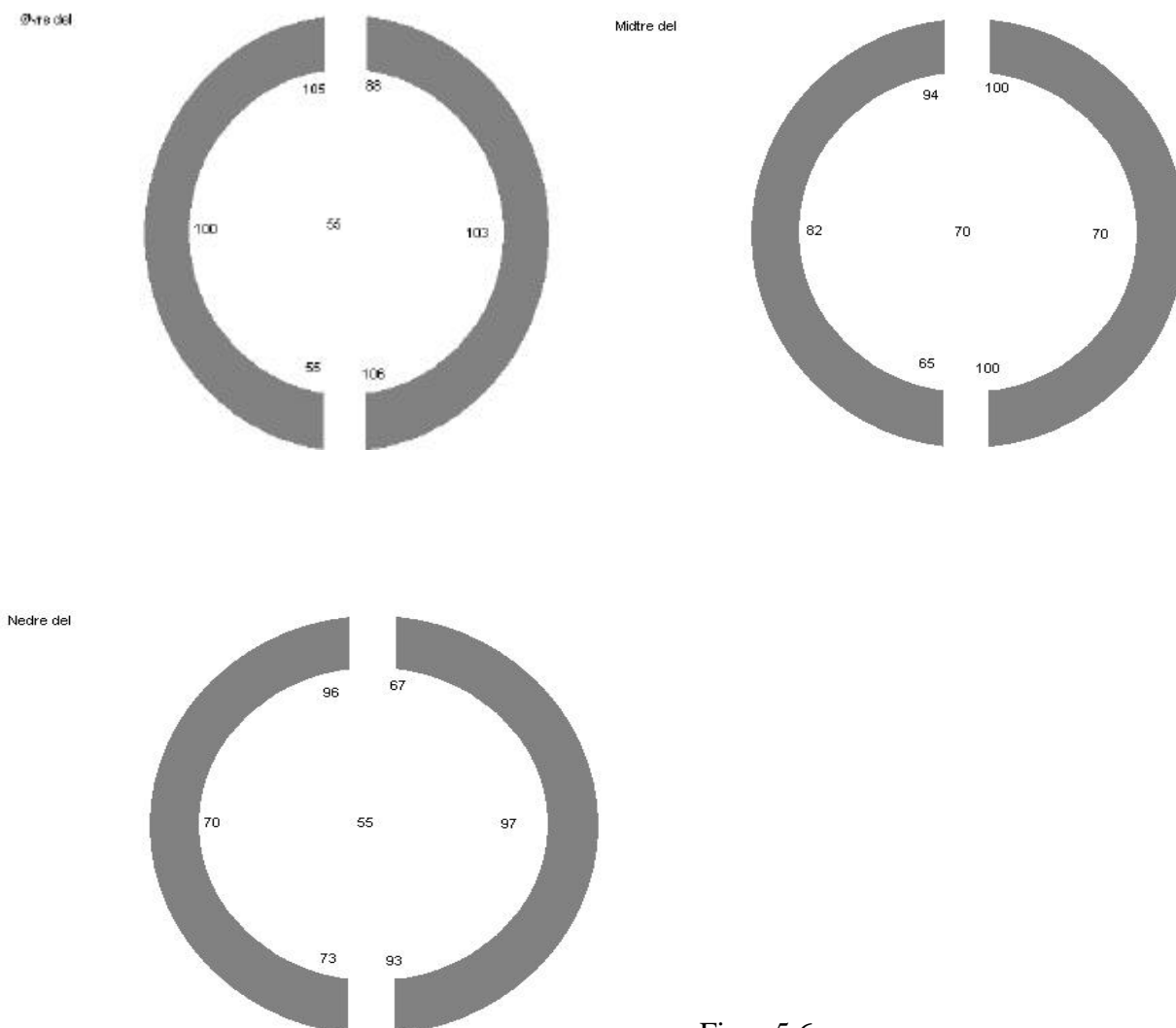
Figur 5.5

Hardt magnetisk materiale har en bredere hysteresekurve enn et bløtt magnetisk materiale. Det vil si at det skal stor endring i \mathbf{H} -feltet, eller sterk strømstyrke, til for å endre magnetfeltet i et hardt ferromagnetisk materiale. Det betyr at permanentmagneter må lages av hardt ferromagnetisk materiale og at kjernen i en elektromotor må lages i bløtt.

En permanent magnet kan avmagnetiseres ved hjelp av ytre magnetfelt, men dette kan også gjøres ved å varme materialet opp til en kritisk temperatur som varierer fra ett materiale til ett annet. Denne temperaturen kalles curie-temperaturen. For jern er $T_c = 1043 \text{ K}$. Når et ferromagnetisk materiale varmes opp til over sin curie-temperatur, blir det paramagnetisk. Denne overgangen finner sted når den termiske bevegelsen blir så stor at den dominerer over de kreftene som opprettholder den spontane innretningen. Paramagneter er materialer hvor dipolene vil ha tilfeldig orientering. Uten ytre påvirkning vil det totale magnetiske feltet i disse materialene være null.

I tillegg er det verdt å nevne at de magnetiske domenene i harde magnetiske materialer over tid vil gjennomgå spontane forandringer også ved romtemperatur. Dette så vi da vi målte magnetfeltet til vår permanentmagnet som er noen år gammel. Det varierte stort i styrke, helt fra 70mT til 97mT i lengderetning. Vi ble fortalt at magneten skulle stråle rett

ut i horisontal retning fra nord til sør og i teorien skulle være homogen. Da vi målte feltstyrken B viste det seg at den var langt fra homogen, se figurer på neste side.



Figur 5.6

Hvis vi skulle ha målt hysteresefeltet i vår motor hadde det vært med veldig mange antakelser i regnestykket. Vi hadde blitt nødt til å ta elektromagneten i motoren og målt hysteresekurven den produserer for deretter å multiplisere det med en ukjent konstant for å få riktig verdi. Dette siden ommagnetiseringen inne i elektromagneten er annerledes enn utenfor. Det kan også tenkes at det permanente magnetfeltet påvirker hysteresekurven slik at en eventuell måling av hystereser utenfor motoren ville vært annerledes enn inne i motoren, slik forholdene er i realiteten. Andre svakheter i en slik beregning er at vi har innhomogent felt, at vi må ta utgangspunkt i en "uendelig lang spole" og at den er fylt med en geometrisk perfekt sylinder av magnetiserbart materiale med kjent permeabilitet. Vi bare antok at relativ permeabilitet i vår elektromagnet lå rundt verdien for jern, altså μ_r lik ca 200. Videre kommer usikkerhetsmoment i målinger og utstyr.

5.5 Effekttap av selvinduktans:

Når man skal snakke om effekttap er det også viktig å nevne "generatoreffekten" eller selvinduktansen. Ettersom de elektriske motorene bygges på samme prinsipp som generatoren, kan det tenkes at den elektromagnetiske motoren også inducerer en spenning. For å forstå dette må vi se litt på Faraday's lov.

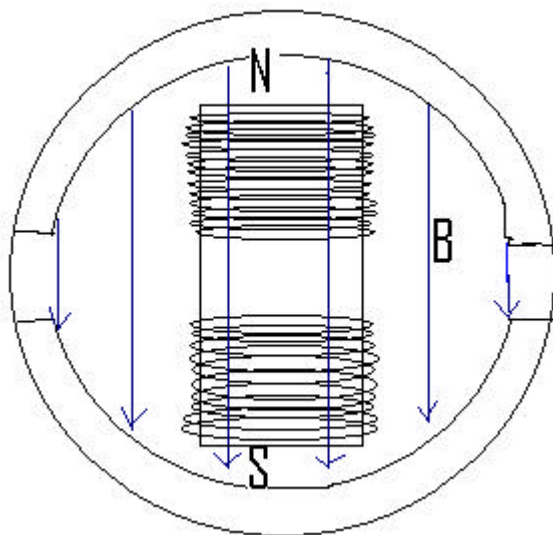
Faraday's lov gir en fundamental sammenheng mellom elektrisitet og magnetfelt. Ved å endre på magnetiske felt rundt strømførende sløyfer, kan det induseres en spenning (Emf). Den induerte spenningen i en sløyfe er altså lik den tidsderiverte av fluksen gjennom den. Videre er den induerte spenningen for en solenoide, lik den tidsderiverte av den totale fluksen gjennom alle "sløyfene".

Formelen lyder: $V_{(indusert)} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$, der N er lik ant. viklinger.

Eksempel: Vår elektromotors selvinduktans ved 3000 RPM:

Magnetisk fluks, Φ , gjennom en lukket sløyfe er definert som $B \cdot A$, der B er et ytre felt og A er arealet av sløyfen. Anta at det permanente ytre magnetfeltet i vår motor går i helt rette linjer fra nordpol til sørpol og at feltet er homogent med verdi 0,075 Tesla overalt. (Dette blir ifølge våre målinger middelverdien rundt området der spolen roterer – se måleresultat på forrige side) I tilstanden det går mest fluks gjennom spolen, er fluksen lik NBA:

Figur 5.7



Vi har da:

$$N = 160$$

$$D = 0,017 \text{ m}$$

$$A = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \text{ m}^2$$

$$B = 0,075 \text{ T}$$

Merk: På figuren ovenfor sees det bort ifra at vi sender spenning gjennom spolen og inducerer et felt som overgår det permanente når det bløte jernet er til stede. Om vi hadde tegnet inn dette mens motoren

var i gang, ville den totale fluksen (påtrykt + induert) alltid pekt i retning med vertikal komponent imot den permanente. Det vil gjøre det enklere å forestille seg endringen av

de permanente feltlinjene gjennom spolen om vi ser bort ifra dette. Den samme endringen i fluks vil være tilstede uavhengig av om vi sender strøm gjennom spolen eller ei.

Fluksen gjennom spolen i denne tilstanden blir da:

$$\Phi = N \cdot B \cdot A = N B p \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 160 \cdot 0,017 \cdot 3,14 \cdot (0,017/2)^2 = 0,0001542682,$$

altså ca 154 **mWb**

Straks vi kobler til en spenningskilde og setter i gang motoren, vil spolene begynne å rotere i magnetfeltet og fluksen vil endres periodisk:

Figur 5.8

-Vi definerer vinkelen mellom positivt B-felt, sløyfeplatene.



q til å være vinkelen og normalen til

Fluksen til enhver tid intuitivt:

gjennom spolen blir da

$$\Phi(t) = \Phi_0 \cdot \cos(\omega t)$$

og den induserte spenningen blir videre:
$$V_{(indusert)} = \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

$$= -\omega \Phi_0 \cdot \sin(\omega t)$$

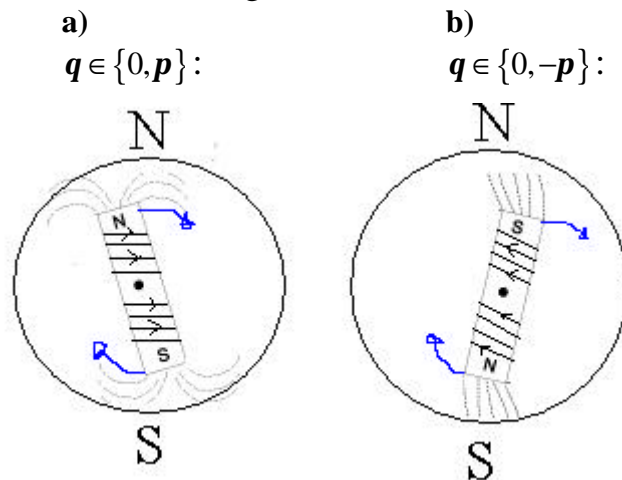
Hvis vi da bruker vår høyeste testede vinkelfrekvens på 3000 omdreiinger i minuttet ved 7,9 Volt som påtrykt spenning, altså $\omega = 100\pi$ rad/sek, kan vi beregne denne spenningen som induseres i spolen i motsatt retning av den påtrykte som funksjon av tiden.

$$V_{(indusert)} = -0,048 \cdot \sin(100\pi \cdot t)$$

Og tatt i betraktning at positiv og negativ retning endres for hver halve periode; akkurat idet spolen står vinkelrett på magnetfeltet og fluksen er lik null, så blir spenningen alltid med samme fortegn.

Retningen på spenningen blir da ifølge Lenz' Lov den retningen som gir en kraft som igjen motvirker endringen (se neste side:)

Figur 5.9

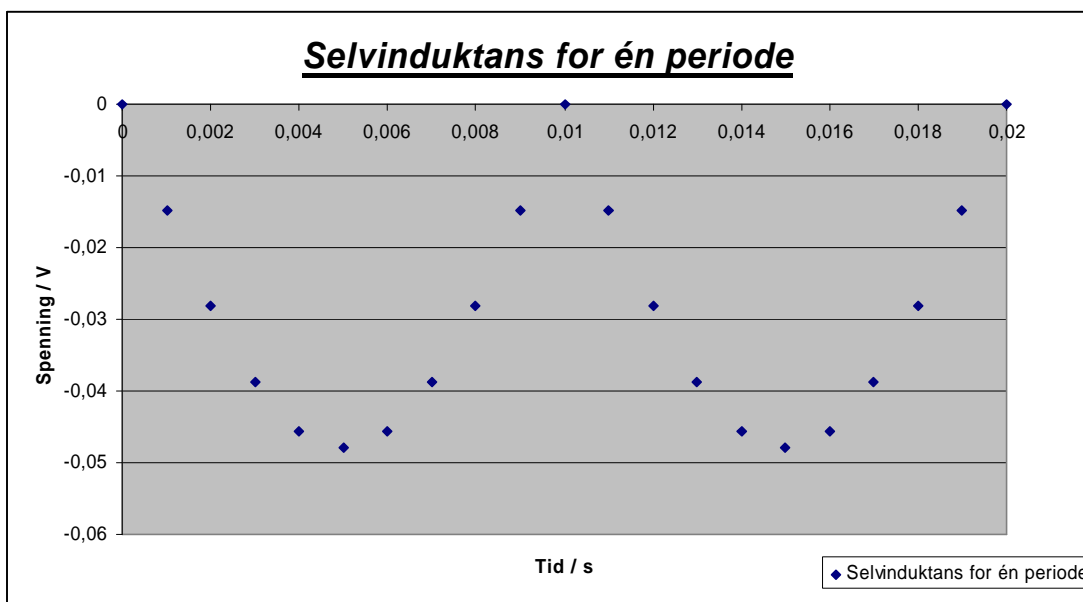


Av tegningen ser vi at spenningen må skifte fortegn akkurat idet spolen står vinkelrett på det permanente magnetiske feltet. Akkurat ved dette tidspunktet vil også kommutatoren på akslingen gjøre slik at strømmen som sendes ut av spolen skifter fortegn. Med andre ord: Spenningen vil ikke skifte fortegn.

Spenningen vil da variere over tid, og imot den påtrykte spenningen når vi kobler til en likestrømskilde.

Vi forutsetter at spenningskilden kjører en spenning på 7,9 og at den ikke kompenserer for ytre påvirkninger på spenningen. Vi forutsetter også at selvinduktansen er den eneste ytre spenningspåvirkningen. Da kan vi fremstille en tenkt endring av spenningen gjennom spolen i en graf:

$$V_{(\text{indusert})} = -0,048 \cdot |\sin(100p \cdot t)|$$



Graf 5.1

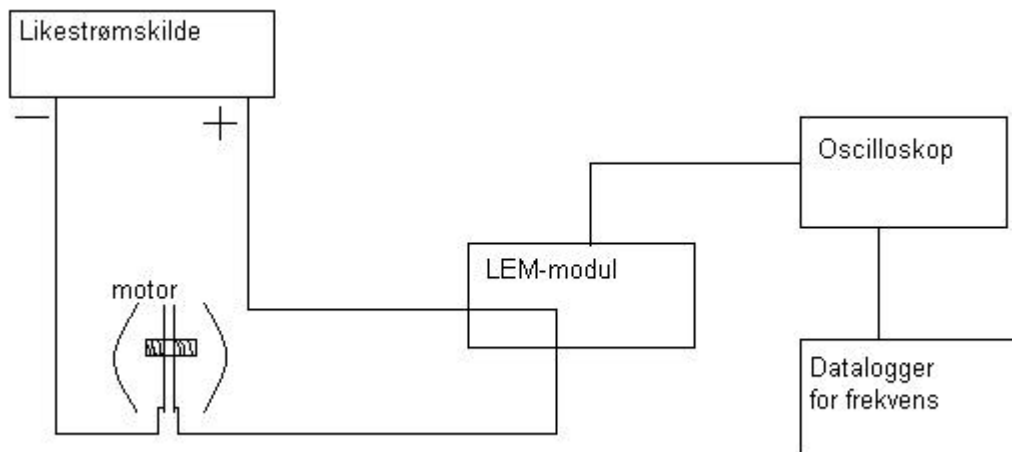
Vi ser at spenningsendringen 0,048 Volt ikke blir betydelig i forhold til den påtrykte spenningen på 7,9 Volt. Strømmen gjennom spolen blir da ikke særlig svekket (max 0,6%), og dette blir igjen ikke noe særlig tap av effekten. For at selvinduktansen virkelig skal ha noe å si må man ha en mer effektiv motor enn vår. En motor som bruker lite spenning og har stor vinkelfrekvens blir i større grad påvirket av denne induserte motspenningen. Ta for eksempel en tilsvarende motor som kjører på 2 Volt og har da ti ganger så høy omdreingshastighet som vår. Da vil den i følge formelen vår: $V_{(indusert)} = -\omega\Phi_0 \cdot \sin(\omega t)$, få ca en halv Volt induert og en maksimal svekkelse på nesten 25%.

Å regne nøyaktig på selvinduktansen er svært komplisert. I vår elektromotor måtte vi nok tatt hensyn til bl.a. økningen i resistansen i lederne når temperaturen økte og virvelstrømmene som også danner en mer virkningsfull "selvinduktans". For en ideell motor uten resistans i komponentene, ingen friksjon og med en spole fylt med høyt magnetiserbart stoff som ikke produserer virvelstrøm (eddy-current), så ville selvinduktansen spilt en mye større rolle for effektetapet. I et slikt tilfelle ville selvinduktansen hindret motoren i å øke sin vinkelfrekvens i det uendelige. Selvinduktansen øker proporsjonalt med vinkelfrekvensen og vil til slutt nå igjen den påtrykte spenningen. Det kan da tenkes at de som lager de mer avanserte elektriske motorene må ta mer hensyn til selvinduktans i sine beregninger.

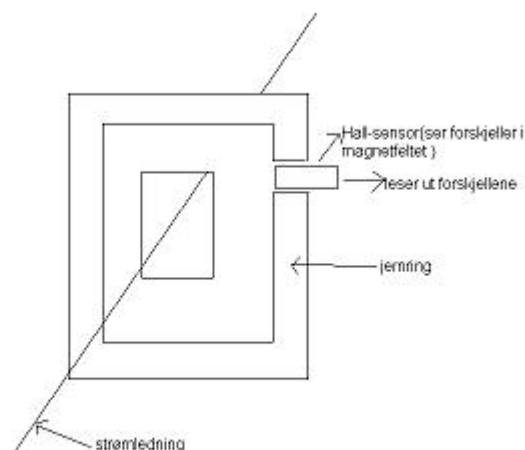
6. Målinger og resultat:

6.1 Utregninger av sirkelfrekvenser:

Figur 6.1

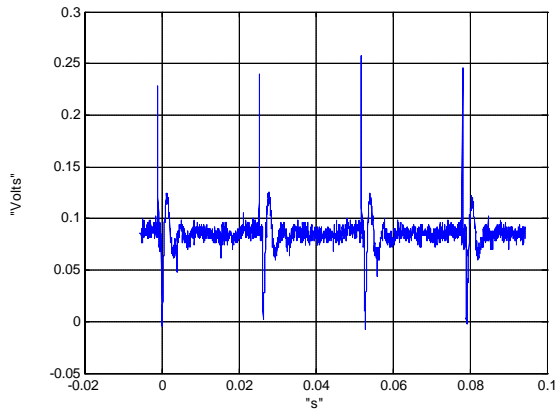


Slik koblet vi utstyret sammen da vi skulle finne farten til vår motoren. Ledningen er her ikke fysisk koblet til LEM-modulen, den går derimot gjennom et rør som detekterer forandringen i Hall-feltet. Dette forsøket gjennomførte vi på en lab på elektrobygget med hjelp av stipendiat Eirik Forr. Nedenfor har vi laget en forenklet modell av LEM-Modulen. LEM-Modulen fungerer slik at magnetfeltet som settes opp rundt lederen vil variere på grunn av kortslutningen i motoren vår som oppstår to ganger per periode. Hallsensoren oppfatter disse forandringene i magnetfeltet. Hallsensoren er koblet til et oscilloskop som igjen er koblet til en datalogger.

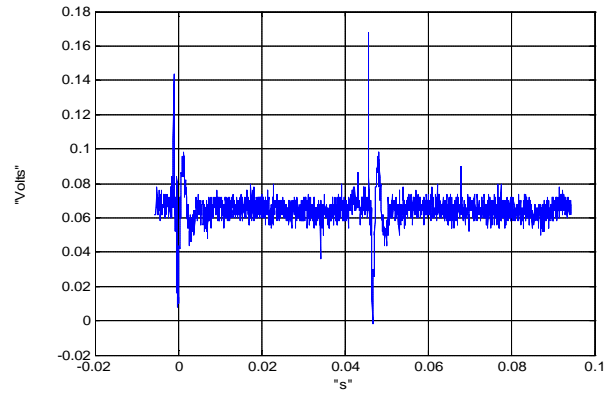


Figur 6.2

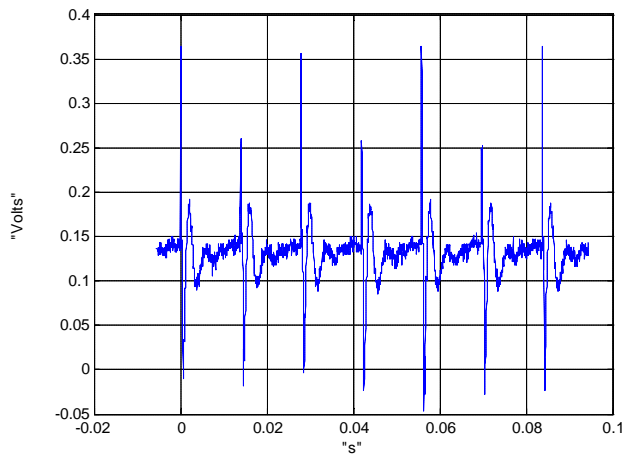
Toppene vi ser på grafene er hver gang kretsen i motoren kortsluttes, dette vil skje to ganger pr omdreining, så en periode er tiden mellom annenhver topp. Teksten under grafene sier hvor mye strøm og spenning vi puttet inn i motoren. Verdiene på y-aksen representerer den induerte spenningen fra ledningen gjennom LEM-modulen.



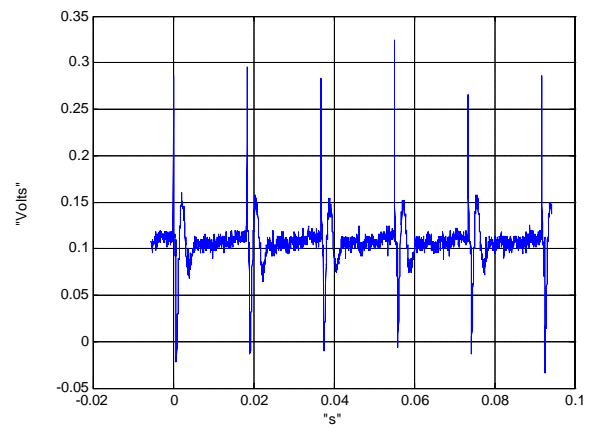
Graf 6.1: 1,96 A og 3,4 V



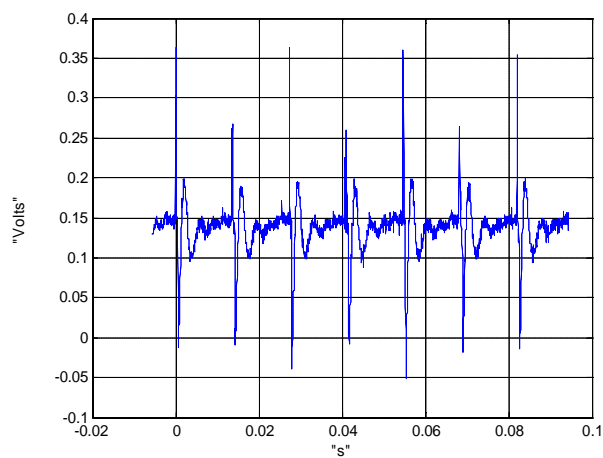
Graf 6.2: 1,54A og 2 V



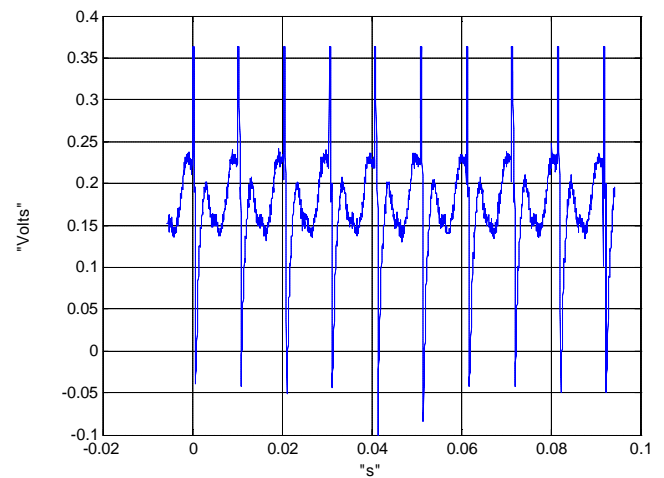
Graf 6.3: 3 A og 5,5 V



Graf 6.4: 2,5 A og 4,5 V



Graf 6.5: 3,25 A og 6V



Graf 6.6: 4,15 A og 7,9 V

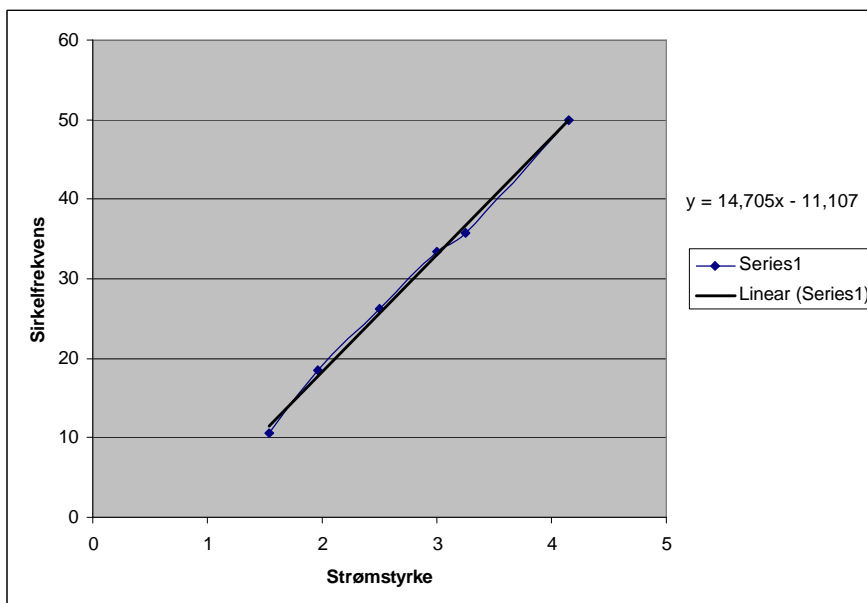
Strømstyrke[A]	Spenning[V]	Periode[s]	Sirkelfrekvens[s ⁻¹]	r/min
1,54	2	0,094	10,638	638,298
1,96	3,4	0,054	18,519	1111,111
2,5	4,5	0,038	26,316	1578,947
3	5,5	0,030	33,333	2000,000
3,25	6	0,028	35,714	2142,857
4,15	7,9	0,020	50,000	3000,000

Tabell 6.1

Etter å ha lest av periodene til de enkelte strømstyrkene førte vi disse inn i tabell 2 og kunne dermed regne ut sirkelfrekvensen til motoren fra:

$$f = \frac{1}{T}$$

På det meste klarte vi å få ut en fart på 50 omdreininger i sekundet, eller 3000 r/min, men dette kunnet vært høyere hadde vi hatt kraftigere utstyr som kunne levert mer enn 4,15 A. Denne farten kan derimot ikke være noen arbeidshastighet på motoren, da isolasjonsbelegget på koppertråden vil smelte ved ca 120 grader, og kretsen vil da kortslutte. Vi ble anbefalt å ikke bruke en strømstyrke på mer enn 2 A over lengre tid.



Graf 6.7

Vi kan se av denne grafen, som viser sirkelfrekvensen som funksjon av strømstyrken, at det er en lineær sammenheng mellom dem. Grunnet vår noe enkle oppbygning av

motoren måtte vi starte den manuelt, og da måtte vi ha en strømstyrke på min 2 A. Vi måtte i tillegg kjøre en strøm på over 1,5 A inn i motoren for at den skulle fortsette å dreie. Siden vi ble anbefalt å ikke tilføre inn mer enn 2A, vil denne motoren ikke kunne produsere mye effekt.

6.2 Tilnærming av magnetfelt fra spolen:

Uten jern i solenoiden vil spolen sette opp et magnetfelt, og vi antar her under utregningene at vi har en uendelig lang spole med jevn viklingstetthet.

Fra Amperes lov har vi:

$$\oint_l B \cdot dl = \mu_0 I$$

$$\rightarrow Bl = \mu_0 n l I_0$$

$$B = \mu_0 n I_0$$

Hvor n er antall viklinger pr lengdeenhet og I_0 er strømmen vi putter inn. I spolen vår har vi til sammen 160 viklinger. Og hele spolen vår er 46 mm lang. Under utregningene her regner vi på magnetfeltet med en strøm på 4,15 A.

$$\rightarrow B = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{160}{0,046} \cdot 4,15 = 0,018T$$

Regner så ut det totale magnetfeltet vi får fra spolen med jern i kjernen. Dette svaret vil da bli lik summen av feltet fra strømmen i viklingene, og feltet fra overflatestrømmen i jernet.

Igjen, bruker Amperes lov;

$$\oint_l B \cdot dl = \mu_0 I$$

$$Bl = \mu_0 (n l I_0 + l j_m)$$

Hvor j_m er flatestrømstettheten(strøm pr lengdeenhet) til overflatestrømmen til jernet.

$$B = B_0 + \mu_0 M$$

B_0 er magnetfeltet fra strømmen i viklingene og M er et begrep vi innfører kalt magnetisering. Her er størrelsen på magnetiseringen ikke noe annet enn størrelsen på overflatestrømstettheten til jernet inni spolen.

Vi kan skrive

$$M = c \frac{B_0}{\mu_0}$$

hvor c er stoffets magnetiske susceptibilitet, og vi får da videre

$$B = B_0 + \mu_0 M = (1 + c)B_0$$

Vi har innført en størrelse relativ permeabilitet μ_r definert ved:

$$(1 + c) = \mu_r$$

Vi får da et uttrykk for det totale magnetfeltet fra spolen og jernet:

$$B = \mu_r B_0 = 200 \cdot 0,018 = 3,6T$$

Noe som i og for seg er et meget kraftig magnetfelt, større enn magnetfeltet fra permanentmagneten, men det må det jo også være for at motoren vår skal kunne fungere.

En kommentar til disse resultatene er at de muligens i en liten grad stemmer med vår motor, de er kun teoretiske verdier. For eksempel med viklingstettheten som i teorien regnes ut i fra at det kun er et lag viklinger, har vi i vår motor fire lag. I tillegg var det meget vanskelig for oss å kunne måle noe magnetfelt i sammensatt motor, noe som kunne ha bekreftet/avkreftet våre utregninger.

7. Noen elektromotorer i dag:

Det finnes flere typer elektromotorer i dag, alt avhengig av hva den skal brukes til. Motorene kan være like utvendig, men er som regel forskjellige i måten de er bygd opp på innenfra og hvor mye effekt man kan få ut av dem. Fordelen med en DC-motor kontra en AC-motor er at DC-motoren er meget enkel å kontrollere farten på. Den egenskapen at energikilden er koblet direkte til feltet i motoren tillatter en meget presis spenningskontroll, hvilket er nødvendig med fart og momentavhengige oppgaver. DC-motoren brukes ofte på kjøretøyer, i for eksempel en golfbil. I biler brukes DC-motorer med permanentmagneter for eksempel i vindusheiser, vindusviskere og startmotorer. Denne typen elektriske motorer produserer et høyt dreiemoment ved lav fart, og er selvbremsende ved frakobling av strøm. En ulempe med denne type motor er at de ikke kan operere over lengre tid med høy fart, fordi de da vil overopphete og dermed destruere seg selv.

Elektromotorer er i stadig utvikling for å kunne være et fullverdig alternativ til brenselmotorer. Det tyske firmaet Siemens har klart å bygge den første høytemperatur-superledende motoren. Den superledende effekten har vært kjent lenge, hvor den elektriske motstanden forsvinner når temperaturen i visse materialer senkes til en bestemt temperatur. Resultatet er store strømtettheter i de strømførende lederne og dermed oppnås mye større magnetiske feltstyrker. I dag ligger strømtettheten i superledere typisk ti ganger høyere enn i kopperledere. På grunn av den store strømtettheten kan rotoren til en slik motor bygges vesentlig mindre enn for en konvensjonell motor. Prototypmotoren til Siemens har en maksimal strømtetthet på ca 75 A/mm^2 , mens koppertråd normalt blir belastet med ca $4\text{-}8 \text{ A/mm}^2$. Superledere tåler kun små vekselstrømfelt, dermed er det per i dag bare mulig å oppnå superledning i likestrømskretser, og for å oppnå et tilstrekkelig magnetiseringsfelt må lederen holdes avkjølt ned mot 25 K . Selv om Siemens motor ikke var designet for høy virkningsgrad, viser testresultater at den har lavere tap enn konvensjonelle motorer, og det også når en tar med den nødvendige nedkjølingen i regnestykket.

I bilindustrien har de største selskapene sett alvoret i forurensingsproblemen til brenselmotorer, og innsett at disse motorene er mindre aktuelle når vi tar miljøspørsmålet med i betraktning. Toyota har prøvd å være i forkant av utviklingen av hybridbiler. De har laget en bil med navn Prius som har både bensin- og elektromotor. Ved vanlig kjøring bruker bilen kun elektromotoren, men hvis en gir på vil også bensinmotoren hjelpe til. Prius bruker 0,4 liter på mila, og har en meget bra energiutnyttelse. For eksempel vil all bremsing lade batteriene, hjulbremsene er elektriske så bremsekraften kjøres direkte i retur som elektrisitet.

En av verdens største likestrømsmaskiner på 143 tonn står i verkstedet til Component Service på Brakerøya i Drammen. Der gjennomgår den fullstendig overhaling



Rotoren har en diameter på 4,1 meter. Ytelsen er på 3080 kilowatt og motoren roterer med 60 omdreiningar i minuttet.

Vår er ikke fult så stor...

8. Kommentarer:

Vi er godt fornøyde med motoren og prosjektet vårt. Det eneste vi er misfornøyd med er at vi ikke fikk målt effekten motoren vår kunne yte. Da kunne vi blant annet prøvd å fastsette energitapet vi får av virvelstrømmer i rotoren vår. Vi forhørte oss ved mange fakulteter og ved mange verksteder på NTNU og fikk noen ideer om hvordan effektmålingen kunne gjøres, men ingen hadde noen apparaturer som kunne hjelpe. En av ideene var å feste en hyssing fra akslingen vår med et masselement ved enden og løfte det opp, for så å ta tiden motoren brukte på løfte massen en viss lengde. Ut fra dette kunne vi ha sammenlignet vår effekt med 1 hestekraft, altså effekt nok til å kunne heise 75 kg 1 meter opp i luften på ett sekund. En annen idé gikk ut på å feste en drill til akslingen og måle strømmen vi får generert. Problemet da ville vært å vite eksakt hvor mye effekt drillen gir oss, og om det er direkte sammenheng mellom effekttapet vi får om vi bruker motoren som en generator, eller nettopp som en motor. En tredje mulighet var å bruke en momentnøkkel til å finne dreiemomentet ved en viss spenning. Men vi fikk aldri tak i en momentnøkkel. Uansett så føler vi at teorien vi nå kan gir oss nok oversikt til å kunne diskutere effekttap kvalitativt, med eller uten målinger.

9. Kilder:

Bøker:

- Bok: Generell fysikk Bind 2 Varmelære og elektromagnetisme (LHL)
- Bok: Electronic Motor Data Handbook, Martin Clifford
- Bok: Modeling and High – Performance Control of Electric Machines, John Chiasson
- Bok: Brushless Permanent – Magnet and Reluctance Motor Drives, T. J. E. Miller
- Internett

Nett:

- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- www.fys.uio.no/studier/kurs/fy040/teori/magnetisme.ppt
- <http://www.elsiden.no/eltekn/magn/Kap%2054/5.HTM>
- <http://www.reliance.com/mtr/mtrthrmn.htm>
- <http://www.iet.aau.dk/~por/teaching/emsd7e11/mm3.pdf>
- http://folk.uio.no/ogm/fys1120/Oblig2_05.pdf
- <http://www.dself.dsl.pipex.com/MUSEUM/POWER/eleceng/eleceng.htm>
- http://www.museumsnett.no/ntm/no/utstillingene/stroem_lys/elmot.htm
- <http://www.howstuffworks.com>

med mer.....

Takk til

- Elektroverksted Institutt for Fysikk NTNU ved Arne Moholt, Knut Gjervan og Erling Kristiansen
- Mekanisk verksted Institutt for Fysikk NTNU Arnulf Bjøldstad
- Elektroverksted Institutt for Elkraft NTNU
- Professor Roy Nilsen Institutt for Elkraft NTNU
- Stipendiat Erik Forr Institutt for Elkraft NTNU
- Professor Thor Bernt Melø Institutt for Fysikk NTNU
- Amanuensis Jon Andreas Støvneng Institutt for Fysikk NTNU