

Versjon 5.0

Nils Kr. Rossing og Halsten Aastebøl

Elektrisitetsslære



NTNU



Trondheim

Skolelaboratoriet
for matematikk, naturfag
og teknologi

Juli 2021

ELEKTRISITETSLÆRE

Trondheim 2021

Elektrisitetst re

Layout: Nils Kr. Rossing, Skolelaboratoriet
Oppgaver, tekst: Nils Kr. Rossing, Skolelaboratoriet
Halsten Aastebøl, Institutt for elkraftteknikk NTNU
Forsidebilde: Nils Kr. Rossing, Skolelaboratoriet (sykkeldynamo)

Faglige spørsmål rettes til:

Skolelaboratoriet ved NTNU

v/Nils Kr. Rossing, 73 55 11 91, e-post: nils.rossing@plu.ntnu.no

Realfagbygget, Høgskoleringen 5
7491 Trondheim

Skolelaboratoriet for matematikk, naturfag og teknologi

Telefon: 73 55 11 43

<http://www.ntnu.no/Skolelab>

Utgave 5.0 – 22.07.20

Elektrisitetsslære

Nils Kr. Rossing og Halsten Aastebøl

Skolelaboratoriet for matematikk, naturfag og teknologi, NTNU



Forord

Heftet er i utgangspunktet skrevet for kurset Teknologi og Forskningslære modul I. Mye av stoffet er hentet fra tidligere utgivelser i SLserien: *Fra elektriske kretser til intelligente hus – Kurshefte* skrevet av Nils Kr. Rossing og *Elektronikk for skolen* av Berit Bungum, Thorarin Stefansson og Nils Kr. Rossing.

Heftet ble våren 2015 supplert med temaet induksjon og generatorer i forbindelse med ToF modul III som omhandler temaene vindmøller og vannkraft og som er et samarbeid med Marintek. I den forbindelse var det naturlig å inkludere stoff om likeretting siden vekselspanningen fra generatorne måtte likerettes. Halsten Aastebøl ved Institutt for elkraftteknikk NTNU hadde utarbeidet et undervisningsopplegg knyttet til dobbelt likeretting i forbindelse med studentoppgaver ved studiestart. Det var derfor naturlig å inkludere dette stoffet, ikke minst fordi stoffet også ble brukt i Energiløypa opp til 2019. Per-Odd Eggen har lest gjennom og kommentert avsnittet om atommodeller.

Heftet ble utvidet i forbindelse med ToF modul IV kurset høsten 2015 da temaet var motorer. Denne delen tar utgangspunkt i elektromagnetiske krefter som oppstår mellom strømførende ledninger og permanent magneter. Avsnittet ender opp med å beskrive børsteløse motorer som benyttes i Marinteks båtprosjekt.

I tillegg ble heftet utvidet med temaet lysdioder (LED) og solceller i forbindelse med KOMPIS Naturfag våren 2016, og magnetisme i forbindelse med at temaet *motorer* ble gjentatt i ToF modul IV høsten 2016.

I 2021 ble de innledende kapitlene om grunnlaget for elektrisitetsslære gjennomgått og oppgradert i forbindelse med at tema skulle brukes i forbindelse med DeKom. Dessuten ble det skrevet til et avsnitt om misoppfatninger inkludert oppsummering av resultatene fra tre studier gjort av masterstudenter om misoppfatninger knyttet til elektrisitetsslære fra grunnskole til universitet i perioden 2017 – 2021. En takk til Bojana Gajic og Lars M. Lundheim som har utviklet, gjennomført og oppsummert tester av studenter i de første årene av studiet ved Institutt for elektroniske systemer og Institutt for teknisk kybernetikk. Også en takk til masterstudentene Morten-André Olsen (2018), Brage Foss (2019) og Peter Fadum Lefsaker (2021) som har gjennomført masterstudier innen temaet misoppfatninger innen elektrisitetsslære fra barneskole til universitet.

Det er gjennom hele heftet forsøkt å ha en fenomenologisk tilnærming til stoffet. Dette er ikke fordi vi anser matematikken som uviktig, men snarere ut fra tanken om at det er tilfredsstillende å kunne oppleve en intuitiv forståelse for fenomenene før man modulerer dem matematisk. Det har også vært spennende å se hvor langt det har vært mulig å gå uten å bruke matematiske beskrivelser av et så teoretisk og abstrakt felt som elektrisitetsslære.

Det gjenstår fortsatt en del arbeid før heftet er ferdig, men vi anser at det tross alt vil kunne ha nytteverdi selv om det ikke er komplett.

Trondheim 23.07.21
Nils Kr. Rossing





Innhold

1 Innledning	13
1.1 Kompetansemål	13
1.2 En didaktisk tilnærming	14
1.3 En tilnærming til elektrisitetstlære ved henvisning til dagligdagse hendelser	17
1.4 En oversikt – grunnlaget	19
2 Grunnleggende begreper innen elektrisitetstlære, en kvalitativ tilnærming	25
2.1 En atommodell	25
2.2 Elektrisk ladning	27
2.2.1 Statisk elektrisitet	27
2.3 Elektrisk felt og elektrisk strøm	32
2.4 Elektrisk spenning	39
2.5 Elektrisk effekt og energi	41
2.6 Elektrisk ledningsevne og motstand	42
2.6.1 Ledningsevnen til metaller	42
2.6.2 Motstander	42
2.7 Grunnleggende kretser	44
2.7.1 Sluttet krets	44
2.7.2 Serie- og parallellkoblede kretser	46
2.7.3 Ohms lov	47
2.7.4 Serie- og parallellkobling av motstander	48
2.7.5 Kirchhoffs lover	49
2.8 Vanlige misoppfatninger om elektrisitet	51
2.9 Diagnostisering av misoppfatninger	53
2.10 “Dialogisk undervisning”	63
2.10.1 Erfaringer fra en masteroppgave	64
3 Utforskning av kretser	67
3.1 Lag en enkel hemmelig “boks” I ved hjelp av papp og sølvpapir	67
3.2 Lag en enkel laserkuttet hemmelig boks II	72
3.3 Lag en avansert laserkuttet hemmelig boks III	75
3.3.1 Framstilling av en avansert hemmelig boks	76
3.3.2 Bruk av den avanserte boksen	79
4 Magnetisme	81



4.1	Jordmagnetisme og kompasset	81
4.2	Styrken til magneter	83
4.3	Magnetiske feltlinjer	85
5	Elektriske energiomvandlerne - en introduksjon	89
5.1	Noen fellestrekk ved energiomvandlerne	89
6	Fra mekanisk til elektrisk energi	93
6.1	Mekanisk energi	93
6.2	Fra mekanisk til elektrisk energi	94
6.3	Induksjon	95
6.4	Strøm og magnetfelt	95
6.5	Lenz' lov	96
6.6	Antall viklinger	98
6.7	Generatoren	98
6.8	Steppmotor som generator	106
6.9	Fra lave til høye spenninger (Transformatoren)	108
6.9.1	Transformatorens virkemåte	109
6.9.2	Hvorfor høyspentlinjer?	110
7	Fra elektrisk energi til mekanisk bevegelse	113
7.1	Elektromagnetisme, Ørstedts forsøk	113
7.2	Kraftvirkning på strømførende leder i magnetfelt	119
7.3	Høyrehåndsregelen	120
7.4	Den første elektriske "motoren" – Faradays "motor"	121
7.5	Likestrømsmotoren	125
7.6	Børsteløse motorer	131
7.6.1	To hovedtyper av børsteløse motorer	131
7.6.2	Virkemåten til børsteløse likestrømsmotorer	132
7.6.3	Fordeler og ulemper med børsteløse motorer	135
7.6.4	Styreelektronikk – ESC (Electronic Speed Control)	135
8	Fra elektrisk energi til lys (LED) – pn-overgangen	139
8.1	Halvledere og pn-overgangen	139
8.2	LED (Light emitting diode)	144
8.2.1	Lysdioden (LED) - virkemåte	145
8.3	Lysstoffrør (Fluoriserende lys)	149
8.3.1	Utladningskuler	150
9	Fra lys til elektrisk energi (solceller)	153



9.1	Virkningsgrad og pris	153
9.2	En første tilnærming til solcellens virkemåte	154
9.3	En dypere forklaring av solcellens virkemåte	155
9.4	Serie- og parallellkobling av solceller	157
9.4.1	Seriekobling av celler	157
9.4.2	Parallellkobling av celler	158
9.5	Framstilling av solcellepaneler	160
10	Likeretning - fra vekselspanning til likespenning	169
10.1	Utforskning av brolikeretter ved hjelp av lysdioder (LED)	169
10.1.1	Hva er en likeretter?	169
10.1.2	Hvordan virker en enkel diodelikeretter?	170
10.1.3	Hvordan virker en brolikeretter?	171
10.2	Oppkobling av brolikeretter	172
10.3	Oppkobling av dobbelt brolikeretter for vindturbinprosjekt	177
11	Referanseliste	179
Vedlegg A	Laboratorieoppgaver	180
A.1	Eksempel på laboratorieoppgave med vannkraftverk	180
A.2	Måling av terskelspenning for lysdioder	185
Vedlegg B	Kopioriginaler hemmelige bokser	188
B.1	Kopi original hemmelig "boks"	188
B.2	Hemmelig boks avansert	190





1 Innledning

Heftet beskriver grunnleggende elektrisitetsslære med vekt på en kvalitativ forståelse av de viktigste begrepene innen elektrisitetsslære inkludert magnetisme. I tillegg er det tatt inn stoff som omtaler ulike energiomvandler fra mekanisk til elektrisk energi (generatoren), og omvendt, fra elektrisk til mekanisk energi (motoren). Videre omtales omvandling fra elektrisk energi til lys (LED), og omvendt, fra lys til elektrisk energi (solceller). Framtidige versjoner av heftet vil også beskrive omvandling fra termisk energi til elektrisitet (termogenerator), og omvendt, fra elektrisk energi til termisk energi (varmeovn), og lagring av energi i batterier. Det er også tatt inn et kapittel om likeretteren siden denne er så viktig for distribusjon og bruk av elektrisk energi.

Stoffet er forsøkt holdt på et grunnleggende nivå med praktiske eksempler og rikelig med enkle eksperimenter og små og store “lag selv” prosjekter. Heftet suppleres med ytterligere stoff etter som det blir behov for det i undervisningen.

1.1 Kompetansemål

Skal målgruppen være barn og ungdom i norsk grunn- og videregående skole, kan det være lurt å ha læreplanens kompetansemål i tankene. Virkeligheten favner gjerne videre enn læreplanene, dermed skal en ikke være redd for å inkludere tema som ikke er omtalt i planene, men som naturlig hører med for å forstå helheten. Dette vil bli mer naturlig i og med framtidige læreplanrevisjoner som vil åpne opp større mulighet for fordypning.¹

Lista under gjengir de viktigste kompetansemålene som berører læren om elektrisitet og energi. I tillegg er det naturlig å trekke inn kompetansemåle innen forskerspiren og den generelle delen av læreplanen når det faller naturlig:

Naturfag grunnskolen

Fenomener og stoffer:

- *gjøre rede for bruken av noen energikilder før og nå, og innhente informasjon og statistikk fra ulike kilder for å beskrive og diskutere mulige konsekvenser av energibruken for miljøet lokalt og globalt (etter 7. trinn)*
- *gjøre forsøk med magnetisme og elektrisitet og forklare og presentere resultatene (etter 7. trinn)*
- *forklare hvordan stoffer er bygd opp, og hvordan stoffer kan omdannes ved å bruke begrepene atomer og molekyler (etter 7. trinn)*
- *vurdere egenskaper til grunnstoffer og forbindelser ved bruk av periodesystemet (etter 10. trinn)*
- *bruke begrepene strøm, spenning, resistans, effekt og induksjon til å forklare resultater fra forsøk med strømkretser (etter 10. trinn)*
- *forklare hvordan vi kan produsere elektrisk energi fra fornybare og ikke-fornybare energikilder, og diskutere hvilke miljøeffekter som følger med ulike måter å produsere energi på (etter 10. trinn)*
- *gjøre forsøk og enkle beregninger med arbeid, energi og effekt (etter 10. trinn)*

Teknologi og design:

- *planlegge, lage og teste enkle produkter som gjør bruk av elektrisk energi, og reklamere for ferdig framstilt produkt (etter 7. trinn)*

1. Meld. St. 28 (2015–2016) Fag – Fordypning – Forståelse — En fornyelse av Kunnskapsløftet



Teknologi i praksis

Undersøkelser:

- undersøke teknologiske produkt og dei vala som er gjorde med omsyn til bruk, tekniske løysingar, funksjonalitet og design (8. – 10. trinn)

Naturfag videregående skole

Energi for fremtida:

- gjøre forsøk med solceller, solfangere og varmpumper; forklare hovedtrekk i virkemåten og gjøre enkle beregninger av virkningsgraden (Vg1)
- forklare hva redoksreaksjoner er; gjøre forsøk med forbrenning, galvanisk element og elektrolyse og gjøre greie for resultatene (Vg1)
- beskrive virkemåten og bruksområdet til noen vanlige batterier og brenselceller (Vg1)
- gjøre rede for forskjellen mellom energikilder og energibærere og en aktuell energibærer for framtiden (Vg1)

Fysikk 1, videregående skole – programfag

Klassisk fysikk:

- definere begrepene strøm, spenning og resistans, og bruke prinsippene om bevaring av ladning og energi på enkle og forgreinede likestrømskretser (Vg2)

Moderne fysikk:

- beskrive Bohrs atommodell og beregne frekvenser og bølgelengder til spektrallinjer i emisjons- og absorpsjonsspektre ut fra den (Vg2)

Fysikk og teknologi:

- gjøre rede for forskjellen mellom ledere, halvledere og isolatorer ut fra dagens atommodell, og forklare doping av halvleder (Vg2)

Fysikk 2, videregående skole – programfag

Klassisk fysikk:

- beskrive homogene og inhomogene elektriske felt og bruke Coulombs lov (Vg3)
- beskrive magnetiske felt rundt permanentmagneter og elektriske strømmer, og beregne magnetisk flukstetthet rundt en rett leder og kraft på en leder i magnetisk felt (Vg3)
- gjøre rede for begrepet magnetisk fluks og bruke Faradays induksjonslov (Vg3)
- bruke Newtons lover på vektorform for bevegelse i homogene magnetiske felt og i homogent gravitasjonsfelt (Vg3)

Fysikk og teknologi:

- gjøre rede for teknologiske anvendelser av induksjon (Vg3)

1.2 En didaktisk tilnærming

Hvordan skal man så nærme seg temaet elektrisitet? Det spesielle med elektrisitet er at alle har et forhold til den, siden alle uten unntak, bruker elektrisitet hvert minutt på dagen i form av ulike teknologiske hjelpemidler. At spennvidden i bruken er så enorm, gjør det ikke enklere å formidle



hva dette handler om. Bare tenk på at det er det samme grunnleggende naturgitte fenomenet som ligger til grunn for smarttelefonen som for oppvarming av maten vi spiser til middag, så vel som lyset vi tenner om kvelden, eller også som gjør det mulig for oss å se på TV.

Allerede *her* er det naturlig å gjøre et valg. I dette heftet ønsker vi å fokusere på *fenomenet elektrisitet* og energiomvandelere av ulike slag, både de som brukes i produksjon, distribusjon og “forbruk” av elektrisk energi. Vi ønsker ikke å fokusere på elektronikk, selv om grunnleggende elektrisitetsslære er grunnlaget for all elektronikk. Man kan kanskje si at den fysiske grensen for vårt bokprosjekt går ved *adapteren* som transformerer nettspenning ned til lavspent tilpasset elektronikken.

Under har vi forsøkt å trekke opp noen skillelinjer mellom de tre begrepene *elektrisitetsslære*, *elektroteknikk* og *elektronikk*:

Elektrisitetsslære (el-lære)

er, i sin grunnleggende form, læren om begreper som strøm og spenning, effekt og energi i elektriske kretser, samt måling av disse størrelsene. Elektrisitetsslæra omhandler lover som styrer strøm og spenningsfordelingen i kretsene, eksempelvis Ohms lov, Kirchoffs strøm- og spenningslover o.l.. Ofte inkluderer el-læra parallell- og seriekobling av enkle kretselementer (ledere, isolatorer, batterier, brytere, lyspærer o.l.).

Når vi skal definere begrepene elektroteknikk og elektronikk må vi være klar over at disse griper inn i hverandre og delvis overlapper. En må derfor betrakte definisjonene under som veiledende og ikke absolutte.

Elektroteknikk

omhandler hovedsakelig elektrisitet brukt i forbindelse med energioverføring slik som generatorer (vann- og vindenergi o.a.), transformatorer, kraftlinjer, fordelingsanlegg o.l. I tillegg omfatter den elektriske komponenter brukt til framdrift (motorer), elektrisk belysning (lyspærer, lysstoffrør o.l.) og oppvarming (varmeovner). Elektroteknikken behfter seg derfor i stor grad med spenninger over 50 V og store effekter. Den omfatter også måling av effekt og energi, strøm og spenning. En viktig del av dette fagområdet er også energioverføring og bruk av tre-faseteknologi.

Elektronikk

er primært brukt i forbindelse med styresystemer (roboter, automater), overvåkningssystemer (alarmanlegg, overvåking, satellitter), kommunikasjonssystemer (TV-, radio, kringkasting, mobilkommunikasjon, telefon, telefonsentraler, datanett, satellitter), informasjonsbehandling (regnemaskiner, datamaskiner, lagring av data o.l.), kontormaskiner (kopimaskiner), hjelpemidler i hjemmet (videospillere, DVD-maskiner, spillmaskiner, MP3-spillere osv.). Elektronikken omhandler dessuten elektroniske komponenter som kan forsterke og behandle signaler (transistorer, dioder, integrerte kretser, mikroprosessorer og kontrollere). Men også motstander, kondensatorer og spoler brukes mye. Som oftest brukes spenningsnivåer under 50 V og strømmene forsøkes redusert til et minimum. Raske endringer i strømmer og spenninger er ofte av stor betydning (raske PC'er, bredbånd, bruk av mikrobølger ved overføring av informasjon o.l.).

I de siste 30 – 40 årene har elektronikken rykket inn på elektroteknikkens område, ved at halvlederkomponenter er utviklet for store strømmer og høye spenninger. Dessuten er elektronikken mye brukt for styring og overvåking av høyspenningsanlegg. Likeså ser vi at LED-teknologi blir



mer og mer sentral innen belysning og vil etter hvert helt overta for glødelampe og lysstoffrør. Skillet mellom de to områdene er derfor blitt vagere.

Elektrisitetslæra med elektromagnetisme og feltteori er abstrakt og i seg selv usynlig. Vi er derfor avhengig av å se på virkningen av elektrisiteten ved at dens ulike egenskaper omdannes til observertbare fenomener som lys, varme, bevegelse, eller ved bruk av måleinstrumenter som måler ladning, strøm, spenning og energi. Siden fenomenet er så abstrakt er matematisk modellering og bruk av matematikk blitt et uunnværlig hjelpemiddel for å kunne anvende elektrisitet profesjonelt. Ja, i enkelte sammenhenger er de matematiske modellene også nødvendig for å forstå fenomener knyttet til elektrisitet.

Likevel kan en stille spørsmål om matematikken er et vel så stort hinder for nybegynneren som en hjelp. Noen ganger kan det være riktig å nærme seg naturvitenskapelige fenomener på en rent fenomenologisk måte uten matematikk. Vi har i dette heftet valgt å unngå matematisk beskrivelse, ikke fordi vi mener det er uviktig, men for å utforske mulighetene ved en slik fremstilling.

Så hvor skal man så begynne? Skal man begynne ...

- ... med de grunnleggende fysiske prinsipper som ladning, strøm og spenning,
- ... eller med anvendelse slik vi møter dem til daglig,
- ... eller ved å studere hvordan samfunnet vårt er totalt avhengig av elektrisitet?

I et undervisningsopplegg synes det fornuftig å ta utgangspunkt i det som er kjent for elevene, samtidig som man velger konkrete eksempler på gjenstander som både kan plukkes fra hverandre og er rimelig lett å forstå virkemåten til, samtidig som de gir anledning til å knytte virkemåten opp mot de fysiske prinsippene slik vi finner dem i kompetansemålene.

Både voksne og elever har et hverdagspråk knyttet til elektrisitet. Dette kan noen ganger være et hinder for å forstå de virkelige prosessene. Vi “bruker strøm”, eller vi “forbruker energi”, selv om det er like mye strøm som kommer til oss gjennom den ene ledning som det som forlater oss gjennom den andre. Ved vekselstrøm vil knapt elektronene komme utenfor husveggen før de snur og kommer tilbake. Likeså kan ikke energi forsvinne, men bare omdannes til andre mindre anvendelige former (varme). Så dermed handler det om å gi elevene et nytt innhold i de gamle begrepene.

Språket blir således en viktig faktor for å gi begrepene et meningsfylt innhold uttrykt på en presis og effektiv måte. For å være istand til dette er det tradisjonelle hverdagspråket delvis byttet ut med et fagspråk som i videste forstand også inkluderer symboler og matematiske uttrykk. Dette nye språket vil for elevene ofte være en ukjent verden som skaper avstand til fenomenene.

Knain og Kolstø uttrykker det så sterkt at *naturvitenskap er ikke å observere naturen, men å identifisere gjennom navnet og gjennom å utvikle språklige og symbolske beskrivelser og forklaringer* (Knain, 2011, s. 166). Å beherske et fagområde handler dermed om å kunne bevege seg fritt mellom ulike representasjonsformer etter behov.

Knain og Kolstø foreslår å la elevene veksle mellom å bruke hverdagspråk og fagspråk slik at ulike representasjonsformer kan bygge bro mellom hverdagslivets erfaringer og språkverden på den ene siden, og fagets begreper og tenkemåter på den andre (Knain, 2011, s. 197).



Det handler altså om å utvikle elevenes evne til å koble det de erfarer og observerer til naturfaglig teori. En begynnelse på en slik prosess er å oppmuntre elevene til å *formulere egne forklaringer*, for det de observerer, gjerne skriftlig og utover en ren beskrivelse av prosedyren (Knain, 2011, s. 172).

Veel (1997) omtaler tre ulike typer forklaringer:

- *Sekvensiell forklaring ...*
... viser hvordan et fenomen kan deles opp i sekvenser. Fordøyelsen nevnes som et typisk eksempel, hvor næringsstoffene i maten kan følges fra blandingen med spytt i munnen til opp-taket i hver celle.
- *Kausal forklaring ...*
... fokuserer på årsakene til fenomenet som observeres, mao. hvordan fenomenet oppstår. Dette kan godt være abstrakte sammenhenger som ikke uten videre er mulig å se, men som krever en dypere forståelse av fenomenet.
- *Teoretiske forklaringer ...*
... som handler om å sannsynliggjøre en teori gjennom å vise til eksempler som styrker teorien.

Alle de tre typene forklaringer veksler mellom det konkrete fenomenet og bakenforliggende naturvitenskapelige teorier (Knain, 2011, s. 173–174).

På bakgrunn av omtalen foran kan det være lurt å begynne med å studere fysiske gjenstander som utnytter elektrisitet og som elevene har et forhold til gjennom daglig bruk.

1.3 En tilnærming til elektrisitetsslære ved henvisning til dagligdagse hendelser

Dersom vi igjen holder elektronikken utenom, *hvilke situasjoner som har med elektrisitet å gjøre må elever forholde seg til i dagliglivet?* Kan vi på noen måte benytte disse for å motivere elever til å heve sin kompetanse innen elektrisitetsslære ved at de opplever å lette hverdagslivet? Tross alt skal en av hovedhensiktene ved skolegang være å mestere dagliglivet. Hvorfor skal man da lære om *generatoren* i kraftanlegget og *induksjon* som de *færreste får noen nærkontakt med?*

Her er forslag til noen slike hverdagssituasjoner:

1. Hvilken lyspære skal man velge?

I de seneste årene er det blitt langt vanskelig å kjøpe lyspærer. Før kunne man forholde seg til antall Watt og de fleste hadde da en forestilling om forholdet mellom antall Watt og lysstyrken. Dette ble noe forkludret på 60-tallet da lysstoffrør ble tatt i bruk, men stort sett gikk dette bra siden man forholdt seg til rørets lengde og ikke antall Watt.

På 2000-tallet kom ulike varianter av sparepærer som alle kunne settes i en vanlig sokkel for lyspærer (Edison-sokkel), dermed ble ikke effekt (Watt) noe godt mål for lysstyrken og man innførte Lumen som mål for lysstyrke, en enhet få hadde noe forhold til. Enda mer komplisert ble det når LED-pærene kom i stort utvalg og stor variasjon. Laveffekts pærer er jo en





bra ting siden man kan redusere kostnadene til elektrisk energi. Likevel var det ikke noen entydig sammenheng mellom effektforbruket, antall Watt, og lysstyrken i Lumen. Dessuten er prisforskjellene mellom de ulike pærene store noe som også gjør at man må ta hensyn til levetid.

Vi må derfor forholde oss til en rekke parametere:

- *Lysstyrke i Lumen for å vurdere graden av opplysning*
- *Effekten i Watt mht. å spare energi*
- *Levetid i timer for å kunne sammenligne priser*
- *Utforming (sokkel, lysfordeling) slik at den passer vår armatur*
- *Valg av spenning 12 V eller 230 V anlegg, vekselspenning eller likespenning.*

Selv om ungdom vanligvis ikke gjør innkjøp av denne typen burde de kunne forstå problemstillingen og ev. motiveres av å skaffe seg oversikt over feltet. Følgende læringsutbytte bør være innen rekkevidde: Effekt, spenning, strømforbruk, lysstyrke, vekselspenning og likespenning, risiko ved 230 V anlegg (helsefare) og risiko ved lavspenningsanlegg (varmgang, brann), og virkningsgrad mht. å utnytte effekten maksimalt til lysformål. Her er det også en annen interessant problemstilling, nemlig om man skal sette pris på den varmen man får fra en lyspære eller anse det som "tapt" energi fordi det er energi som ikke bli til lys. Her kan man inkludere bruk av termo-statstyrte ovner for oppvarming, hvilken årstid det er og om varmen er kjærkommen eller til plage.

2. Hvilken metode skal man velge for å varme opp vann?

På 60- og 70-tallet var det relativt enkelt å velge metode for å varme opp vann, det være seg kun vann, eller det var vann for å lage mat, koke poteter, lage te eller kaffe osv. senere ble det mer komplisert ved at man fikk mikrobølgeovner som egnet seg for rask oppvarming av mat, men også en kopp vann. Videre kom vannkokeren som viste seg å være meget effektiv mht. å utnytte energien til oppvarming av vannet.

Også mer tradisjonelle komfyrer har utviklet seg, fra tradisjonelle kokeplater med eller uten magasin, via ovner med ulike typer topper (keramisk), og etter hvert har vi fått induksjonsovner som skal være mer effektive, men som krever kjeler med spesiell bunn.

Tidligere brukte man også trykkokere for å koke mat, da man på denne måten oppnådde koking ved høyere temperatur og dermed kunne redusere tiden for tilberedning.

Selv om de fleste vil ha et noe ureflektert forhold til hvilken metode man bruker for koking av vann, så vil refleksjon rundt dette temaet berøre en hverdags situasjon de fleste er kjent med og på den måten skaper bevisstgjøring rundt problematikken samtidig som det bidrar til refleksjon over energibesparelse, lekkasje av energi og hva de ulike måtene til oppvarming innebærer.





Her vil begreper som strøm, effekt, energi, energiovergang, temperatur, varmekapasitet og induksjon være relevante begreper.

3. Hva er “strømforbruket” i boligen og hva koster det

Spør man en ungdomsskoleelevator hvor mye strøm man “bruker” hjemme, så vil man sannsynligvis få ingen eller mange forskjellige svar, da de færreste har begrep. For ikke lenge siden spurte man folk på gata hvor mye det kostet å lade mobiltelefonen gjennom et helt år. Om det kostet 3 kr., 30 kr. eller 300 kr. Bare 9% svarte riktig, ca. 3 kr. Dette gir sannsynligvis et relativt godt bilde av kunnskapsnivået på dette området blant folk flest og ungdomsskoleelevatorer spesielt.²

En bevisstgjøring på dette området ville være særdeles nyttig. Hvor stor andel av strømregningen går med til oppvarming, belysning og elektronisk utstyr? I disse dager vil det dessuten være interessant å la elever reflektere over hva det koster å lade opp en elektrisk bil og dermed hvor utrolig energieffektivt bensin og diesel er og hvor billig elektrisk energi faktisk er.

i denne sammenheng er det også naturlig å reflektere over hvor det er mest å spare. Hva koster det f.eks. å ha TV-en stående på standby i ett år? På denne måten kan man dessuten anvende matematikk i naturfagtimen, hvilket vil være motiverende for å lære matematikk.

Noen snakker dessuten om å supplere vannenergien med vind- og solenergi. I så fall vil det være nyttig å studere forskjellen i effektivitet mellom de tre ulike kildene til fornybar energi.

Her vil begreper som strøm, effekt, energi, energiovergang og virkningsgrad være relevante begreper.



Til tross for resonnementet over har vi i dette heftet valgt å begynne ganske tradisjonelt med å bygge opp elektrisitetstære fra de grunnleggende fenomenene. La oss forsøke å lage en oversikt over hvordan de ulike fenomenene henger sammen og bygger på hverandre.

1.4 En oversikt – grunnlaget

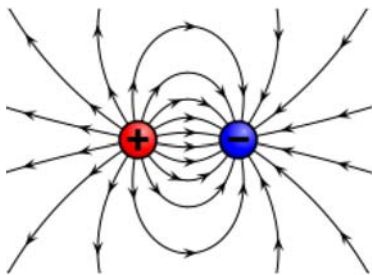
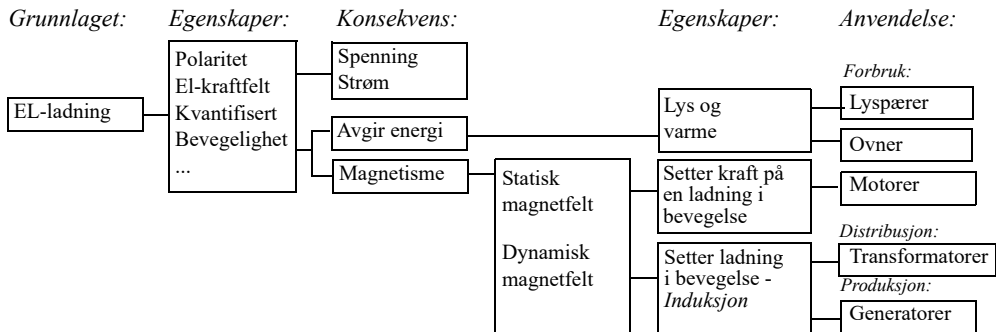
Det hele begynner med atomet og hvordan dette er bygget opp. Som vi vet så er dette bygget opp av ulike elementærpartikler, etter hvert over 20 stykker hvorav kun tre er elektrisk nøytrale³. Et atom som helhet er i utgangspunktet nøytralt, dvs. at den positive og den negative ladningen innen

2. <https://www.tek.no/artikkel/i/xP71qp/saa-mye-koster-det-aa-lade-en-mobil-til-100-prosent-hver-eneste-dag-i-et>

3. <https://no.wikipedia.org/wiki/Element%C3%A6rpartikkel>

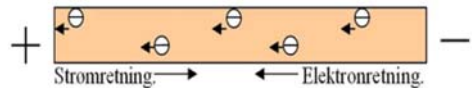


atomet utligner hverandre. Grunnlaget for elektrisitet er derfor *elektrisk ladning*. Det skal vise seg at alt som har med elektrisitetsslære bygger på det faktum at det finnes to typer ladninger og egenskapene til disse ladningene. La oss forsøke å lage en oversikt:

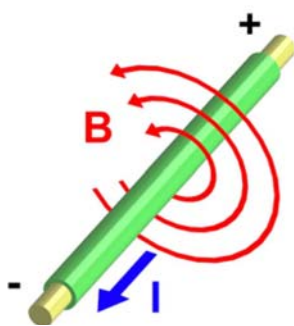


Viktige egenskaper ved elektrisk ladning er derfor at den har *polaritet*, pluss og minus. Hva dette egentlig er vet man lite om. I tillegg til polaritet er ladning *kvantifisert*, dvs. det finnes en minste verdi for ladning (*elementærladning*). Partikler med ladning kan enten sitte fast i en krystallstruktur som hos isolatorer, eller være bevegelige som elektroner i en elektrisk leder. En vet også at mellom ladninger av ulik polaritet oppstår det *kraftfelder*. *Ulike ladninger* vil tiltrekkes av hverandre, mens *like ladninger* vil frastøtes av hverandre.

Når ladning beveger seg oppstår en *elektrisk strøm*, antall elektriske ladninger som passerer ett tverrsnitt i en elektrisk leder måles i *Ampere*.



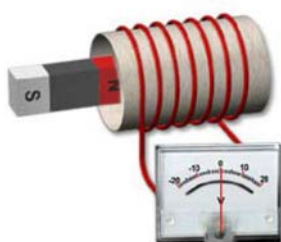
Ladningene drives fram av ladningsforskjeller. *Det elektriske kraftfeltet* er et uttrykk for ladningsforskjellen som driver ladningene gjennom ledningen. *Elektrisk spenning* er et uttrykk for det *arbeidet* (energien) som skal til for å flytte en elektrisk ladning mot feltretningen. På denne måte får elektrisk ladning tilført stillingsenergi, som senere kan brukes til å utføre et arbeid. Elektrisk spenning er et uttrykk for ladningers stillingsenergi og måles i *Volt*.



Når ladninger beveger seg vil det oppstå *et sirkulært magnetfelt* omkring ladningens bevegelsesretning. Dette fenomenet kalles *elektromagnetisme*. Opphavet til *permanente magneter* er sannsynligvis mikroskopiske bevegelser til elementærpartikler (spinn). Jern oppfattes å være magnetisk når alle disse små magnetene er rettet inn i samme retning.⁴



Alle magneter har to poler, en *nord-* og en *sørpol*. Mellom polene virker det krefter (*kraftfelter*). Like magneter tiltrekker hverandre, ulike frastøter hverandre⁵. Motorer utnytter disse kreftene ved at f.eks. elektromagneter samvirker med fastmagneter og skyver og drar *rotoren* rundt. Når man skal lage roterende motorer, må man sørge for at de magnetiske kreftene stadig drar i samme retning. For at dette skal være mulig må man sørge for å snu polariteten på magnetene gjennom forløpet, dette er bare mulig ved at man *snur strømretningen i elektromagnetene* synkronisert med bevegelsen. Tradisjonelt gjøres dette med brytere styrt av rotasjonsbevegelsen, *kommutatorer*, eller elektronisk styring av pulser som f.eks. hos børsteløse motorer.



Når man beveger magneter i nærheten av elektriske ledere oppstår det ladningsforskyvninger i ledningen pga. de nevnte kreftene. Dette gir opphav til interne spenninger i ledningen som kan gi elektriske strømmer i *en sluttet krets*. Dette kalles *induksjon* og er grunnlaget for største delen av elektrisk energiproduksjon i verden. *Generatorer* er maskiner som omdanner mekanisk bevegelsesenergi til elektrisk energi ved hjelp av induksjon.⁶

Transformatorer utnytter også induksjon til å transformere spenning opp til høyere spenninger og ned til lavere spenninger. Dette utnyttes ved distribusjon av elektrisk energi, men også for å tilpasse nettspenningen på 230 V til forbrukerelektronikk ved hjelp av *strømadaptere* og *ladere*.

I dette hefte vil vi utdype disse fenomenene ved hjelp av analogier, enkle eksperimenter og aktiviteter. Heftet gir også oppskrifter til hvordan enkelt elektrisk utstyr kan bygges.



4. Figuren er hentet fra: <https://no.wikipedia.org/wiki/Magnetfelt>
 5. Figuren er hentet fra: <http://www.psy-online.tv/magnetisme-humain-sexuel-spirituel-hypnose/>
 6. Figuren er hentet fra: <http://sksk.no/fysim/induksjon1.htm>





DEL I

Elektrisitet og magnetisme





2 Grunnleggende begreper innen elektrisitetstære, en kvalitativ tilnærming

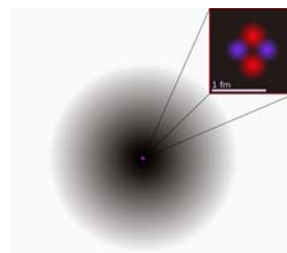
Vi vil i dette kapitlet forsøke å nærme oss noen sentrale begreper innen elektrisitetstære ut fra ønsket om å gi elevene en kvalitativ forståelse før de blir konfrontert med det matematiske begrepsapparatet. Primært skal vi se på en enkel atommodell, elektriske ledere og isolatorer. Dessuten skal vi forsøke å lage forklaringsmodeller for spenning, strøm, effekt, energi og induksjon som er begreper elevene normalt har vanskelig for å forstå. Det er heller ikke sikkert at en dypere teoretisk forståelse bør være elevenes første møte med disse fenomenene. La oss starte med å skissere en meget enkel atommodell.

2.1 En atommodell

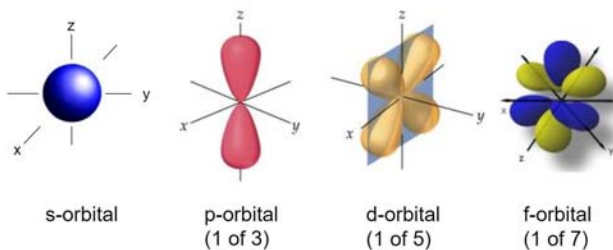
Kjennskap til en enkel atommodell er en forutsetning for å forstå elektrisk strøm. Det er imidlertid viktig å presisere at det bare dreier seg om en modell. Ingen har sett et atom, det er derfor ingen som kan si eksakt hvordan det ser ut eller er bygget opp. En har imidlertid laget seg modeller som i størst mulig grad harmonerer med den virkelighet som kan observeres ved hjelp av avansert måleutstyr.

Alle atomer har en *kjerne* som i utgangspunktet består av to typer elementærpartikler, *protonene* som er positivt ladet og *nøytronene* som er uten ladning. Antall protoner i kjernen bestemmer hvilket grunnstoff vi har med å gjøre. I ulike avstander fra kjernen finner vi svermer av negativt ladede *elektroner*. Disse er ordnet i "skall" som ligger i forskjellig avstand fra kjernen. Et atom med like mange elektroner som det er protoner i kjernen, vil være *elektrisk nøytralt*.

Elektroner er svært små og har egenskaper som er svært forskjellig fra partikler vi kjenner fra dagliglivet. Et eksempel er at elektroner i stor grad oppfører seg som bølger. En tegning av et atom viser ofte elektronene som diffuse skyer knyttet til områder eller *orbitaler* med forskjellig form og avstand til kjernen. Orbitalenes form er egentlig en tredimensjonal fordelingsfunksjon som beskriver sannsynligheten for å treffe på et elektron i de ulike posisjonene i nærområdet til atomkjernen. Figur 2.2⁷ viser fire varianter av slike orbitaler, eller romlige sannsynlighetsfordelinger. Som vi ser så finnes det flere varianter av p-, d- og f-orbitalene.



Figur 2.1
Enkel atommodell.

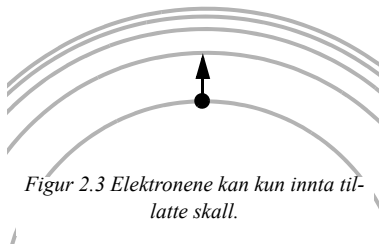


Figur 2.2 Et sett med orbitaler

7. <https://slideplayer.com/slide/14204839/>



Inntil videre vil vi i denne beskrivelsen se for oss at elektronene befinner i “skall” med en avstand til kjernen.



Figur 2.3 Elektronene kan kun innta tillatte skall.

Atomet kan motta energi, ved at ett eller flere av atomets elektroner flytter seg til et skal lengre fra kjernen. Elektronets avstand til kjernen er dermed et uttrykk for elektronets energitilstand. Elektronene kan imidlertid ikke ha en hvilken som helst avstand til kjernen. For at elektronet skal kunne flytte seg fra et skall til et annet lengre fra kjernen, må det få tilført en energimengde som tilsvarer forskjellen mellom to tillatte skallene.

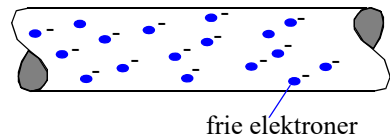
Videre kan atomet *gi fra seg* energi ved at elektronene faller tilbake til et skall som er nærmere kjernen. Slik avgitt energi kan enten resultere i varmestråling eller lys som hos lysdioder eller annen stråling. Vi refererer ofte til elektronenes tillatte energitilstander.

Hos enkelte stoffer ligger de tillatte energinivåene så tett at de nesten opptrer som om de var kontinuerlig forbundet med hverandre. Når flere tillatte energinivåer ligger svært tett sier vi at de danner tillatte energibånd (en tett ansamling av energinivåer). Det ytterste energibåndet som er bundet til atomet kaller vi *valensbåndet*. Antallet elektroner i valensbåndet bestemmer atomets evne til å oppta og ev. avgi elektroner, og er derfor viktig for atomets evne til å binde seg til andre atomer.

Når elektroner i valensbåndet tilføres tilstrekkelig energi, hender det at de forlater atomet. Elektronene er da frigjort fra atomet og kan bevege seg fritt mellom atomene. Vi sier at de befinner seg i *ledningsbåndet*. Materialer som har frie elektriske ladninger er istand til å lede *elektrisk strøm*.

Når vi varmer opp stoffer tilføres atomene i stoffet bevegelsesenergi. Dette gjør at flere elektroner går over fra valensbåndet til ledningsbåndet. Jo mindre energiforskjellen er mellom valensbåndet og ledningsbåndet, jo flere elektroner vil befinne seg i ledningsbåndet.

Hos *metaller* overlapper valensbåndet og ledningsbåndet. Dvs. det skal nesten ingen energi til for å føre elektroner opp i ledningsbåndet. Selv ved romtemperatur vil derfor mange elektroner i et metall befinne seg i ledningsbåndet og kunne bevege seg fritt i metallet. Metaller er derfor gode *elektriske ledere*.



Hos metallene er dessuten atomene bundet til hverandre på en meget regelmessig måte, de danner *gitter* eller *krystallstrukturer*.

Figur 2.4 En elektrisk leder er full av mer eller mindre frie elektroner.

Hos *elektriske isolatorer*, som er meget dårlige elektriske ledere, vil elektronene være sterkt bundet til sine atomer, og det skal mye energi til for å føre dem fra valensbåndet til ledningsbåndet slik at de kan bevege seg fritt.



Hele elektrisitetslæra bygger på det faktum at atomet består av partikler *med positive og negative ladninger*. Hva ladningen egentlig er vet vi lite om, derimot vet vi mye om hvordan partikler med ulik ladning oppfører seg, dvs. hvilke lover som gjelder for elektriske ladninger. I det neste avsnittet skal vi se nærmere på noen av disse egenskapene.

2.2 Elektrisk ladning

I dette avsnittet skal vi se nærmere å hva elektrisitet egentlig er. Vi skal se at elektrisk *ladning* er den mest grunnleggende egenskapen ved elektrisitet og at elektrisk *strøm* og *spenning* er konsekvenser av at det finnes ladning.

2.2.1 Statisk elektrisitet

I en elektrisk leder vil de frie elektronene svirre rundt på en tilfeldig måte. Mellom ladningene vil det være *elektriske felter*⁸. Som vi tidligere har omtalt så finnes det to typer ladninger, de positive og de negative. *Like ladninger* danner felter som gjør at de frastøter hverandre, og *ulike ladninger* danner felter som gjør at ladningene tiltrekker hverandre. Elektronene, som alle har lik negativ elektrisk ladning, vil derfor frastøte hverandre. Dette hindrer dem i å klumpe seg sammen.

Dersom en gjenstand får overskudd av positive eller negative ladninger, sier vi at gjenstanden er *elektrisk ladet*. Siden dette i utgangspunktet ikke er ladninger i bevegelse, sier vi at gjenstanden er *statisk elektrisk ladd*.

La oss se på noen eksperimenter som viser egenskaper med elektriske ladninger:

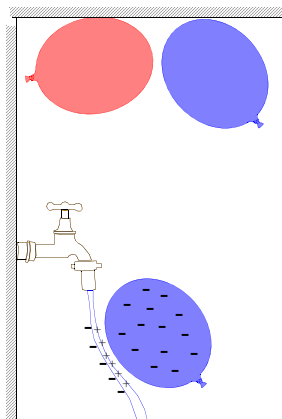
Eksperiment: 1 Elektrisk ladde ballonger I

Til dette eksperimentet trengs en eller flere ballonger og en tynn vannstråle.

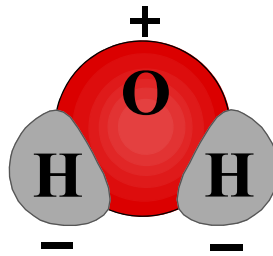
Ta ballongen å gni den mot håret eller en ullgenser i ca. 30 sek. Hold den mot taket og se om den blir hengende.

Hold ballongen i nærheten av en tynn vannstråle og se hva som skjer. Unngå at vannet berører ballongen.

Når vi gnir ballongen mot ulltrøya, vil noen av elektronene hoppe over på ballongen, slik at den blir negativt ladet. Ulike ladninger tiltrekker hverandre, mens like frastøter.



8. Feltbegrepet er abstrakt og vanskelig å forstå. Et *elektrisk felt* er område av rommet hvor det virker en kraft på elektriske ladninger. Et slikt felt har også en retning, dvs. kraften som virker på den elektriske ladningen virker i feltets retning. Tilsvarende har vi *tyngdefelt* og *magnetiske felt*. Tyngdefeltet oppstår rundt en hver masse og gjør at masser tiltrekkes av hverandre. Magnetfelter finner vi rundt magneter og virker på gjenstander som lar seg magnetisere som f.eks. jern.



Taket eller vannet er i utgangspunktet nøytrale, det vil si at det er like mange positive som negative ladninger. Vannmolekylene er polarisert i seg selv, ved at de to hydrogenatomene er bundet litt usymmetrisk til oksygenatomet. Denne skjevheten gjør at molekylene har én positiv og én negativ side, som vist på figuren over til høyre. Når den negative ballongen nærmer seg vannmolekylene i strålen, vil de vende den positive siden mot den; vi sier at vannstrålen blir polarisert. Den positivt ladede siden av vannstrålen vil i sin tur bli tiltrukket av den negative ballongen, slik at den tynne vannstrålen bøyer seg mot ballongen.

At det også er noe som virker på avstand viser det neste eksperimentet med all mulig tydelighet.

Eksperiment: 2 Elektrisk ladede ballonger II

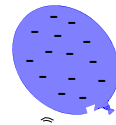
Til dette eksperimentet trengs en eller flere ballonger og noen papirbiter eller japansks ris.

Riv papiret i mange små biter på ca. 1 cm^2 og legg dem på bordet.

Ta ballongen å gni den mot håret eller en ullgenser i ca. 30 sek.

Senk ballongen ned mot bitene og se hva som skjer.

Papirbiter lar seg lett løfte fra bordet. Ballongen som gnies mot ull avgir elektroner og blir negativt ladd. Papirbitene er i utgangspunktet nøytrale og vil dermed "oppfattes" som positive i forhold til den negative ballongen som trekker bitene til seg. Det vil også skje en intern ladningsforskyvning i papirlappene slik at den siden som er nærmest ballongen blir mer positiv enn den delen som er langt fra ballongen.



Folie



Eksperimentet viser tydelig at kreftene på papirlappene virker på avstand og trenger ikke berøring for å virke. Det samme kan demonstreres enda tydeligere med en "Fly stick".

En høy spenning genereres i håndtaket på staven slik at papphylsa blir ladet. Når tynn plastfolie kommer i nærheten av den ladete staven kan vi få den til å sveve i lufta over den. Staven og plastfolien frastøter hverandre.



Det er verdt å merke seg at folien først må berøre staven for at den skal sveve. Dette skyldes at den må få samme ladning som staven før den kan sveve over staven – lik ladning frastøter. Vi legger også merke til at folien som består av flere tynne strimler vil folde seg ut hvilket skyldes at alle delene av folien har samme ladning og dermed vil de ulike delene av folien frastøtes av hverandre.

Så hvorfor blir noen stoffer positivt og andre negativt ladet?

Den tribo-elektriske serie⁹

Dette skyldes at noen stoffer gir lett slipp på sine elektroner, mens andre “suger” til seg elektroner (har høy *affinitet*). Under har vi listet opp ulike stoffer. De til venstre gir lettest fra seg elektroner, og de til høyre har størst affinitet til elektroner.

Tribo-elektrisk serie					
+	Tørre hender Kaninskinn Glass Menneskehår Nylon Ull	Pels Lær Silke Aluminium Papir Bomull	Stål Tre Rav Hard gummi Nikkel, kobber Gull, platina	Polyester Styrofome Vinyl Silisium Teflon	-
<i>Avgir lett elektroner</i>					<i>Mottar lett elektroner</i>

Når to stoffer langt fra hverandre i denne lista legges inntil hverandre, vil det ene stoffet dra elektroner fra det andre, slik at ladningsbalansen endres. Berøres ett av disse stoffene kan man risikere at det slår gnister over til hånda. Dette skjer vanligvis i tørt vær, for eksempel på tørre vinterdager. Fuktighet gjør at det skjer en kontinuerlig utlading. Man er derfor mindre plaget av statisk elektrisitet på våte dager.

Det er verdt å merke seg at det *ikke* handler om gnidning eller friksjon, men adhesjon (tiltrekning). *Statisk* elektrisitet er derfor betegnelsen for fenomenet. Jevne overflater vil overføre mer ladning siden den innbyrdes berøringsflata er større. Når vi gnir plastløkket mot håret, er det altså ikke for å skape friksjon, men for å øke overflaten slik at mer ladning kan forflytte seg.

Dersom vi ønsker å lage lange gnister på flere centimeter, kan vi bruke en Van de Graaff-generator.

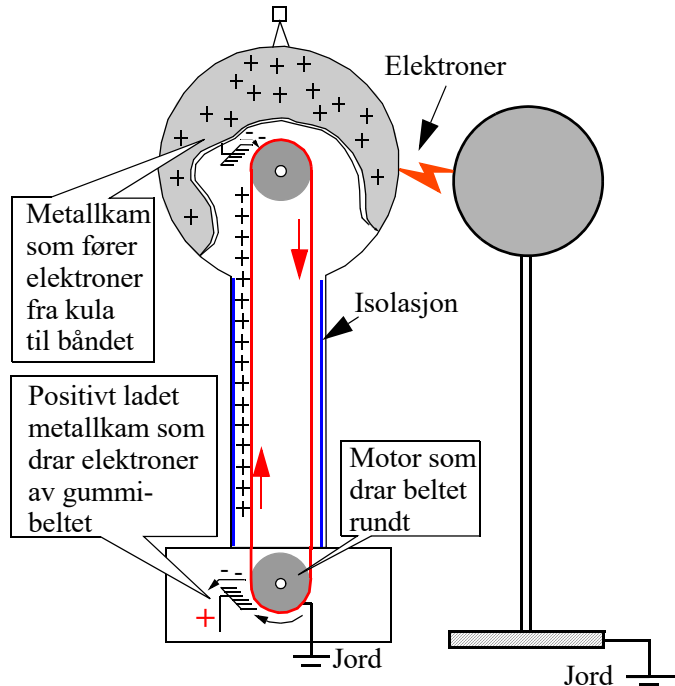
Van de Graaff-generatoren

Det var den amerikanske fysikeren **Robert Jemison Van de Graaff** (1901–1967) som i 1931 oppfant Van de Graaff-generatoren, hovedsakelig for å produsere statisk elektrisitet til sine forsøk. Store Van de Graaff-generatorer produserer spenninger helt opp til 20 millioner volt.

9. Se: <http://soft-matter.seas.harvard.edu/index.php/Tribocharge>

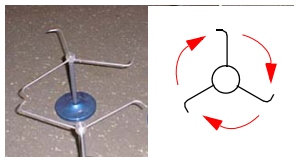


Et gummibånd går som et transportbånd over to tromler, en nederst og en øverst inne i kula. Ved foten av generatoren ligger en børste tett opp til båndet. Denne tilføres en høy positiv spenning. Den vil derfor trekke ut elektroner fra båndet, som blir positivt ladet etter at det har passert børsten. Inne i kula er det nok en metallbørste som er koblet til den store kula. Siden båndet er sterkt positivt ladet (har underskudd av elektroner), vil elektroner bli dratt fra den store kula via børsten og over til gummibåndet. Når ladingen på kula er tilstrekkelig stor, vil vi få en utlading til jord via den vesle kula som er jordet (se figur 2.5). Utladning fra kula kan også tenne et lysstoffrør.



Figur 2.5 Prinsippkisse av en van de Graaff-generator

I stedet for å sette en høy positiv spenning på den nederste kammen, kan en bruke tromler laget av stoffer som står fjernt fra hverandre i den tribo-elektriske rekken. Nederst kan en bruke en trommel av teflon, og øverst en av nylon. Gummibåndet vil ligge mellom disse to stoffene i den tribo-elektriske rekken. Båndet vil dermed tappes for elektroner ved den nederste trommelen, slik at det er positivt ladet når det er på vei opp. Ved den øverste trommelen tilføres elektroner til det positivt ladede båndet. Børstene er plassert tett inntil båndet uten å berøre det. På denne måten blir kula sterkt positivt ladet.



Dersom vi setter en spiss på toppen av kula og balanserer en rotor med tre krumbøyde spisser, vil denne begynne å rotere når kula lades opp. Rotoren vil alltid rotere slik at spissene peker bakover. Vi antar at dette skyldes at negative ladninger i luften samler seg omkring spissene og lekker inn i spissen slik at kula lades ut. Denne bevegelsen av elektroner vil gi rotoren et puff som vist på figuren til venstre.

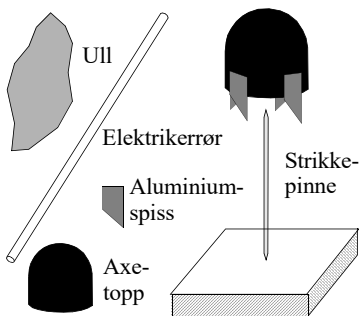
Nå er det ikke alle som har en van de Graaff-generator. Det går imidlertid an å lage en meget enkel utgave av en *elektrostatisk motor*.



Eksperiment: 3 Elektrostatisk motor

Til dette eksperimentet trengs dekselet til en deodorant, en spiss strikkepinne, aluminiumsfolie, en trekloss, et elektriskrør (ca. 50 cm) og en ullsokk.

Fil strikkepinnen spiss i den ene enden. Skråklipp fire aluminiumspisser, som vist på figuren til høyre. Klistre de fire spissene til deodorantdekelet, slik at de stikker nedfor kanten. Kutt strikkepinnen slik at den blir ca. 10 cm lang. Bor et hull i en trekloss og sett strikkepinnen ned i hullet, slik at den står stødig (alternativt kan plastelina brukes). Plasser dekselet slik at det balanserer på spissen av strikkepinnen.



Gni elektriskrøret kraftig med ullsokken. La deretter røret nærme seg deodorantdekselets høyre side, mens du lar ullkluten nærme seg deodorantdekselets venstre side. Hverken røret eller ullkluten skal berøre dekelet eller aluminium-spissene. Hva skjer?



Lyn er elektrisk utladning fra skyer mot bakken eller mellom skyer. Lyn oppstår ikke først og fremst på grunn av gnidning, men ved at skyene og bakken, eller skyene innbyrdes, har ulik evne til å gi fra seg eller oppta elektroner.¹⁰

Før vi går videre la oss se hva som menes med *elektrisk felt*.



2.3 Elektrisk felt og elektrisk strøm

Som vi skal se så er det svært mange likhetstrekk mellom *elektriske felt*, *magnetiske felt* og *tyngdefelt*. Utgangspunktet for elektriske felter er ladingers tiltrekning eller frastøtning av hverandre som omtalt foran. Dette er en grunnleggende egenskap ved elektriske ladninger som i seg selv vanskelig lar seg forklare her.

Det er imidlertid ikke vanskelig å tenke seg en opphopning av negativ ladning, dvs. elektroner. En opphoping av positive ladninger kan vi tenke oss som fravær av elektroner. Når vi fjerner elektroner fra et stoff vil det naturlig nok bli overskudd av positivt ladninger som er knyttet til atomkjernen.

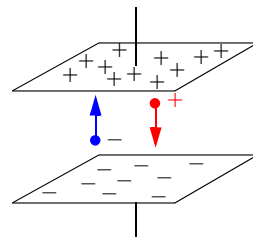
La oss tenke oss at vi har en metallplate med overskudd av negativ ladning (elektroner) og en annen metallplate med overskudd av positive ladninger. Disse er plassert et stykke fra hverandre som vist på figur 2.6.

Normalt vil det ikke gå noen strøm mellom platene siden de ikke er forbundet med noen elektrisk leder, og lufta mellom platene ikke er elektrisk ledende. Dersom et elektron likevel skulle forville seg inn mellom platene, vil elektronet bli tiltrukket av den positive plata og frastøtt av den negative. Med andre ord, elektronet vil bli påvirket av en *kraft* i rommet mellom platene forårsaket av at negative elektroner tiltrekkes av positive og frastøtes av negative ladninger. Uansett hvor elektronet befinner seg mellom platene, så vil det påvirkes av en kraft. Vi sier at det er et *kraftfelt* mellom platene. Dersom platene blir svært store vil kraften være den samme over alt uansett hvor elektronet befinner seg mellom platene, vi sier at kraftfeltet er *uniformt*.

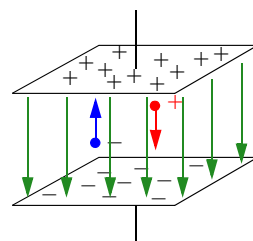
Siden dette handler om elektriske ladninger kaller vi feltet et *elektrisk felt*. Det er heller ikke vanskelig å tenke seg at det elektriske feltet vi her snakker om har en retning. Dvs. at kraften som påvirker elektronet alltid vil peke mot den positive plata.

Dersom en positiv ladning kommer inn mellom platene så vil den negativt ladde plata trekke på den positive ladningen. Siden ladningen til en positiv elementærpartikkel har samme verdi som den negative elementærpartikkelen, elektronet, vil krafta som trekker i den positive partikkelen være like sterk, men virke i motsatt retning som krafta som drar i den negative partikkelen.

Positiv feltretning defineres som den retningen til krafta som virker på en positiv ladning, dvs. fra pluss til minus som vist på figur 2.7.

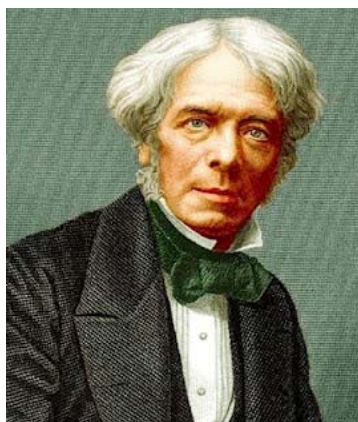


Figur 2.6 Negative ladninger trekkes mot den positive plata, mens positive ladninger trekkes mot den negative plata.



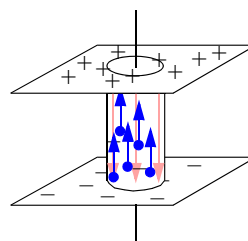
Figur 2.7 Mellom to ladete plater oppstår et uniformt kraftfelt

10. Bildet hentet fra SXC og er tatt av Ronny Beliën, Belgia, gjengitt med tilatelse.



Figur 2.8 Det var den engelske fysikeren og kjemikeren Michael Faraday (1791–1867) som innførte begrepet elektrisk felt.

Det er ikke vanskelig å tenke seg hva som skjer dersom vi forbinder den positive plata med den negative plata med en elektrisk leder. Elektronene på den negativt ladde plata vil bevege seg over til den positive plata, vi sier at det går en elektrisk strøm i ledningen som forbinder de to platene. Strømmen vil fortsette å gå til det har oppstått en likevekt, dvs. at begge platene har samme



Figur 2.9 Forbinder vi de to platene med en elektrisk leder vil det flyte en strøm av elektroner, fra den negative til den positive plata.

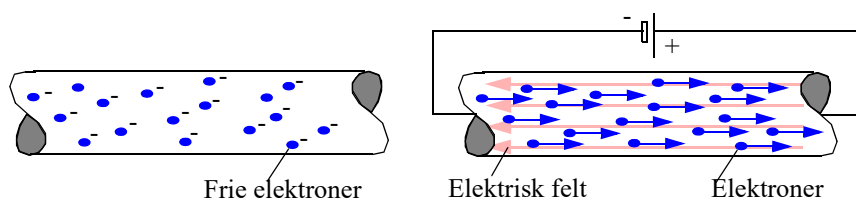
ladning. Det er altså ladningsforskjellen mellom de to platene som driver strømmen. Eller vi kan si at ladningsforskjellen lager et elektrisk felt inne i ledningen som gjør at elektronene dras mot den positive plata. Etter som ladningsforskjellen blir mindre, vil det elektriske feltet svekkes. Når ladningsforskjel-

len er null vil også feltet være null.

Dersom vi derimot klarer å opprettholde ladningsforskjellen mellom platene ved stadig å fylle på med nye elektroner på den negative plata og ta unna elektronene som kommer til den positive plata, så vil feltet og strømmen opprettholdes. For å få til dette trenger vi f.eks. et batteri.

La oss i forutsetningen se bort fra platene og kun betrakte ledningen.

Kobler vi et batteri over ledningen med de frie elektronene, vil de bevege seg mot den positive polen på batteriet. Dvs. i motsatt retning av det elektriske feltet siden de er negative. Batteriet vil sørge for at det stadig fylles på med negative ladninger slik at ubalansen opprettholdes og strømmen kan fortsette å flyte i ledningen.



Figur 2.10 Et metall har frie elektroner som vil bevege seg mot den positive polen på batteriet

Analogi: 1 Analogi med tyngdefeltet

Det er ikke vanskelig å se likhetstrekk mellom et elektrisk felt og tyngdefeltet.



Vi kan tenke oss at vi befinner oss i et rom uten tyngdefelt og med en mengde bordtennisballer. Dersom vi slipper ballene vil de sveve rundt på måfå.

Gir vi rommet et tyngdefelt, vil alle ballene bevege seg i retning med feltet og falle mot gulvet. Dersom vi et øyeblikk

tenker oss at ballene var uten masse (vekt), ville de fortsette å sveve til tross for tyngdefeltet.

Forutsetningene for at ballene skal falle til gulvet er derfor *at de både har en masse og at de befinner seg i et tyngdefelt.*

Tyngdefeltet skyldes at all masse tiltrekkes av hverandre. Tiltrekningskraften er proporsjonal med produktet av de to massene. Siden jorda er så stor vil vi oppleve at alle ting faller mot jorda.

Det er viktig å presisere for elevene at det ikke bare er batteriet som inneholder elektroner, men at ledningene er fulle av dem. Når så batteriet tilkobles, vil det elektriske feltet i ledningen gjøre at elektronene i metallet settes i en ordnet bevegelse mot batteriets positive pol. Det er også viktig å merke seg at feltet utbreder seg med lyshastigheten, men at gjennomsnittsfarten til elektronene bare er noen mm i sekundet.

Analogi: 2 Analogi med ertre i et rør

For å forklare at elektronene beveger seg langsomt mens feltet beveger seg med lysets hastighet er det ikke uvanlig å sammenligne en elektrisk leder med et rør fylt med ertre. Dytter vi inn en ert på venstre side, faller det umiddelbart ut en ert på høyre side (figur 2.12). Selv om gjennomsnittsfarten til ertene er liten, så vil bevegelsen fra venstre mot høyre forplante seg umiddelbart.



Figur 2.12 En elektrisk leder kan sammenlignes med et langt rør med baller.

Dette er en god modell for å vise at til tross for at elektronene beveger seg langsomt så vil alle elektronene begynne å bevege seg samtidig. Imidlertid gir modellen inntrykk av at den raske forplantningen av bevegelsen forutsetter at elektronene dytter borti hverandre. Slik vil det imidlertid ikke forholde seg. Til tross for at elektronene ligger spredt ut over hele ledningen og befinner seg i god avstand fra hverandre så vil de starte å bevege seg samtidig når vi kobler til batteriet.



At det må være slik forstår vi der- som vi tenker oss en renne med kuler som ligger

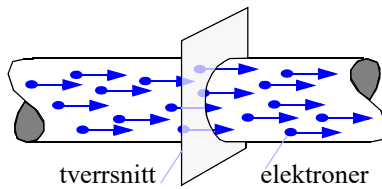


Figur 2.13 Når tyngdefeltet "slås på" begynner alle kulene å trille samtidig

spredt ut over i renna. Det er ikke vanskelig å forstå at alle kulene begynner å trille samtidig når vi forestiller oss at vi kan slå på tyngdefeltet. De er altså ikke avhengige av å dytte borti hverandre. Dette skyldes selvfølgelig at alle kulene samtidig vil påvirkes av tyngdefeltet, på samme måte som alle elektronene i en leder samtidig vil bli påvirket av det elektriske feltet som utbreder seg med en hastighet nær lyshastigheten.

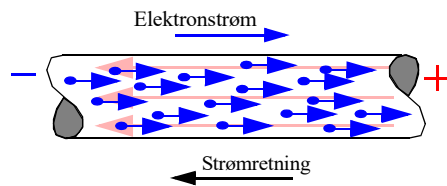
Strømstyrken gjennom en elektrisk leder er definert som:

Den totale ladning som passerer gjennom et tverrsnitt av lederen i løpet av ett sekund.



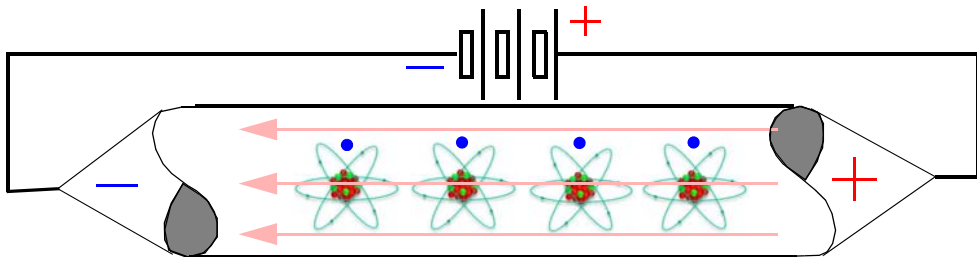
Figur 2.14 Strømstyrken er lik ladning pr. tidsenhet.

Mange elever synes det er ulogisk at elektronene beveger seg *en* vei, mens strømretningen er definert i motsatt retning. Dette skyldes at positiv strømretning er definert som den retningen positive ladninger vil bevege seg i et elektrisk felt.



Figur 2.15 A) Negative ladninger vil bevege seg fra minuspolen til plusspolen på batteriet.

Dersom vi et øyeblikk frigjør oss fra tanken om at ladningstransport må knyttes til massetransport, i dette tilfellet elektroner, så skal vi se at definisjonen av strømretning likevel kan framstå som logisk.



Figur 2.16 Når et fritt elektron forlater nærområdet til "sitt" atom, vil dette atomet framstå som positivt ladet, helt til elektronet erstattes av et annet fra et naboatom.



Vi tenker oss at alle atomene i lederen har sine frie elektroner i nærheten av sitt atom, dvs. at metallet i lederen er elektrisk nøytralt. Så setter vi på en elektrisk spenning over lederen. Dermed vil elektronene begynne å bevege seg mot den positive polen på batteriet. La oss se på prosessen i “langsom kino”.

Vi tenker oss at ett av elektronene til atomet lengst til høyre forlater atomet “sitt” og beveger seg mot batteriets positive pol. Når dette skjer blir det gjenværende atomet positivt (1). Rett etter blir den “tomme” elektronplassen fylt opp av naboatomets elektron. Dermed er atomet på nytt nøytralt, mens den positive ladningen har flyttet seg til naboatomet (2).

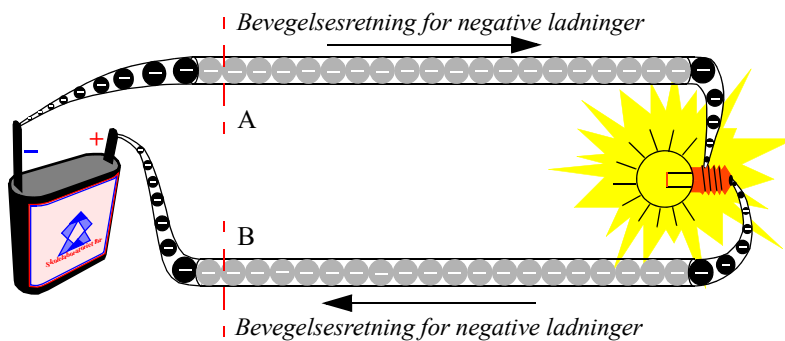
På denne måten vil den negativt ladede elektronstrømmen flytte seg mot den positive polen på batteriet, mens den positivt ladede “hull”-strømmen vil flytte seg mot den negative polen på batteriet.

Man har da bestemt at strømretningen er den veien den positive ladningen forflytter seg.

Det er derfor ikke bare av historiske årsaker og manglende kunnskaper at elektrisk strømretning fortsatt defineres motsatt av den retningen elektronene beveger seg. Det gir også mening.

Vi legger merke til at de negativt ladde elektronene beveger seg mot det elektriske feltet, mens den positive ladningen beveger seg med feltet. En kan utfordre elevene til å tenke etter hva som ville ha skjedd dersom en ball (se analogien på figur 2.19 side 37) hadde hatt *negativ* masse (f.eks. hadde veid -100 gram), hvilken vei ville den *da* ha falt i forhold til tyngdefeltet når den ble sluppet?

La oss se på en kjent problemstilling i en elektrisk krets før vi går videre. I figur 2.18 ser vi en elektrisk krets med et batteri og en lyspære. Vi vet nå at lampen lyser fordi elektroner passerer gjennom glødetråden i lyspæren.



Figur 2.18 I en elektrisk krets avgir lyspæren energi i form av lys og varme, men hvordan kan elektronene avgje energi?



Vi vet også følgende at dersom vi ...

- ... måler antallet elektroner som passerer tverrsnittet av lederen ved punktene A og B, så finner vi at det er det samme i begge punktene.
- ... måler gjennomsnittsfarten til elektronene som passerer tverrsnittene av lederen ved punktene A og B, så vil vi finne at gjennomsnittsfarten er den samme i begge punktene.

Dvs. at elektronene har hverken forsvunnet eller tilsynelatende mistet fart når de har passert lyspæra. Så hvor hentes den utstrålte energien fra?

Analogi: 3

Analogi til elektroner i gravitasjonsfeltet

For virkelig å forstå hva det elektriske feltet betyr for ladningstransporten og den elektriske strømmen, skal vi igjen hente fram den mekaniske modellen (figur 2.19).

Vi tenker oss kuler som ruller langs en renne. I den øverste renna har kulene en viss stillingsenergi (evne til å utføre arbeid). Den slake helningen på renna fr kulene til å rulle langsomt mot høyre. Når de kommer

til enden av renna faller de utfr kanten samtidig som de akselereres. I fallet vil kulene utføre et arbeid enten ved at de treffer hindringer underveis, eller ved at de treffer den nederste renna. Energien frigjøres ved at det høres et smell og ved at treffpunktet kan bli deformert og oppvarmet.

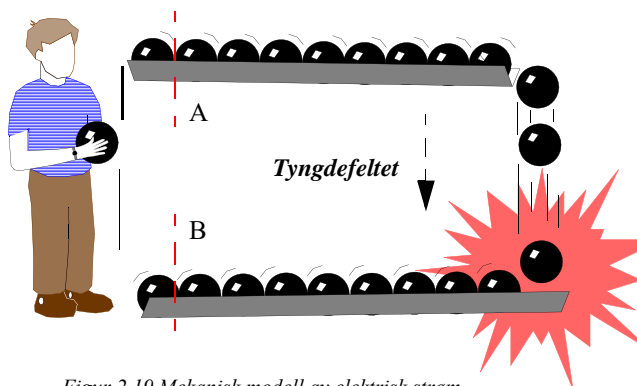
Så ruller kulene langsomt tilbake til gutten som løfter kulene opp i den øverste renna slik at de på nytt kan rulle ut mot høyre og utføre et arbeid. Gutten utfører et arbeid ved å tilføre kulene stillingsenergi.

La oss merke oss følgende:

- Antallet kuler pr. sekund som triller forbi i punkt A er lik antall kuler som triller forbi i punkt B (analogt med elektronene i eksempelet foran)
- Gjennomsnittshastigheten til kulene som passer punkt A og punkt B er den samme, så tilsynelatende har ikke hastigheten forandret seg fra punkt A til punkt B (analogt med elektronene i eksempelet foran)

Likevel har kulene utført et arbeid.

Ut fra denne analogien skjønner vi at kulene akselereres når de faller ut for kanten av renna, for så å bremses opp, og i oppbremsingen avgir de energi. Det er også kulenes *stillingsenergi som gutten gir dem som i fallet omdannes til bevegelsesenergi*, og som igjen omdannes til varme, lyd og deformering i det de treffer på en hindring.



Figur 2.19 Mekanisk modell av elektrisk strøm.

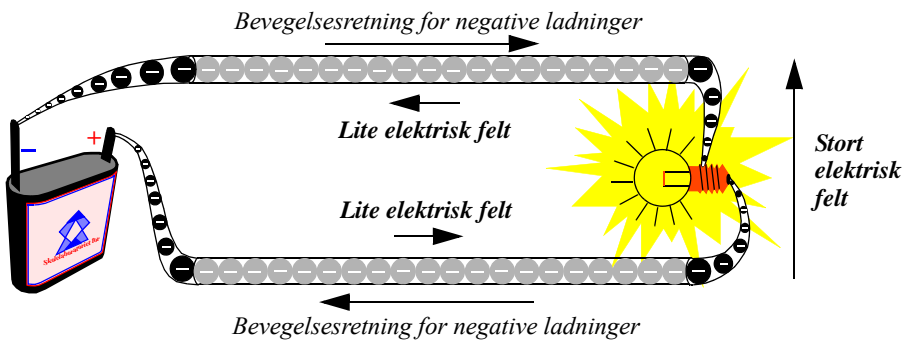


Vi kan også merke oss at:

- ... **uten tyngdefelt** vil ikke kulene rulle langs renna, og slett ikke falle utfor kanten. Kulene vil rett og slett ikke ha noen stillingsenergi, og kan derfor ikke utføre noe arbeid.
- ... **uten masse** vil ikke kulene ha noen "vekt" og kan ikke bli påvirket av tyngdefeltet. De vil ikke rulle langs renna og ikke falle utfor.

Vi kan altså slå fast at vi **både må ha et tyngdefelt og kuler med masse** for at energi skal kunne transporteres og frigjøres.

La oss så gå tilbake til elektronene som beveger seg i ledningen.



Figur 2.20 Elektriske ladede partikler "faller" i det elektriske feltet. I lyspæra akselereres elektronene dvs. de faller "langt" på kort tid og avgir mye energi.

På samme måte som gutten tilfører kulene stillingsenergi i tyngdefeltet, tilføres de ladede elektronene *stillingsenergi* i det elektriske feltet i batteriet. Når elektronene "faller" gjennom det elektriske feltet i lyspæra så omdannes elektronenes stillingsenergi til bevegelsesenergi. I lyspæra avgir de sin bevegelsesenergi i glødetråden som begynner å gløde pga. oppvarming. Dette skjer ved at elektronene bremses opp idet de støter sammen med atomer i glødetråden. At dette skjer nettopp i glødetråden og ikke i ledningen til og fra, skyldes at glødetråden er laget slik at den øver stor motstand mot elektronene, mens tilførselsledningene yter lite motstand, *dermed blir det aller meste av spenningen liggende over lyspæra og glødetråden, på samme måte som det aller meste av høydeforskjellen i den mekaniske modellen ligger ved enden av renna.*

På vei tilbake til batteriet har de mistet sin stillingsenergi og må få ny energi i batteriet. Her blir de "løftet" opp i det elektriske feltet og kan på nytt falle gjennom feltet og avgir energi. Batteriet tilfører elektronene energi ved å "løfte" dem opp til et høyere elektrisk potensiale, slik at de blir istand til å utføre et *elektrisk* arbeid.

La oss igjen merke oss følgende:

- **Uten et elektrisk felt** vil ikke elektronene bevege seg langs ledningen, og slett ikke gå gjennom lyspæra. Elektronene vil rett og slett ikke ha noe stillingsenergi og kan derfor ikke utføre noe arbeid.

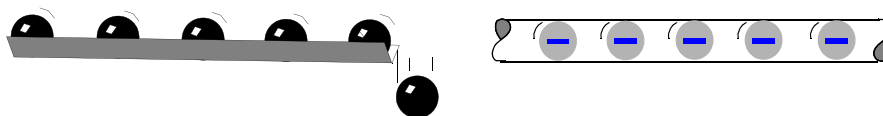


- **Uten ladning** vil ikke elektronene bli påvirket av det elektriske feltet, og de vil ikke bevege seg langs ledningen og ikke gå gjennom pæra.

Vi kan altså slå fast at vi **både må ha et elektrisk felt og elektroner med ladning** for at elektrisk energi skal kunne transporteres og frigjøres.

Vi skjønner også at strømmen av elektroner i begge ledningene er den samme, dvs. strømmen brukes ikke opp i lyspæra. På samme måte som kulene ikke forsvinner selv om de faller fra den øvre til den nedre renna.

Det er også hvert å merke seg at selv om kulene i renna ikke berører hverandre så vil de starte å rulle samtidig når tyngdefeltet “blir slått på”. Slik er det også med elektronene. Alle frie elektroner i ledningen vil begynne å bevege seg samtidig uten at de berører hverandre når spenningen blir slått på. Dette skyldes at både tyngdefeltet og det elektriske feltet utbrer seg med lysets hastighet og vil henholdsvis påvirke alle kuler og elektroner umiddelbart når feltene slås på.



Figur 2.21 Både kuler og elektroner vil begynne å bevege seg umiddelbart når feltene “slås på”, og er ikke avhengig av at de støter bort i hverandre.

Fra omtalen foran kan vi få inntrykk av at elektronene beveger seg pent og pyntelig på geledd langs ledningen, slik er det imidlertid ikke. På grunn av at ledningen har termisk energi (varme) vil elektronene virre rundt i alle retninger. Dette vil de fortsette med også når vi setter på det elektriske feltet. Feltet vil imidlertid medføre at elektronenes resulterende bevegelse blir i retning av batteriets positive pol.

2.4 Elektrisk spenning

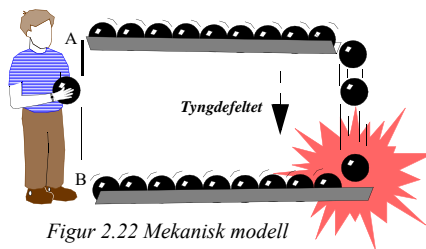
Så langt har vi stort sett snakket om elektrisk ladning og elektrisk strøm. Dette er begreper det er mulig å forstå siden man snakker om en fysisk bevegelse av ladete partikler. For folk flest er derfor strøm det primære fenomenet knyttet til elektrisitet. Vi snakker om at “strømmen er gått”, eller vi må “betale strømregningen”.

Det mest grunnleggende når det gjelder elektrisitet er imidlertid *ladningen* som er årsaken til *elektriske felt*, dernest er det *spenningen* som driver *strømmen* gjennom ledningen og til slutt *effekt* og *energi* som er det som anvendes rundt om i hjemmene. I denne sammenhengen blir den elektriske ladningen bærer av energien. Elektrisitet kalles derfor også for en *energibærer*. Det ville derfor vært riktigere si at “det er brudd i energitilførselen” eller vi må sørge for å få “betalt energiregningen”.



La oss et kort øyeblikk gå tilbake til vår mekaniske modell. Det er vel ingen tvil om at det koster arbeid å løfte kulene fra B til A. Størrelsen til dette arbeidet er avhengig av massen (m) til hver enkelt kule, hvor høyt (h) de skal løftes og hvor sterkt tyngdefeltet (g) er. Arbeidet (W) kan da uttrykkes slik:

$$W = m \cdot g \cdot h \quad (2.1)$$



Arbeidet pr. masseenhed kan da skrives som:

$$W/m = g \cdot h \quad (2.2)$$

Etter at kulene er løftet opp til den øverste renna er de *tilført stillingsenergi* som avgis når de faller utfor kanten av renna.

Bytter vi ut kulene med ladninger med ladning, Q , tyngdefeltet med det elektriske feltet, E , og høyden, med strekningen ladningen flyttes mot feltretningen, s , kan vi sette arbeidet som er tilført ladningen lik:

$$W = Q \cdot E \cdot s \quad (2.3)$$

Arbeidet pr. ladningsenhet kan da skrives som:

$$W/Q = E \cdot s \quad (2.4)$$

Som er det vi kalle spenning, U :

$$W/Q = E \cdot s = U \quad (2.5)$$

Vi kan tenke på spenning som den stillingsenergien vi tilfører et elektron ved å “løfte” det gjennom det elektriske feltet en viss strekning, akkurat på samme måte som kula tilføres stillingsenergi når den løftes en høyde, h , i tyngdefeltet. Jo “høyere” ladningen “løftes”, jo høyere spenning og dess større arbeid kan ladningen utføre når den senere faller i feltet.

Det er heller ikke så vanskelig å forstå at to ladninger kan utføre dobbelt så stort arbeid som en ladning, på samme måte som to kuler kan utføre et dobbelt så stort arbeid som en kule. Vi vet at strømstyrken er et uttrykk for antallet ladninger som passerer et tverrsnitt av ledningen i sekundet. Dermed kan vi sette opp det totale arbeidet, P , som den elektriske strømmen, I , under påvirkning av spenningen, U , kan utføre pr. sekund lik:

$$P = U \cdot I \quad (2.6)$$

Hvor P kalles effekt og er *energi pr. sekund* (eller energi pr. tidsenhet). Ved å summere opp effekten over tid så får vi den totale energien E som kan uttrykkes slik dersom effekten er konstant over tiden, t :



$$E = U \cdot I \cdot t \quad (2.7)$$

hvor t er tiden i sekunder.

2.5 Elektrisk effekt og energi

Energi kan være et vanskelig begrep og blir ofte definert som:

Evne til å utføre et arbeid.

Vi har tidligere omtalt stillingsenergi og bevegelsesenergi. Effekt er også energi, men det er *energi pr. tidsenhet*, eller *energi pr. sekund*. Sammenhengen mellom energi og effekt blir da:

Energi = effekt x tid

Elektrisk effekt kan uttrykkes som:

Elektrisk effekt = strøm x spenning

Og elektrisk energi blir da naturlig nok:

Elektrisk energi = elektrisk effekt x tid = strøm x spenning x tid

Definisjonen av elektrisk effekt kan virke litt overraskende. La oss forsøke å sannsynliggjøre dette i følgende analogi:

Analogi: 4 Analogi til elektrisk energi

Vi skal nå forsøke å sannsynliggjøre at elektrisk effekt kan skrives som produktet mellom strøm og spenning og tar utgangspunkt i at energi er evne til å utføre et arbeid, og effekt er energi pr. sekund. I denne sammenhengen så er det naturlig å ty til vannanalogien utformet som en foss, hvor elektrisk strøm (ladninger pr. sekund) kan sammenlignes med vannføringen i fossen (vannmolekyler pr. sek.), og spenning kan sammenlignes med fallhøyden til fossen.

Følgende resonnement er ganske intuitivt: Dersom vi skal omdanne energien i fossen til elektrisitet i en generator, så kan vi få **mye effekt** ut av en foss med **lav vannføring** (liten strøm) dersom den har **stor fallhøyde** (høy spenning). Eller vi kan få **mye effekt** ut av en foss med **lav fallhøyde** (lav spenning) bare **vannføringen er stor nok** (stor strøm). Dersom fossen har **både lav vannføring og lavt fall**, får vi **lite effekt** ut av den. På samme måte vil vi kunne få **svært mye effekt** ut av en foss med både **høy vannføring og stor fallhøyde**.

Denne analogien kan overføres direkte til elektrisk effekt og energi. I regnestykket under kan resultatet (effekten) bli det samme enten med høy strøm og lav spenning, eller lav strøm og høy spenning siden effekten uttrykkes som produktet av strøm og spenning:

Effekt = strøm x spenning



Foto: Nils Kr. Rossing

Figur 2.23 Storfossen i Humlavassdraget



2.6 Elektrisk ledningsevne og motstand

Motstander er hyppig brukt i både elektro og elektronikk og har mange ulike funksjoner som f.eks. å begrense strømmen i en krets (lysdiode), lage ulike spenningsnivåer slik at transistorer kan virke som de skal eller redusere signalnivået. For å redusere volumet i en lydforsterker kan man bruke motstander med variabel verdi.

2.6.1 Ledningsevnen til metaller

Mengden av frie ladninger i et materiale er med å bestemme materialets elektriske evne til å lede elektrisk strøm. Et materiale med mange frie ledningsbærere (gjerne elektroner) vil ha stor evne til å lede elektrisk strøm, vi sier at materialet har stor *ledningsevne* eller at det har liten elektrisk *motstand* eller *resistivitet*.

Den elektriske motstanden til en ledning av metall er proporsjonal med metalllets ledningsevne, dvs. konsentrasjonen av frie ladninger, proporsjonal med lengden, og omvendt proporsjonal med tverrsnittsarealet av ledningen. Det betyr normalt at en tykk ledning har mindre motstand enn en tynn motstand.

Motstanden øker dessuten med temperaturen, noe som skyldes at ladningenes framkommelighet reduseres når bevegelse til metallatomene øker med temperaturen. Temperaturen til stoffer er i bunn og grunn bevegelse, økende temperatur er økende bevegelse. Når vi brenner oss så betyr det at atomer i overflata på den varme gjenstanden slår mot huden slik at det oppstår en skade dersom bevegelsen er kraftig nok.

Normalt ønsker vi at elektriske ledninger av metall skal ha så liten motstand som mulig. Andre ganger ønsker vi å lage en motstand med en helt spesiell motstandsverdi (resistans).

2.6.2 Motstander

En motstand er en elektrisk komponent med to bein som har en spesifisert motstandsverdi eller *resistans*. Slike kan være laget av staver av karbon (kull) som i større eller mindre grad er blandet opp med keramisk støv. Siden karbon leder strøm relativt godt og keramisk støv er isolerende, så vil motstandsverdien øke med økende andel keramisk støv og omvendt. Karbonmotstander er relativt ustabile og kan endre verdi med tiden. En har derfor i stadig større grad gått over til *metallfilmmotstander*. Disse består av en tynn film av f.eks. nikkel-krom som er dampet på en sylinder. Motstandsverdien i metallfilmen avhenger av tykkelsen og lengden av metallfilmen. Slike motstander er ofte mer stabile over tid og kan gjøres svært nøyaktige.





Analogi: 5

Motstandens analogi med vann gjennom innsnevret rør

Vi kan sammenligne en elektrisk motstand med en innsnevring av en vannførende rørledning. Vi kan se at en vannstrøm består av vannmolekyler som beveger seg gjennom røret. Mengden vann som passerer et tverrsnitt av røret pr. sekund, kan vi si er et uttrykk for størrelsen på

vannstrømmen. Dette er helt analogt med elektrisk strøm som er antall ladninger som passerer et tverrsnitt av ledningen pr. sekund.

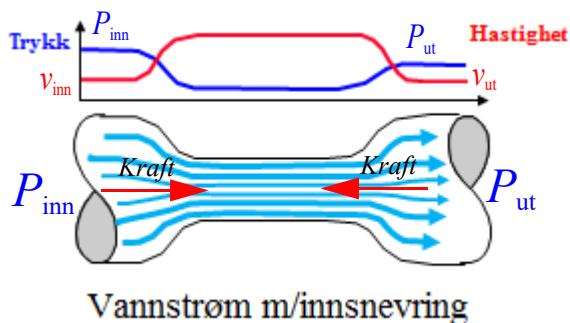
Siden antall vannmolekyler som passerer et tverrsnitt av røret i gjennomsnitt må være det samme uansett hvor i røret vi måler, så må gjennomsnittsfarten til molekylene være lavere i de deler av røret som har stor diameter enn der hvor røret er innsnevret. Dette er vist med en rød kurve på figur 2.24.

For at farten til molekylene skal øke, så må de akselereres. Det er lett å forstå at akselerasjonen må skje der vannet møter innsnevringen. Vi vet også at vannmolekylene må utsettes for en kraft for at de skal akselereres. Da er det ikke vanskelig å tenke seg at denne kraften er et resultat av trykkendringer i vannet langs røret, og at vannet akselererer fra høyt mot lavt trykk. Dermed vil trykket i den smale delen av være lavere enn trykket i den tykke delen av røret, som kanskje er litt overraskende. Tilsvarende vil vannet når det kommer ut av innsnevringen måtte bremses opp. For at dette skal være mulig må det virke en kraft motsatt vei som bremser vannmolekylene der røret utvides.

For at vannet skal bevege seg gjennom røret inkludert innsnevringen, så må trykket P_{inn} være større enn trykket P_{ut} . Vi kan si at det er en trykkforskjell over innsnevringen.

Det er heller ikke urimelig å anta at den totale vannstrømmen gjennom røret vil påvirkes av innsnevringen. Siden den er der, så vil totalstrømmen bli noe mindre enn om den ikke hadde vært der. Skulle vi ha oppnådd like stor vannstrøm med innsnevring som uten, så måtte vi ha økt trykket fra kilden (springen).

Dette er helt ekvivalent med elektrisk strøm. Her bytter vi ut vannmolekylene med ladning og trykket med elektrisk spenning (U). Strømmen (I) blir lik antall ladninger som passerer et tverrsnitt av en ledning pr. sekund. For at ladningene skal akselereres gjennom motstanden så må det være en spenningsforskjell over motstanden.



Figur 2.24 Vannanalogi av elektrisk motstand



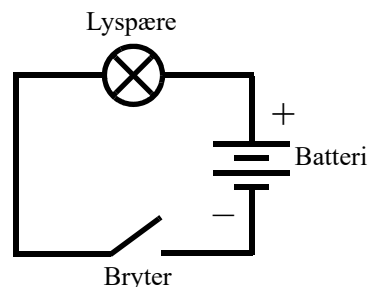
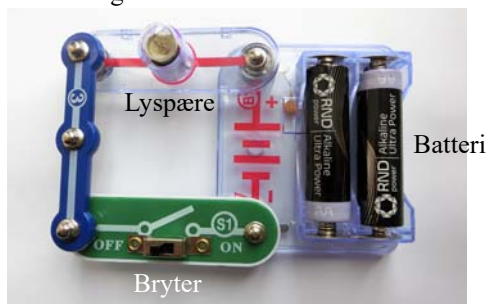
I det neste avsnittet skal vi se nærmere på hvordan strømmen fordeler seg i kretser som har flere greiner, Ohms og Kirchhoffs lover.

2.7 Grunnleggende kretser

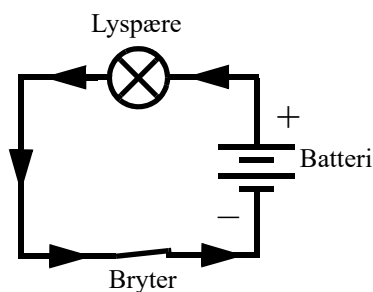
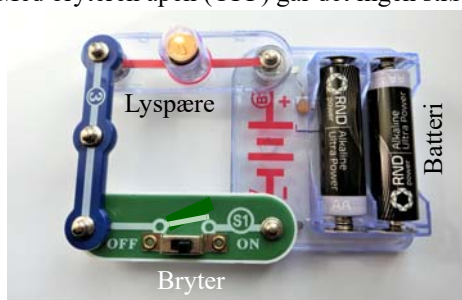
Ulike kretselementer som batterier, lyspærer, brytere, motstander, LED osv. kan kobles sammen på utallige måter og det skal ikke mye til før kretsen blir så komplisert at det er vanskelig å forstå hvordan strømmene går. I dette avsnittet skal vi se på de mest grunnleggende oppkoblingene og hvilke lover som gjelder for slike.

2.7.1 Sluttet krets

Den elektrisk strømmen i kretsen på figuren under går fra batteriets positive pol gjennom bryteren, lyspæra og tilbake til batteriet. Til venstre har vi koblet opp kretsen med elementer fra Snap Circuit og til høyre ser vi den samme kretsen tegnet med symboler, vi kaller dette et *koblings-skjema*. Når vi kjenner betydningen av symbolene så er et koblings-skjema mer oversiktlig og lettere å tolke. Batterier eller lyspærer kan se ganske forskjellige ut i virkeligheten, men siden ulike typer batterier eller lyspærer tegnes med de samme symbolene så blir kretsskjemaene ganske enhetlige.



Med bryteren åpen (OFF) går det ingen strøm i kretsen og lyspæra lyser ikke.



Med bryteren er lukket (ON) går det strøm i kretsen og lyspæra lyser, *kretsen er sluttet*, og det går en strøm fra batteriets positive pol (+) tilbake til batteriets negative pol. Uten denne ubrutte tilbakeveien vil det ikke gå noen strøm i kretsen.

Refleksjon: Et nærliggende spørsmål er *hvorfor må kretsen være sluttet for at det skal gå strøm?*



Diskusjon: En forutsetning for at det skal gå ström i ledningen er at det er frie ladninger. Skapes det et brudd i ledningen så oppstår et område med få eller ingen frie ladningsbærere, slik det er i luftgapet mellom polene i den åpne bryteren. Uten ladningsbærere ingen elektrisk ström.

En ofte brukt analogi for å gi elever forståelse for sluttet krets er *tauanalogien*.

Analogi: 6 Tauanalogien for elektrisk ström og spenning

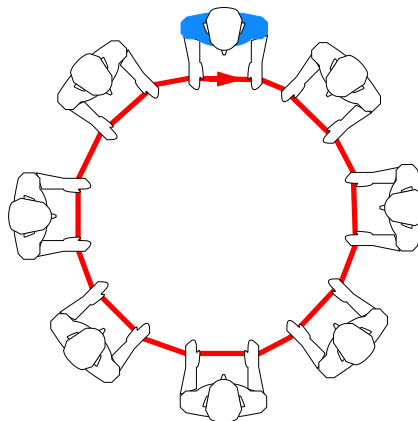
Tauanalogien er egnet for å vise egenskaper med sluttet krets og sammenhengen mellom ström og energi. Den egner seg imidlertid dårlig til å illustrere forgreininger.

Elevene står i en ring og holder løst om et tau hvor endene er knyttet sammen slik at det dannes en sammenhengende ring. Tauet skal gli lett gjennom svakt knyttede hender. Tauet illustrerer strømmen i en sluttet krets.

Læreren eller en av elevene (blå skjorte på figur 2.25), er “batteriet” og skal sørge for at “strømmen” sirkulerer rundt i kretsen. Elevene legger merke til at snora beveger seg samtidig og med like stor hastighet, i alle deler av kretsen. Akkurat like mye snor som forlater “batteriet” kommer tilbake, ingen ting hoper seg opp noen plass i kretsen. Dette tilsvarer at strømmen er den samme overalt (Kirchhoffs strömlov).

Det er batteriet som driver strømmen gjennom kretsen. Dersom elevene holder hardere i tauet så vil “batteriet” måtte bruke mer kraft (høyere spenning) for å opprettholde den samme “strömstyrken” (farten på tauet). Dersom kraften holdes konstant vil tauet gå langsommere (større motstand gir mindre ström). Elevene som holder hardere om snora vil kjenne at de blir varme i hendene, dvs. det avgis varme.

Analogien egner seg godt til å illustrere at strømmen er den samme overalt i kretsen og at strømmen (tauet) ikke blir brukt opp på sin vei gjennom kretsen. De skjønner også at energi må tilføres av batteriet og blir avgitt hos det enkelte kretselementet (elevene) og at dette tapper batteriet for energi (“batterieleven” blir sliten). De skjønner også at strømmen begynner å gå samtidig i alle delene av kretsen når “strømmen” slås på (Angell et al., 2019).

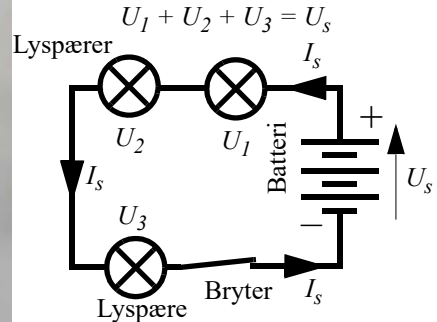
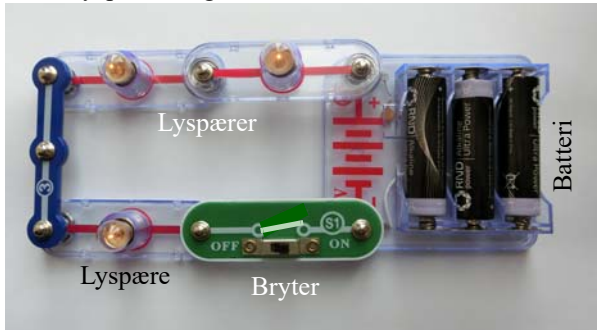


Figur 2.25 Tauanalogien



2.7.2 Serie- og parallellkoblede kretser

I kretsen under har vi koblet tre lyspærer og tre batterier etter hverandre. Vi sier at vi har *serie-*koblet lyspærene og batteriene.

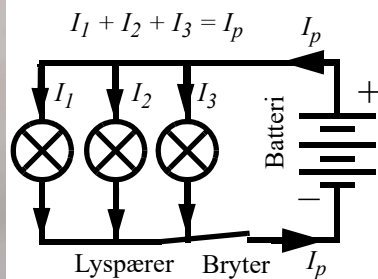
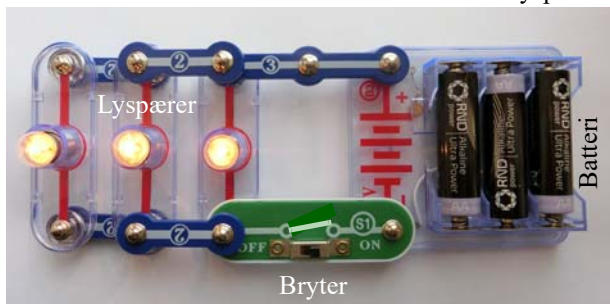


I en seriekobling vil den samme strømstyrken (I_s) passere gjennom alle lyspærene. Det samme gjelder for bryteren og batteriene. Av bildet over kan vi også skimte at lyspærene lyser med den samme lysstyrken, hvilket indikerer at strømstyrken i samtlige pærer er den samme. Spenningen til batteriet vil imidlertid fordele seg over hver av lyspærene slik at summen av spenningen ($U_1 + U_2 + U_3$) er lik spenningen til batteriet (U_s) (Kirchhoffs spenningslov).

Refleksjon: Hvordan kan strømstyrken være den samme når strømmen har avgitt energi på sin vei gjennom kretsen?

Diskusjon: På samme måte som elv renner utfor en foss og kan utføre et arbeid ved å drive et kvernhjul eller en elektrisk generator, så faller elektronene gjennom lyspærene og utfører et arbeid og lager lys. På samme måten som vannmengden og vannhastigheten er den samme på oversiden som på nedsiden av fossen, er strømstyrken den samme før og etter lyspæra. Men både vannet og elektronene har mistet energi i fallet, stillingsenergien er blitt mindre.

Figuren under viser en *parallellkobling* av tre lyspærer. Dersom lyspærene er helt like så vil strømmen fra batteriet fordele seg med like mye for hver pære. Strømmen (I_p) ut og inn av batteriet vil være lik summen av strømmene i hver av lyspærene ($I_1 + I_2 + I_3$) (Kirchhoffs strømlov).



Refleksjon: Vi legger merke til lysstyrken på lyspærene i parallellkoblingen er mye sterkere enn lysstyrken hos pærene i seriekoblingen, til tross for at lyspærene og batteriene er de samme.



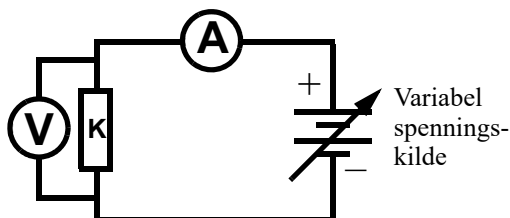
Diskusjon: Siden lysstyrken er større i parallellkoblingen så kan vi anta at strømmen gjennom hver lyspære er større enn hos seriekoblingen. Hvorfor er strømstyrken i parallellkoblingen større enn i seriekoblingen.

For å kunne svare på det må vi se på *Ohms lov*.

2.7.3 Ohms lov

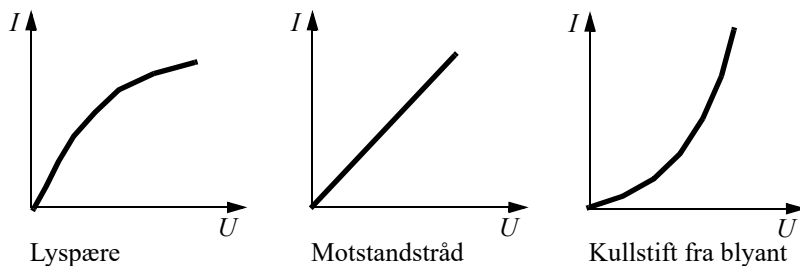
I figuren til høyre har vi vist en enkel sluttet krets med et batteri der vi kan variere spenningen. Vi har en komponent med en motstand (K) og måleinstrumenter for måling av strøm (A) og spenning (V).

Vi kan tenke oss at vi kan bytte ut, komponenten, med ulike materialer som f.eks. en lyspære, en motstandstråd (konstantan) og en blyant (dvs. kullstiften i sentrum av blyanten).



Figur 2.26 Krets for karakterisering av komponenten K

Vi ønsker å finne ut om strømmen gjennom komponenten endres når vi endrer spenningen. Målinger viser at sammenhengen er forskjellig avhengig av hvilket materiale K består av.



Figur 2.27 Måling av strøm som funksjon av spenningen over ulike materialer, en lyspære, en motstandstråd og kullstiften i en blyant.

Som vi ser av figur 2.27 så er sammenhengen mellom strøm og spenning ganske forskjellige for de tre materialene vi har valgt å måle på. For lyspæra avtar økningen i strømstyrke når spenningen blir høy nok, dvs. at forholdet U/I øker når U øker, som betyr at motstanden i glødetråden øker etter som den blir varm. Motstandstråden derimot er ganske lineær, dvs. at forholdet U/I er konstant. Mens hos grafitten i blyanten øker strømmen mer etter som spenningen øker, dvs. forholdet U/I avtar med økende spenning, som betyr at motstanden i grafitten avtar når strømmen øker, hvilket sikkert også skyldes at materialet oppvarmes. Vi kaller slike kurver for U - I -karakteristikken for de ulike materialene (Grimes et al., 2011, side 506).

Den tyske fysikeren og matematikeren **Georg Simon Ohm** (1789 – 1854) undersøkte slike U - I -karakteristikker for ulike materialer på 1820-tallet og fant flere materialer hvor sammenhengen var lineær. dvs. at U/I var konstant.



For de materialene der forholdet mellom spenningen U over materialprøven og strømmen I gjennom materialprøven er konstant, så kan vi formulere følgende lov:

$$U = R \cdot I \quad (2.8)$$

Loven kalles **Ohms lov** etter Georg S. Ohm som arbeidet med denne sammenhengen, og hvor R er en materialkonstant som kalles materialets *resistans*. Det er ikke selv ligningen som er Ohms lov, men det at det er et konstant forhold mellom strøm og spenning. Er dette tilfelle, så sier vi at materialet følger Ohms lov.

Mye av stoffet i dette avsnittet er hentet fra Grimenes et. al. (2011).

Refleksjon: Så hvorfor er strømstyrken i parallellkoblingen av lyspærer større enn i seriekoblingen?

Diskusjon: I parallellkoblingen så står hele batterispenningen over hver lyspære, mens i seriekoblingen så fordeles batterispenningen seg over de tre lyspærene. Lavere spenning gir mindre strøm i følge Ohms lov, og mindre strøm gir mindre lys. Vi antar at motstanden i hver av pærene er den samme i begge tilfellene selv om vi vet at dette ikke er helt riktig som vi har diskutert foran. Uansett vil endringen i resistans på grunn av oppvarming være mindre enn konsekvensene av serie- og parallellkobling av lyspærer.

2.7.4 Serie- og parallellkobling av motstander

Her er det på sin plass å nevne at den *totale resistansen* som batteriet “ser” i kretsen er bestemt av hvordan lyspærene er koblet opp. Kobler vi tre pærer i parallell så er det som om vi i en vannledning koblet tre vannkraner i parallell. Åpner vi alle tre kranene så strømmer det tre ganger så mye vann ut gjennom rørene. På samme måte vil det gå tre ganger så mye strøm i den elektriske kretsen dersom vi har tre pærer i parallell. Kretsens resistans er en tredjedel i forhold til hva den ville ha vært dersom bare en pære satt i kretsen.

I en seriekobling av lyspærer vil imidlertid strømmen i kretsen bli en tredjedel av strømmen i forhold til om vi bare hadde en pære.

Analogien med vannkraner kommer imidlertid til kort ved en slik seriekobling av lyspærer, da vannstrømmen neppe ville blitt reduserte til en tredjedel dersom vi koblet tre kraner etter hverandre og skrudde opp alle tre. Dette er et av mange eksempler på at analogier har sine begrensninger.

Her må vi se på spenningen. I en seriekobling fordeles spenning fra batteriet likt over de tre pærene. Dvs. at spenningen over hver pære er en tredjedel av den vi hadde over hver pære i parallellkoblingen. En tredjedels spenning gir en tredjedels strøm når resistansen i pæra er den samme. Siden strømmen skal være den samme i et hvert tverrsnitt av kretsen så vil strømmen i kretsen bli en tredjedel.

Vi konkluderer med:

Parallellkobling av n antall like lyspærer (motstander) gjør at strømmen blir $1/n$ av hva strømmen blir med en lyspære.



Seriekobling av n antall like lyspærer (motstander) gjør at spenningen over hver lyspære blir $1/n$ spenningen over hva den ville ha blitt med en lyspære. Dermed vil også strømmen i en slik seriekobling bli $1/n$ i forhold til hva strømmen ville ha vært i en lyspære.

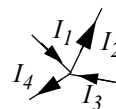
Vi er da klare for å se på viktige lover som oppsummerer det vi alt har sett, Kirchhoffs to lover.

2.7.5 Kirchhoffs lover

Sammen med Ohms lov er **Kirchhoffs lover** de viktigste lovene som gjelder for elektriske og elektroniske kretser. Disse lovene hjelper oss å forstå hvordan strøm og spenning *fordeler* seg i en krets.

Kirchhoffs første lov (også kalt Kirchhoffs strømlov):

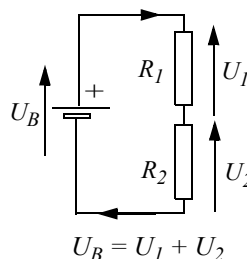
Konsekvensen av denne loven er kort og godt at der hvor ledninger møtes i et knutepunkt der må summen av strømmene inn mot knutepunktet være lik strømmene ut fra knutepunktet.



Noen ledninger fører strøm inn mot knutepunktet, andre leder strøm bort fra knutepunktet. Summen av de som leder strøm bort fra punktet må være like de som leder strøm inn mot knutepunktet. Dette betyr at strøm ikke kan forsvinne eller dukke opp i et knutepunkt, heller ikke hope seg opp i knutepunktet.

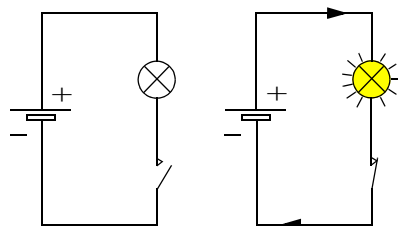
Kirchhoffs andre lov (også kalt Kirchhoffs spenningslov):

En av de viktigste konsekvensene av Kirchhoffs andre lov er at om vi summerer potensialforskjellene (spenningen) langs en sluttet krets så vil summen bli lik null.



Figur 2.28 Kirchhoffs andre lov.

I eksempelet i figur 2.28, ser vi at batterispenningen U_B blir liggende over de to resistorene R_1 og R_2 , slik at summen av spenningene U_1 og U_2 blir lik batterispenningen U_B .



Figur 2.29 En krets må være sluttet for at det skal gå strøm.

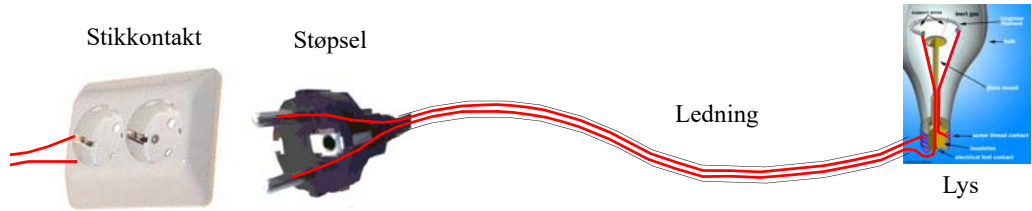
Disse lovene har en viktig konsekvens: Nemlig at det *kun kan gå strøm i en sluttet krets*. Med sluttet krets mener vi at strømmen *både* må ha en ubrutt vei fra den ene polen på batteriet fram til lampen, og en returvei tilbake til den andre polen på batteriet.

Selv om dette synes opplagt, så er det ikke selvsagt at elevene skjønner det med en gang. Som vi tidligere har omtalt kan det være forvirrende at det bare går en synlig ledning fra stikkontakten til lampen.

Stikkontakten er den delen som vanligvis sitter fast i veggen, mens støpselet er det som henger på ledningen og stikkes stikkontakten i veggen. Ved å studere et støpsel så ser en at det har to ledninger. Den ene fører strømmen inn til apparatet og den



andre fører strømmen tilbake til generatoren for å få en *sluttet krets*. Dette blir imidlertid noe mer komplisert siden stikkontakter vanligvis leverer *vekselspenninger*.

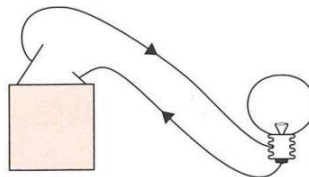




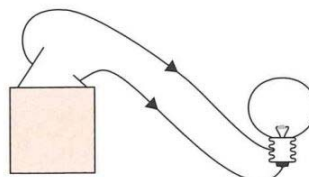
2.8 Vanlige misoppfatninger om elektrisitet

Før vi går videre kan det være greit å se nærmere på en del vanlige misoppfatninger om elektrisitet. Oppgaven i figuren under er hentet fra The Second International Science Study (SISS) (Sjøberg, 1986) og gir et godt bilde av hvilke forestillinger elever har når det gjelder elektrisk strøm.

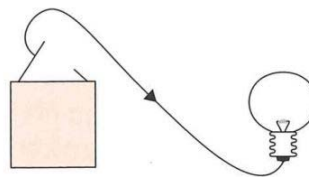
- A Strømmen går inn i lampa gjennom den ene ledningen. Den får glødetråden til å lyse, og like mye strøm går tilbake til batteriet gjennom den andre ledningen.



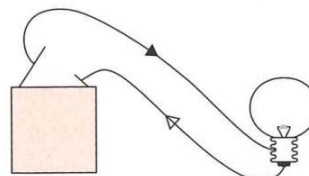
- B Det går strøm til lampa gjennom begge ledninger. Strømmen møtes i glødetråden og får den til å lyse.



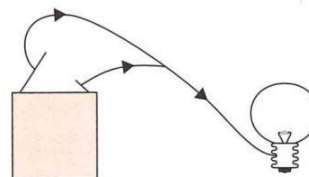
- C Det går strøm til lampa fra en av polene på batteriet. Strømmen får glødetråden til å lyse.



- D Strøm går inn i lampa gjennom den ene ledningen. Strømmen får glødetråden til å lyse. Det som er igjen av strøm, går tilbake til batteriet.



- E Strøm fra begge polene på batteriet samles og går inn i lampa. Strømmen får glødetråden til å lyse.



Disse oppgavene illustrerer hver for seg ulike måter å forestille seg hvordan det blir lys i en lyspære. Det viser seg at blant norske elever i ungdomsskolen så er alternativ B, “kollisjonsmodellen” populær. Likeså alternativ D, “strømforbruksmodellen” og alternativ E som er en variant av “entrådsmodellen”, også kalt “modell uten returstrøm”, vist under alternativ C, populære.

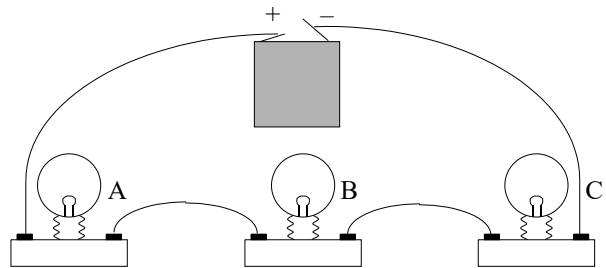


At mange heller til *strømforbruksmodellen* er kanskje ikke så rart, siden lampen avgir lys og varme så må jo energien tas fra *noe* hos strømmen slik at det blir mindre igjen av dette *noe*. Som vi skal se så kjenner vi igjen denne forestillingen når elever skal forklare hva som skjer i elektriske kretser.

Det er også forståelig at mange tyr til *en-trådsmodellene* ut fra ren observasjon, det går jo normalt bare en ledning fra stikkontakten og fram til lampen eller det elektriske apparatet. De færreste har åpnet en ledning og sett at den ofte består av to eller tre ledninger (to strømførende ledninger pluss jord).

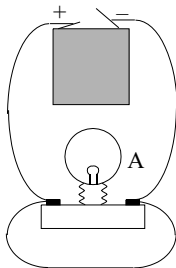
Bruken av *kollisjonsmodellen* er noe mer komplisert å forstå, men det kan være en logisk konsekvens av at noen har fått med seg at det trengs to ledninger fram til en lyspære for at det skal bli lys, og hva er vel mer logisk enn at strømmen i de to strømmene møtes i pæra og gir lys. En konsekvens av dette kan være at pære B lyser sterkere enn pære A og C i figur 2.30.

En konsekvens av strømforbruksmodellen er at den første lampen (A) i en seriekobling lyser mer enn de neste som kommer senere langs strømveien. En antar da at strømmen i dette tilfellet går fra + til -. For de som tenker elektronstrøm kan en lett ende opp med at C lyser sterkere enn B og A. Det som ev. skulle bli til overs av strøm går så tilbake til batteriet

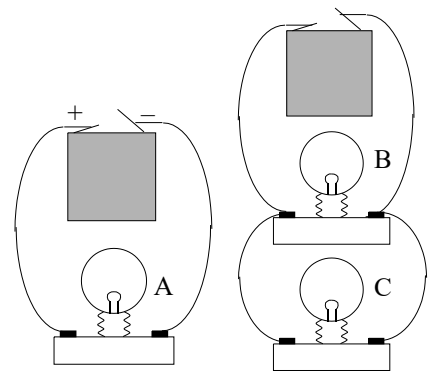


Figur 2.30 Med strømforbruksmodellen vil A lyse sterkere enn B og C.

Mange betrakter også batteriet som en *konstant strømkilde* hvilket betyr at når to lyspærer kobles i parallell så vil hver pære lyse svakere jo flere pærer som må dele på strømmen. Her vil mange mene at A lyse sterkere enn B og C siden strømmen fra batteriet må fordele seg på B og C. Man kan imidlertid lett komme til å tolke et resultat feil siden dette vil også være riktig dersom man ikke opererte med idealiserte komponenter.



Figur 2.32 Selv om lyspæra er kortsluttet så vil den lyse siden noe av strømmen likevel vil gå gjennom pæra.



Figur 2.31 Med konstant strømkilde vil A lyse sterkere enn B og C

En feil som gjerne går igjen er antagelsen om at selv om en pære er kortsluttet, som vist i figur 2.32, så vil fortsatt noe av strømmen gå gjennom pæra.



En annen vanlig misforståelse er at strømmen i kretsen påvirkes sekvensielt etter som den passerer de ulike komponentene, denne misoppfatningen går under betegnelsen *sekvenstenkning*. Med en slik oppfatning vil strømmen påvirkes av komponentene etter som de passerer “nedstrøms”, men ikke “oppstrøms”. Dette kan bli konsekvensen av å bruke en vannmodell for å forklare strømmen i en krets. Elevene betrakter kretsen som en elv. Lager man en innsnevring på eleven langt nede i elevløpet så vil ikke dette påvirke vannstrømmen ved elevens kilder (Angell et al., 2019).

Som vi vet så må hele strømkretsen betraktes som et helhetlig system, hvor en endring i motstand i hver komponent vil påvirke strømmen i hele kretsen.

2.9 Diagnostisering av misoppfatninger

Opp gjennom årene er det gjort en mengde undersøkelser med tanke på å avsløre elevens misoppfatninger mht. elektrisitet (Engelhardt, Beichner, 2003). Her skal vi nøye oss med å referere undersøkelser som er gjennomført av masterstudenter ved NTNU de seneste årene og som bl.a. har ført til omfattende testing av studenter som begynner ved NTNU.

Høsten 2017 ble det gjennomført undersøkelser av hvordan forståelsen av grunnleggende elektriske kretser var hos elever på 5., 7., 9. trinn og på Vg1 (Olsen, 2018). Figuren under viser hvilke spørsmål som elevene ble presentert for.

Elevnummer: _____

Symbolforklaring:

Lyspære

Batteri

Strømledning

Strømbryter

Oppgave 1

Tegn hvordan du vil koble lyspæren til batteriet for å få den til å lyse.

Oppgave 2

Beskriv det som skjer med elektrisiteten i oppgave 1. Skriv her:

Oppgave 3

Hvilken lyspære vil lyse sterkest?
Sett ring rundt svaret.

A: Den **rote**

B: Den **blå**

C: Den **grønne**

D: Alle vil lyse like sterkt

Oppgave 4

Hvilken lyspære vil lyse sterkest?

A: Den **blå**

B: Den **rote**

C: De vil lyse like sterkt

Figur 2.33 Fire av de seks spørsmålene som ble stilt til elever i 5., 7., 9., og Vg1

Spørsmålene var nøye utvalgt for å kunne avsløre elevenes forståelse av elektriske kretser samtidig som testen skulle være kortfattet.



Oppgave 5
Når vil lampen lyse?
A: Figur 1
B: Figur 2
C: Både figur 1 og 2 vil lyse

1

2

Oppgave 6
Hvilken lyspære vil lyse sterkest?
A: Den blå
B: Den røde
C: Den grønne
D: Den grønne vil lyse svakere enn den blå og den røde

Figur 2.34 De to siste av de seks spørsmålene som ble stilt til elever i 5., 7., 9. trinn, og Vg1

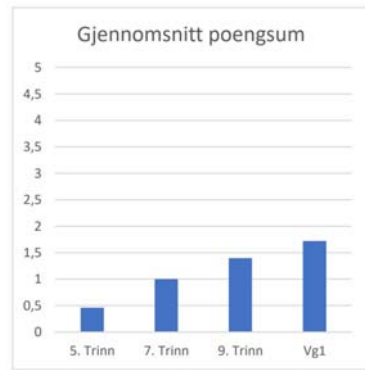
Det må sies at antallet informanter var relativt beskjedent (13 på 5. trinn, 17 på 7. trinn, 20 på 9. trinn og 29 på Vg1), totalt deltok 79 i undersøkelsen derav 37 gutter, 40 jenter og 2 uten oppgitt kjønn. I tillegg til fagprøven ble det gjort intervju av to elever fra hvert trinn med mest mulig spredning av utelse fra fagprøven. 5. og 7. trinn hadde enda ikke hatt undervisning i elektrisitetslære, mens 9. og Vg1 elevene hadde hatt elektrisitetslære ett eller to år tilbake i tid.

Figur 2.35 viser hvordan gjennomsnittlig skår endret seg med årstrinnene. Maksimal skår var 5 poeng. Vi ser at den største relative økningen er fra 5. til 7. trinn hvor de i mellomtiden ikke har hatt undervisning i elektrisitetslære, økningen må derfor sannsynligvis tilskrives kognitiv utvikling hos elevene eller kunnskap hentet utenfor skolen (Olsen, 2018).

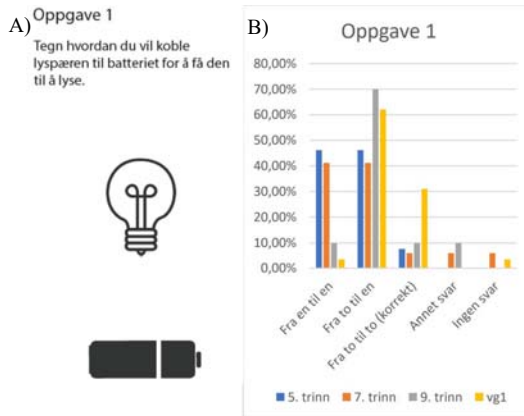
Det som overrasker mest er likevel den relativt svake kunnskapen hos elever på videregående skole.

Oppgave 1: Elevene skal tegne forbindelseslinjer mellom batteriet og pæra for at den skal lyse. Svarene fordeler seg på ulike kategorier.

1) “Fra en til en” der elevene tegner ledning fra en pol på batteriet til en pol på pæra (ingen returstrøm),
2) “Fra to til en” der elevene tegner ledning fra begge polene på batteriet som så føres sammen til en pol på lyspæra, og 3) “Fra to til to” som er den korrekte oppkoblingen. Vi legger spesielt merke til den høye



Figur 2.35 Gjennomsnittlig skår på fagprøve pr. årstrinn, hvor 5 er maks.



Figur 2.36 .A) Oppgavetekst B) Fordelingen av type svar på de ulike kategoriene. Fra en pol på batteriet til en på pæra, Fra to på batteriet til en på pæra og to fra batteriet til to til pæra (korrekt).

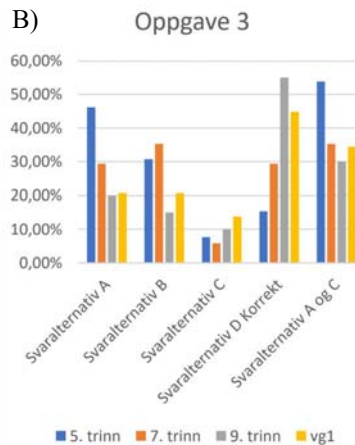
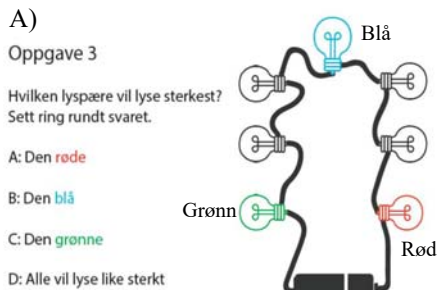


andelen elever i videregående skole som holder fast ved en entrådsmodell (ingen retur strøm) og det lave antallet korrekte svar på 9. trinn (10 %) og Vg1 (31 %).

Oppgave 3:

Figur 2.37 viser at over 50% av elevene på videregående skole heller enten til en forbruksmodell (A eller C) eller en kollisjonsmodell (B). Det kan likevel se ut til å være fallende tiltro til forbruks-

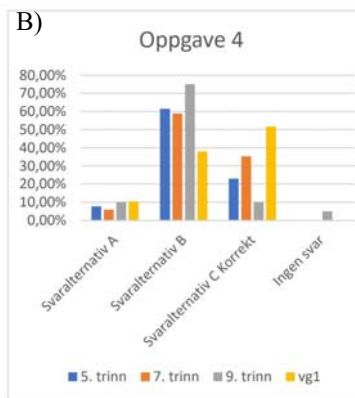
Figur 2.37 A) Seriekobling av pærer. Baserer elevene seg på forbruksmodellen, kollisjonsmodellen eller har de en korrekt forståelse av kretsen? B) Svarene antyder at nærmere 50% av Vg1 elevene fortsatt heller til forbruks- eller kollisjonsmodellen.



modellen med økende alder. Vi legger også merke til at resultatene antyder at ungdomsskoleelever synes å ha en mer korrekt forståelse for seriekobling av lyspærer enn elever på Vg1, hvilket kan bety at de har forstått at strømstyrken er konstant i hele kretsen. Det må imidlertid presiseres at masterstudenten ikke har vurdert om forskjellene er signifikante.

Oppgave 4 undersøker elevenes forståelse av egenskapene til parallellkobling av lyspærer. Resultatene synes å vise en betydelig tro på at den nærmeste pæren lyser sterkest, spesielt er dette tydelig blant ungdomsskoleelever. Det er også

Figur 2.38 A) Oppgave 4 tester elevenes forståelse av parallellkobling. B) Resultatene synes å vise en betydelig tro på at den nærmeste pæra lyser sterkest.

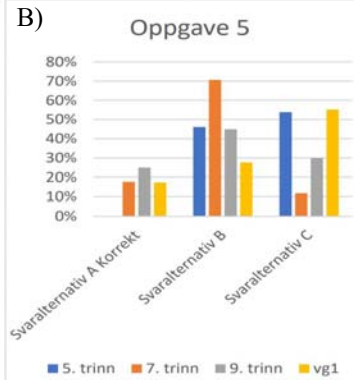
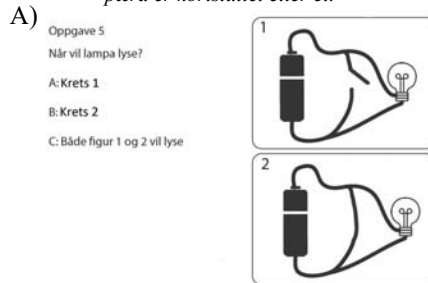


interessant å legge merke til at så få elever på ungdomsskolen velger riktig alternativ til tross for en bedring fra 5. til 7. trinn. Dette kan tyde på at de har en felles kilde som har gitt dem feil forståelse. En skal heller ikke se bort fra at noen har tenkt riktig og sett bort fra idealiserte ledninger, og antatt at kortere ledninger gir lavere motstand og dermed høyre strøm og sterkere lys, hvilket i teorien er korrekt, men i praksis neppe ville vært mulig å registrerer.



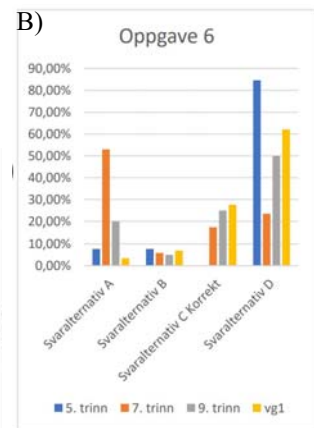
Oppgave 5 undersøker elevenes forståelse for kortsluttede kretser. Resultatene tyder på at en vesentlig andel av elevene mener at det ikke spiller noen rolle om pæren er kortsluttet eller ikke for at pæra skal lyse. Over 80% av Vg1 elevene mener at det er slik og ca. 75% av elevene i ungdomsskolegruppen.

Figur 2.39 A) Oppgave 4 tester elevenes forståelse av kortslutning B) Resultatene synes å indikere at det ikke spiller noen rolle for strømmen i pæra om pæra er kortsluttet eller ei.



Oppgave 6 undersøker om elevene klarer å kombinere kunnskaper om serie- og parallellkobling. Her ser vi at både elever fra ungdomsskolen og videregående favoriserer at grønn lampe lyser svakere enn både r d og blå lampe. Bare ca. 25% av elevene på 9. trinn og Vg1 svarer riktig, at den grønne pæra lyser sterkest.

Figur 2.40 A) Oppgave 4 tester elevenes evne til å kombinere kunnskaper om serie- og parallellkobling. B) Resultatet av testen viser at under 30% av elevene på 9. trinn og Vg1 har svart riktig.



Ut fra den relativt beskjedne populasjonen som er undersøkt så er det vanskelig å komme med noen kategorisk konklusjon, men resultatene synes å antyde at det er en betydelig grad av misoppfatninger både før og etter undervisning av elektrisitetsslære:

Tabell 1: Oversikt over riktig svar fra 9. trinn og Vg1

Tema	Korrekte svar	
	9 trinn	Vg1
Oppkobling av lyspære	10%	31%
Seriekobling av lyspærer, lysstyrke	55%	44%
Parallellkobling, lysstyrke	10%	51%
Kortslutning, hvem lyser?	25%	17%
Kombinert parallell- og seriekobling, lysstyrke	25%	28%



I 2018 gjorde en annen masterstudent ved Institutt for lærerutdanning ved NTNU (Foss, 2019), en studie blant 9. trinnselever hvor han så på forskjeller i misoppfatninger blant elever som *hadde hatt* undervisning i elektrisitetstlære, hvor undervisningen *pågikk i det studien ble gjort* og blant de som *var ferdig* med undervisning i elektrisitetstlære.

Studien omfattet 337 elever på 9. trinn fra en større norsk by. Studien ble gjort etter at elevene hadde besøkt et Newton-rom hvor de blant annet hadde hatt undervisning om elektrisk induksjon. Det ble brukt omtrent de samme spørsmålene som omtalt foran (Olsen, 2018), kun oppgave 1 og 2 var sløyfet. Spørsmålene ble lagt til en mer omfattende fagprøve knyttet til besøket ved Newtonrommet.

Tabell 2: Antall elever som hadde hatt, som ikke hadde hatt og som ikke visste om de hadde hatt undervisning elektrisitetstlære før gjennomføring av prøve.¹¹

Hvor mye elektrisitetstlære har du hatt på ungdomsskolen så langt?				
		Frekvens	Prosent	Gyldig prosent
Gyldig	Vi har ikke startet enda	95	28,2%	34,2%
	Vi har startet, men har noe igjen	89	26,4%	32,0%
	Vi er ferdig	64	19,0%	23,0%
	Vet ikke	30	8,9%	10,8%
	Totalt	278	82,5%	100,0%
Mangler		59	17,5%	
Sum		337	100,0%	

Som det framgår av tabell 2 så var 64 av elevene (23%) ferdige, 89 (32%) hadde begynt, men var ikke ferdige og 95 (34,2%) var ferdige med undervisning av elektrisitetstlære i klasserommet. Det er interessant å se i hvilken grad undervisningen påvirker resultatene fra undersøkelsen.

11. "Mangler" var en gruppe elever hvor læreren ikke lot elevene besvare denne delen av spørreundersøkelsen siden de ikke hadde hatt undervisning i elektrisitetstlære enda. Dvs. de hadde misforstått poenget med denne delen av spørreundersøkelsen.



Tabell 3: Krysstabell for misoppfatninger og mengde undervisning

		Mengde undervisning			Totalt
		Ingen	P�ag�ende	Ferdig	
Hverdagsforestilling	Nei	12,0%	17,0%	20,3%	16,0%
	Ja	88,0%	83,0%	79,7%	84,0%
Totalt		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Antall		92	88	64	244

Ut fra svarene har kandidaten funnet ut hvem av elevene som i besvarelsene har vist at de har misoppfatninger knyttet til elektrisitetssl ere (tabell 3). Vi registrerer at blant de som enn  *ikke har hatt* elektrisitetssl ere på 9. trinn, så er det funnet misoppfatninger i en eller flere av oppgavene hos 88,0% av besvarelsene. Hos de som *holder på med* elektrisitetssl era på det tidspunktet undersøkelsen ble gjort, var det 83,0% av elevene som hadde misoppfatninger, mens det var 79,7% av *de som hadde hatt* elektrisitetssl ere som fortsatt hadde misoppfatninger. Det kan se ut som om at det er en forbedring på ca. 8%-poeng fra de som ikke hadde hatt (88%) til de som hadde hatt (79,7%) undervisning i elektrisitetssl ere. Hvilket må sies å være en overraskende liten forbedring.

Det må imidlertid påpekes at kandidaten ikke har studert om graden av misoppfatninger hos den enkelte elev har endret seg, som må sies å være en svakhet ved analysen. Uansett indikerer resultatene at elevene har manglende forståelse innen elektrisitetssl ere selv etter undervisning.

I 2019 ble det laget en mer omfattende test som tok sikte på å undersøke de grunnleggende kunnskapene vedrørende elektrisitetssl ere til studenter som begynner ved studier innen fagretningene Elektronisk systemdesign og innovasjon, og studenter ved Kybernetikk og robotikk ved NTNU¹². De samme testene ble også benyttet for å sjekke kunnskapene til elever ved et par videregående skoler som tok faget Fysikk 1.

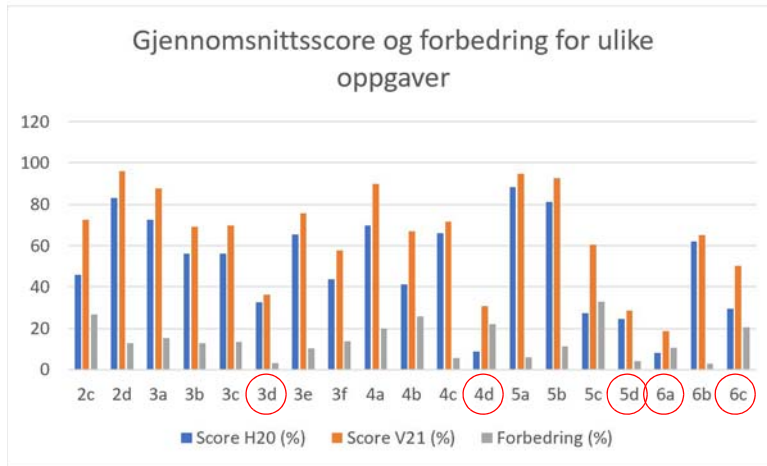
Testen er ganske omfattende, her skal kun se på et lite utvalg av svar som peker seg ut som spesielt vanskelig for studentene ved NTNU.

Undersøkelsen er ganske grov da den ikke tar hensynet til graden av misoppfatninger. Likevel viser den en trend som gjør at man kan stille spørsmål ved i hvilken grad undervisningen ved grunnskole og i videregående skole har fungert etter intensjonen. Alle studenter som tas opp ved NTNU fra videregående skole skal ha hatt Fysikk 1, ev. Fysikk 1 og 2.

12. Testen ble utviklet av Bojana Gajic i samarbeid Lars Lundheim ved Institutt for elektroniske systemer og Nils Kr. Rossing ved Inst. for fysikk i 2019. Bojana har også utviklet Excel-arket som oppsummerte og systematiserte resultatene som er analysert av masterstudent Peter Fadum Lefsaker våren 2021 (Lefsaker, 2021).

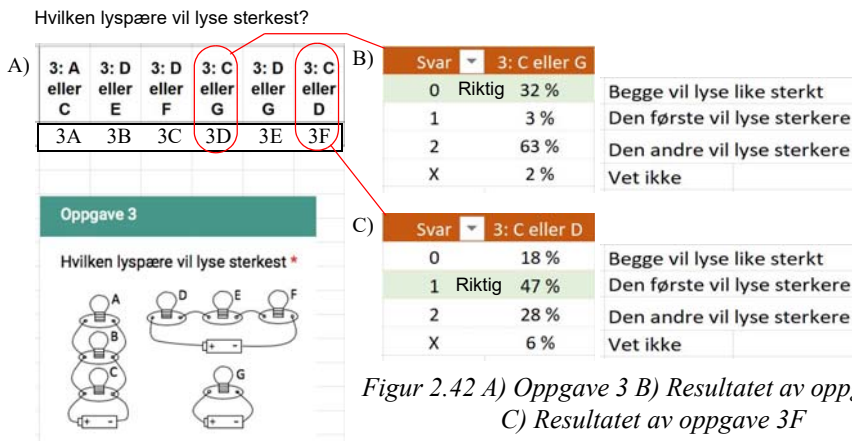


Testen viser at noen tema ved elektrisitetstlære faller tungt for et flertall av studentene. Den delen av testen som vi skal se nærmere på inneholder spørsmål knyttet batterier og lamper koblet opp på ulike måter, med spørsmål om hvilke pærer som lyser, ev. lyser sterkest, eller hvilke batterier som lades ut raskest i den aktuelle oppkoblingen¹³. Figur 2.41 viser prosentvis riktig svar av første års studenter ved fagretningene Elektronisk systemdesign og innovasjon (ES), og studenter ved Kybernetikk og robotikk (KR). Diagrammet viser skår ved oppstart august 2020 (H20) og etter et halvt år med studier, januar 2021 (V21). Vi legger spesielt merket til det svake resultatet på oppgave 3d, 4d, 5d, 6a og 6c (Lefsaker, 2021).



Figur 2.41 Gjennomsnittlig prosentvis poengscore for et utvalg ulike deloppgaver for august 2020 og januar 2021 (Lefsaker, 2021)

Hele 48% av ES-studentene og 34% av KR-studentene svarte feil på alle disse fem oppgavene ved oppstart høsten 2020. Også i januar 2021 da testen ble gjentatt for den samme gruppen studenter, var resultatet fortsatt svakt, men man registrerte en gjennomsnittlig forbedring på 11% poeng for de nevnte oppgavene. Vi velger derfor å se nærmere på nettopp disse oppgavene.



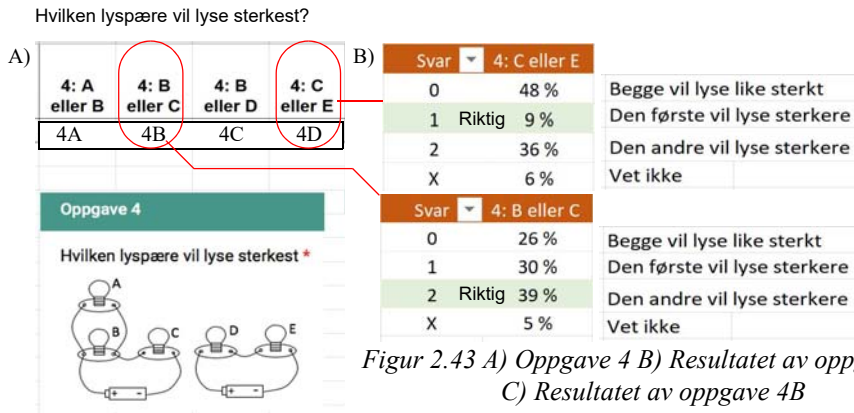
Figur 2.42 A) Oppgave 3 B) Resultatet av oppgave 3D C) Resultatet av oppgave 3F

13. Testene gjennomført høsten 2020 og våren 2021 inneholdt også spørsmål knyttet til dynamiske forhold som inkluderer spoler og kondensatorer. Denne delen er ikke omtalt her.



Figur 2.42 viser oppgave 3 og resultatet for to av deloppgavene, 3D og 3F. Det er spesielt spørsmålet 3D, om hvilke av lyspære C eller G som lyser sterkest som er interessant. Her svarer hele 63% feil, at G lyser sterkest. Det kan se ut som om de tenker at *batteriet er en konstant strømkilde* og at denne konstante strømmen i det ene tilfellet vil fordeles på pærene A, B og C, mens i tilfellet med lyspære G så vil hele strømmen gå gjennom pæra. En slik tankegang harmonerer med de 28% som svarer at pære D lyser sterkere enn C i oppgave 3F. Med andre ord ikke *alle* er konsekvente i sine valg.

Vi finner en lignende tendens i oppgave 4D som vist i figur 2.43.



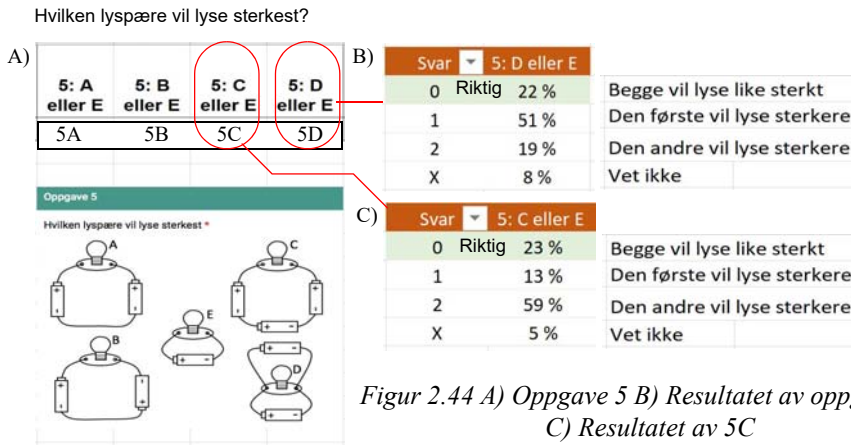
Figur 2.43 A) Oppgave 4 B) Resultatet av oppgave 4D
C) Resultatet av oppgave 4B

Vi legger merke til at hele 48% svarer at C og E vil lyse like sterkt, hvilket støtter resultatet fra 3D om batteriet som konstant strømkilde. Dessuten mener hele 36% at E vil lyse sterkere enn C som er vanskeligere å tolke, men kan indikere en form for strømforbrukstenkning siden det er flere lyspærer før pære C enn pære E så vil mer av strømmen brukes opp slik at C vil lyse svakere enn E. Vi kan slå fast at det er kun få som tenker på en lyspære som en motstand og at to lyspærer i parallell vil gi en lavere motstand og dermed høyere strøm i kretsen totalt.

De 30% som svarer at B lyser sterkere enn C kan ha en form for sekvensiell tenkning, men dette svaret støtter ikke konstant strømkilde.



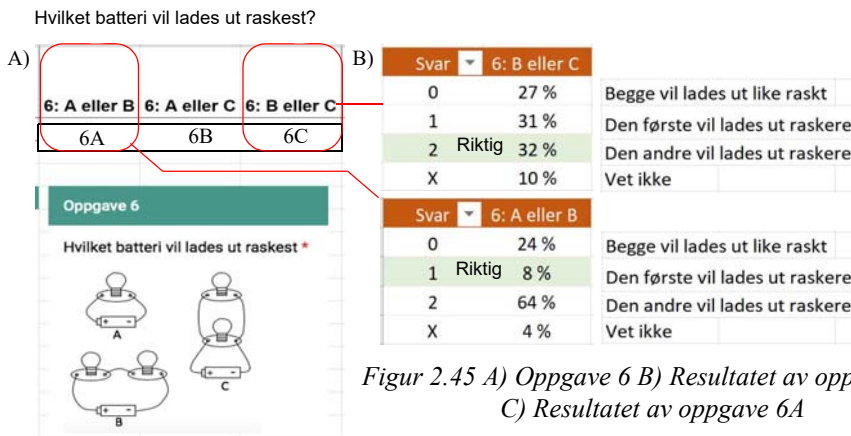
Vi finner en lignende tendens i oppgave 5D som vist i figur 2.44.



Igen ser vi at det foretrukne valget for hele 51% er at to batterier i parallell vil gi sterkere lys enn kun ett batteri, dvs. mange synes å betrakte batteriet som en konstant strømkilde, mens bare 22% har valgt det riktige svaret.

Også i oppgave 5C har mange svart feil, dette kan imidlertid skyldes at de ikke har sett nøye nok på hvilken vei de seriekoblede batteriene er snudd.

Vi finner lignende tendenser i oppgave 6A og 6C som vist i figur 2.45.

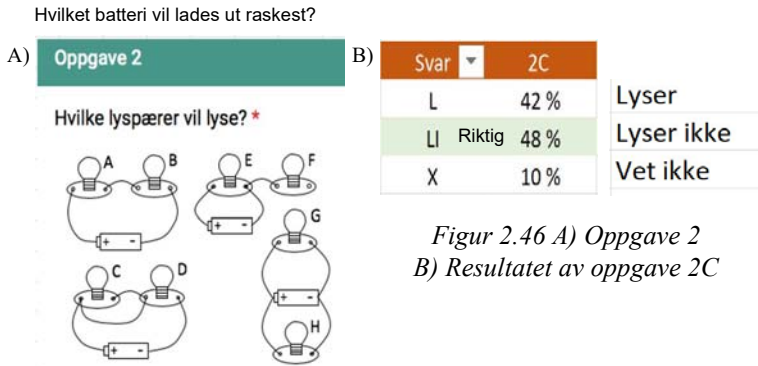


Oppgave 6 spør hvilken oppkobling som vil tappe batteriet raskest. I oppgave 6C hvor man spør om batteriet lades ut raskere med to pærer i serie, enn en pære, svarer hele 64% feil at det er den oppkoblingen med flest pærer som tapper batteriet raskest. Det kan se ut som om de fleste tenker at to pærer vil lade ut batteriet raskere enn kun en pære. En slik tankegang kan harmonere med at man betrakter batteriet som en konstant strømkilde, skjønt det er ikke sikkert informantene tenker slik.



Usikkerheten blir imidlertid større når begge oppkoblingene som skal sammenlignes har to lyspærer. Da fordeles svarene omtrent jevnt ut over de tre alternativene (27%, 31% og 32%) (figur 2.46 B).

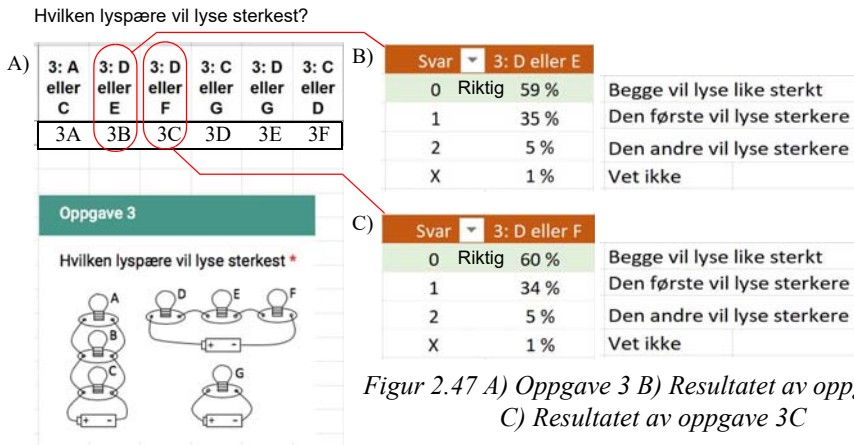
La oss også ta med et spørsmål fra oppgave 2, resultatet er vist i figur 2.46.



Figur 2.46 A) Oppgave 2
B) Resultatet av oppgave 2C

På spørsmål om hvilken pære som lyser av pærene A til H så svarer studentene sort sett riktig, men det er en oppgave som volder problemer, nemlig om pære C som er kortsluttet, lyser eller er slukket. Her svarer hele 52% feil at “den lyser” eller “vet ikke”. Dette er et svar som tyder på sekvensstenkning. Som en ungdomsskoleelev uttrykte det: “Hvordan “vet” strømmen n r den kommer til et “veiskille” at den ene veien er uten pære og den andre er med”. Med en slik problemstilling i tankene vil det sannsynligvis være nærliggende å mene at strømmen velger å dele seg.

Oppgave 3B og 3C viser tydelig tendenser til strømforbrukstenkning.



Figur 2.47 A) Oppgave 3 B) Resultatet av oppgave 3B
C) Resultatet av oppgave 3C

Av figur 2.47 ser vi at ca. 40% mener at pærene i en seriekobling lyser med forskjellig styrke. Ca. 35% mener at den som er nærmest + polen på batteriet og ca. 5% at den nærmest - polen, lyser sterkest. Begge disse variantene kan lett knyttes til strømforbrukstenkning. Den mest dominerende (ca. 35%) er de som mener at strømmen “først brukes opp” fra + polen, dvs. i



strømretningen. Mens en minoritet (ca. 5%) er de som mener at strømmen “først brukes opp” fra – polen, dvs. den veien som elektronene beveger seg. I en slik betraktning ligger det også en viss grad av sekvensiell tenkning.

Oppsummering

La oss forsøke oss på en oppsummering:

- Den mest utbredte misoppfatningen synes å være å betrakte batteriet som en konstant strømkilde. Dette synes å gå igjen i flere av besvarelsene (3D, 4D, 5D og 6A). Dette er kanskje ikke så rart siden det er ganske vanlig å betrakte strøm som det primære fenomenet i elektrisitet (Angell et al., 2019).
- Ca. 40% anvender strømforbrukstenkning når de analyserer kretser (3B og 3C)
- Ca. 50% mener at en kortsluttet pære lyser eller er usikre, som kan tolkes som en form for sekvenstenkning (2C).
- Bruk av Ohms lov og å betrakte en lyspære som en motstand, synes fjernt for flere av studentene. Dette vises spesielt i forbindelse med oppgave 4D hvor hele 91% svarer feil eller “vet ikke”. Vi finner lignende tendenser i oppgavene 4A til 4C.

Forøvrig er det tydelig at informantene ikke har vært konsekvente gjennom besvarelsen, men har endret strategi under veis. Dette er også noe som flere av masterstudentene har bemerket (Olsen, 2017, Lefsaker, 2021).

Så hvordan kan vi legge opp undervisningen for å bøte på dette?

2.10 “Dialogisk undervisning”

I boka *Nysgjerrighet – Dybdelering i informasjonssamfunnet* (Lindholm, 2021), skriver Markus Lindholm om “dialogpedagogikk”. Med det mener han åpne samtaler som ikke nødvendigvis leder til konklusjoner, men som kan hjelpe elevene til å oppdage nye spørsmål som han mener er selve definisjonen på vitenskap som prosess (Lindholm, 2021, side 282).

Lindholm ser i denne sammenhengen elevene som en ressurs i klasserommet der de ofte kan være de som ser en sak fra helt nye sider enn det læreren er istand til.

Han skriver:

Å vekke faglig nysgjerrighet i klasserommet kan være krevende, og det handler i sin kjerne ikke minst om hvilket forhold læreren selv har til sitt fag. På den faktuelle fløyen står læreren over elevene. Men på den prosessorienterte fløyen står elevene mange ganger over læreren, fordi deres åpne blikk lettere leder samtale mot nye paradokser. Dialogisk undervisning avhenger av at elevene selv ser noe som et problem og har spørsmål.
(Lindholm, 2021 side 283)

Et særdeles viktig poeng i denne sammenhengen er at det opprettes en tillit og trygghet mellom lærer og elever og innbyrdes mellom elevene. Han skriver videre:

... jeg har tidligere drøftet betydningen av å se elevene, og at de også ser hverandre. Å bli sett er ikke mindre viktig i tenårene. Men nå oppstår blikkontakten først og fremst gjennom faget,

når elevene merker at læreren verdsetter deres spørsmål, og at de gjenkjenner sin egen undring i den voksne. Å merke at den kunnskapsrike voksne anerkjenner ens egen nysgjerrige usikkerhet langs fagets yttergrenser, er å bli sett i tenårene. (Lindholm, 2021, side 283–4)

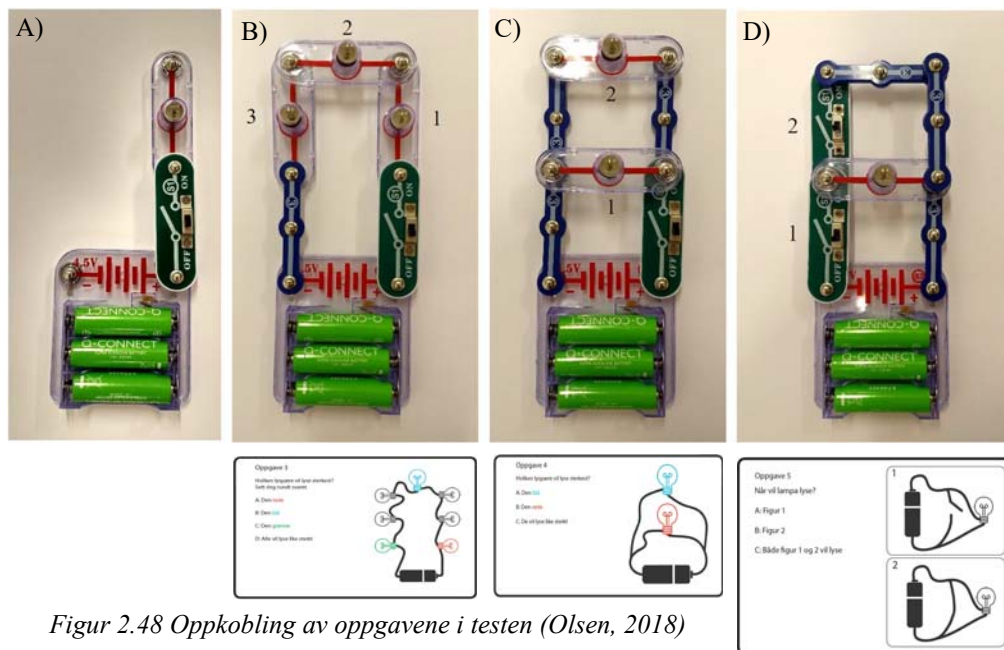
Jeg tror det var noe slikt masterstudent Morten-Andre Olsen opplevde da han intervjuet elevene i forbindelse med spørreundersøkelsene han gjennomførte høsten 2017.

2.10.1 Erfaringer fra en masteroppgave

Som tidligere nevnt ble det i etterkant av spørreundersøkelsen utført av Morten-André Olsen i 2017 utført intervju av et mindre utvalg av informantene, to fra hvert trinn. Hensikten var å forstå mer om bakgrunnen for hvorfor de svarte som de gjorde. Utvalget var gjort med tanke om å få et så bredt bilde som mulig, derfor ble også sterke og svake elever valgt ut.

Siden elevene, spesielt fra de yngste trinnene, manglet faglige begreper egnet til å uttrykke det de ville forklare, falt valget på bruk av byggelementer fra Snap Circuit hvor de ulike kretsene brukt i spørreundersøkelsen kunne bygges opp fysisk slik at informantene kunne peke og forklare med egne ord, der de manglet faguttrykk.

Figur 2.48 viser tre av oppgavene brukt under testen. Hver krets har en bryter som gjør det mulig for informantene og komme med forslag til hva som vil skje med lyset i pærene når bryteren kobler kretsen til batteriet, og hvorfor det blir slik. Når så bryteren slås på vil de umiddelbart se om antagelsen var riktig eller gal og de får mulighet til å revurdere forslagene sine. En slik situasjon er svært lærerik for de involverte, men krever stor tillit mellom informant og forsker (Olsen, 2018, side 20 – 21.

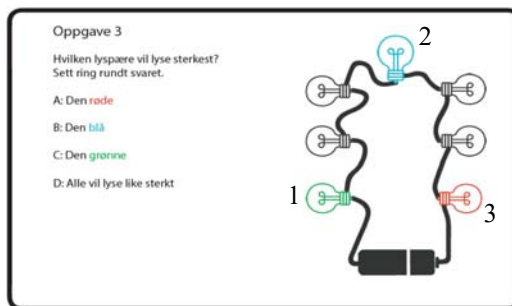


Figur 2.48 Oppkobling av oppgavene i testen (Olsen, 2018)



La oss se på et eksempel hvor informant H, en elev på 7. trinn, skal forklare hva som skjer i en seriekobling av tre lyspærer, oppgave 3 (kun med 3 lyspærer).

H: Den første lyspæren (peker på lyspære 1) kommer til å lyse sterkest, så kommer den neste til å lyse svakere (lyspære 2), og den neste enda svakere (lyspære 3), fordi det kommer mindre strøm til den. (Olsen, 2018, side 43)



Figur 2.49 Oppgavene i testen (Olsen, 2018)

Her er det en elev som har en forestilling om at strømmen brukes gradvis opp etter som den passerer pærene på vei mellom polene på batteriet. Når hun slår på bryteren så ser hun at antagelsen er feil og må håndtere en kognitiv konflikt.

Før bryteren blir slått på så får hun spørsmål om lysstyrken dersom kretsen bare hadde en lyspære eller om den hadde tre pærer i serie. Da svarer hun slik:

H: Ja, fordi det er den første (peker på lyspæren i seriekoblingen som er nærmest batteriets - pol), og da er det ingenting som har bremsset den, så det kommer like mye strøm til begge to (ref. lyspæren i kretsen med en lyspære og den første lyspæren i seriekoblingen).

Her viderefører hun sitt logiske resonnement med strømforbrukstenkning. Den første pæra i kretsen med tre i serie vil lyse like sterkt som den ene, fordi “det er ingen ting som har bremsset den (strømmen)” når den når den første pæra. Vi registrerer også at informanten synes å erkjenne begrepet *motstand* siden strømmen blir “bremsset opp” i lyspæra.

Etter at begge kretsene er testet, opplever hun en kognitiv konflikt når hun ser at kretsen med bare en lyspære lyser sterkere en lyspærene i en seriekobling. Hun blir nødt til å lage en ny hypotese:

H: Jeg tror det er fordi strømmen... når det er tre bortover... så blir strømmen bremsset, så blir det mindre strøm til en lyspære, fordi det er tre lyspærer. Hver lyspære bremsset strømmen litt, og så går den igjennom, så det går like mye strøm i hver lyspære. Fordi strømmen må gå igjennom tre lyspærer lyser den svakere enn der den bare må gå igjennom én.

Morten: Vil de andre lyspærene lyse om vi skrur ut denne her? (skrur ut lyspære 2 (figur 2.48 B))

H: Ehh nei, fordi alt henger sammen. Det er jo sånn at på juletreet at om en pære går så lyser virker det ikke lenger.

M: Så hva skjer med strømmen? Hvorfor lyser ikke de to andre?

H: Strømmen går igjennom pæren, men den bremsset ikke. (Olsen, 2018, side 44)

En slik metode brukt i undervisningen er muligens gunstig mht. læring, men særdeles ressurskrevende. Olsen skriver:

Prosessen med intervjuet ga flere inntrykk. For det første var verdien i å la elevene få



danne hypoteser som m atte begrunnes, for s a å teste ut hypotesene og forklare hva som skjer i kretsen i etterkant, enorm. Ikke bare ga dette elevene sjansen til å styre sin egen konstruksjon av kunnskap, det ga elevene en læringsarena som ikke krever forkunnskaper eller teoribøker. Ikke minst f r læreren et innblikk i hvordan elevene tenker, et innblikk jeg sjeldent har fått f r. (Olsen, 2018, side 66)

Det er ikke vanskelig å forst a et en slik form for undervisning kan være effektivt og gi gode resultater, men hvem har ressurser til å drive en slik en til en undervisning?

Eric Mazur ved Department of physics ved Havard University har utviklet ulike metoder for å kunne gjennomføre noe lignende for elever i større klasser ved universitetet. Her utnytter han *medelever* som veiledere (“Peer instruction”) der det lar seg gjøre (Mazur, 1996).

Metoden kan kort oppsummeres slik:

1. Læreren gir en kortfattet introduksjon til et tema.
2. Læreren stiller et spørsmål med flere alternative svar (“multiple choice”) som utfordrer misoppfatninger. Spørsmålene må være vel utvalgt og formulert. Det har ingen hensikt å stille trivielle spørsmål som alle kan svare på. Ei heller inkludere alternativer som ingen vil komme til å velge. Formulering av gode spørsmål er derfor viktig, men krevende. Det ideelle spørsmålet er det som gir typisk en riktig svarprosent på mellom 40 – 60% første gang spørsmålet stilles. Svarene som er feil bør også helst avsløre misoppfatninger.
3. Ved hjelp av et responssystem (f.eks. bruk av smarttelefon) stemmer elevene på hvilke svar de tror er riktige. Anonymitet er av betydning.
4. Elevene sitter gjerne i grupper på 3 – 4 elever. Etter at de har svart første gang blir de bedt om å diskutere svaralternativene internt i gruppen i noen minutter. Spørsmålene stilles så på nytt og studentene gjentar avstemningen.
5. Læreren kan så velge å respondere på resultatet. Dersom antall riktig svar i utgangspunktet ligger i det nevnte prosentomr det (40 – 60%), er det sannsynlig at en student i hver gruppe har det riktige svaret. En diskusjon vil få fram flere synspunkter på spørsmålet. Det er imidlertid rimelig at den som har det riktige svaret vil argumentere overbevisende slik at flere vil helle mot det riktige svaret ved neste avstemning. Uansett vil spørsmålet bli belyst fra flere sider. Resultatet vil uansett bli en god pekepinn for hva læreren nå bør gjøre. Dersom de aller fleste svarer riktig kan læreren gå videre i undervisningen, dersom det fortsatt er en del misoppfatninger så må læreren ta tak i disse.

På et vis fungerer denne typen som en slags en-til-en undervisning for større grupper og tvinger fram en gruppediskusjon der elevene må presentere og forsvare sine standpunkt, en diskusjon som i seg selv kan være svært klargjørende.

Dersom kunnskapsnivået varierer mye, som det gjerne kan gjøre når nye tema introduseres, så kan det være problematisk å benytte en slik metode, men den kan være med å dempe den sterke spredningen i gruppen. Metoden er i første rekke utviklet for bruk på universitet, men med fornuftig valg av spørsmål burde metoden egne seg både i videregående skole og i ungdomsskolen.

I denne sammenhengen ønsker vi primært å skape diskusjon rundt bruken av konkreter som Olsen prøvde ut med sine elever.



3 Utforskning av kretser

I dette kapittelet skal vi se på hvordan vi kan utforske enkle elektriske kretser for bedre å forstå hvordan strømmen oppfører seg. Grunnlaget er å forstå at kretsen *må være sluttet* for at det skal gå strøm. Deretter at det er den samlede motstanden som bestemmer strømmen gjennom den sluttede kretsen, og når kretsen består av flere greiner så vil strømmen fordele seg i de ulike greinene i henhold motstandsverdien i den enkelte greina. Størrelsen på strømmene er igjen bestemt av spenningen over kretsen og verdien av motstandene i kretsen i henhold til *Ohms lov*:

$$\text{Strømmen i kretsen} = \frac{\text{Spenningen over motstanden i kretsen}}{\text{Verdien av motstanden i kretsen}}$$

I utforskningen av naturvitenskapen er vi avhengig av observasjoner. Ikke uvanlig ser vi ikke hva som skjer på mikronivå, men kun resultatene av disse mikroskopiske prosessene. Et eksempel er når vi slår på strømbryteren og det blir lys i lampen. Ved hjelp av måleinstrumenter (Ampere-meter (strømmåler), Volt-meter (spenningsmåler) o.l.), kan vi få innsyn i hva som skjer, vi kommer på en måte ett skritt nærmere årsakene til det vi kan observere. Men nesten uansett hvor dypt vi kan se inn i prosessene, så er det ofte fortsatt en eller flere underliggende prosesser som vi ikke er i stand til å observere eller forstå.

Vi lager oss derfor mentale forståelsesmodeller av de “usynlige” prosessene som kan hjelpe oss til å få en *kvalitativ* forståelse av hva som skjer. Slike forståelsesmodeller er viktige, men ofte vanskelig å lage slik at de stemmer helt med det vi kan observere. Dessuten egner de seg dårlig til å sette tallverdier på det som skjer i prosessen. Derfor suppleres ofte de kognitive forståelsesmodellene med *matematiske modeller* slik at vi også blir istand beregne størrelsen til parametere i prosessene. I vårt tilfelle *strømstyrkene* (i Ampere), *spenningsnivåene* (i Volt) og *motstandverdiene* (i Ohm) i kretsen. Ohm’s lov er nettopp en slik matematisk modell av hva som skjer inne i en elektrisk krets.

I den grad det er mulig ønsker vi at elevene skal få ta del i utforskningen av enkle elektriske kretser for å hjelpe dem til å danne mentale forståelsesmodeller. De *læremidlene* vi presenterer i det følgende, er lukkede “bokser” som elevene gjennom bruk av et måleinstrument (pære og batteri) kan utforske for å lage en beskrivelse av det som befinner seg inni boksen og som de ikke kan se. Vi håper at en slik oppgave stimulerer til utforskning og en forståelse av noe av naturvitenskapens egenart.

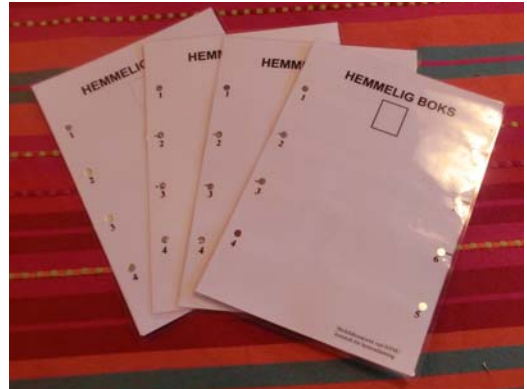
3.1 Lag en enkel hemmelig “boks” I ved hjelp av papp og sølvpapir

La oss begynne enkelt. Den første “boksen” som egentlig ikke er en boks, men en laminert plate, er et læremiddel elevene selv kan lage med enkle midler og utfordre hverandre på.

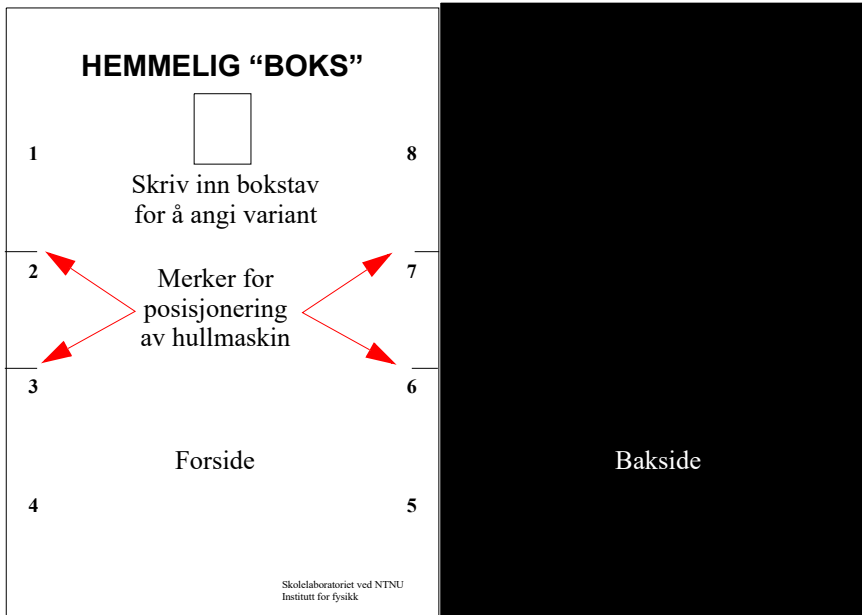
**Eksperiment: 4 Hemmelig "boks" I**

Til dette eksperimentet trengs, kartong, aluminiumsfolie, lamineringsplast (A5), blank tape, batteriholder, batterier, lyspære og ledninger. I tillegg trenges en lamineringsmaskin, hullmaskin, loddebolt og loddetinn, saks og avbiter.

Den hemmelig "boksen" eller plata skal ha 8 målepunkter. Mellom målepunktene går det ledninger av strimler laget av aluminiumsfolie. Disse forbinder målepunktene. Hvordan de er forbundet med hverandre er skjult mellom to ark.



1. Trykk opp malen på en A4 kartong 160 g (eller tykkere), denne angir for- og bakside av den hemmelige "boksen". Kopioriginal finnes i vedlegg B.1 på side 188.





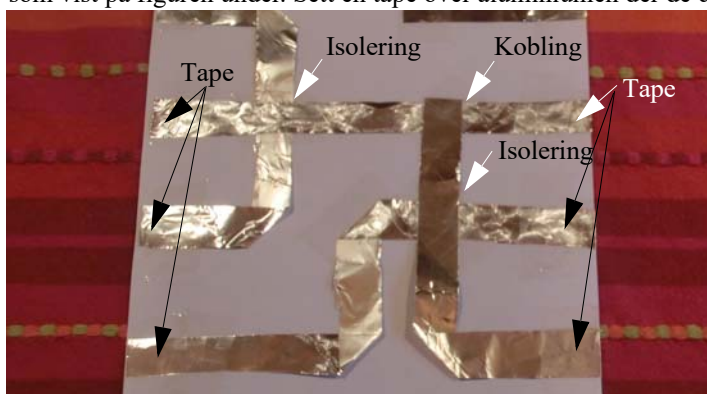
Firkanten under teksten *Hemmelig* "boks" kan brukes til å skriv inn en bokstav som angir hvilken variant av "boksen" dette dreier seg om. De fire strekene brukes til å posisjonere hullmaskinen riktig langs kantene



- Legg forsiden inn i en A5 lamineringslomme med den sveisede kanten opp og lag 8 hull, fire på hver side, posisjonert omkring de fire strekene langs kantene. Ta deretter forsiden ut av lamineringslommen. Du har nå fått plassert hullene for de åtte målepunktene riktig på forsiden og i lamineringsplasten. Baksiden skal ikke ha hull.
- Klipp strimler av aluminiumsfolie ca. 1 cm brede (bilde under til venstre). Disse limes til baksiden av forsiden slik at de dekker de aktuelle målehullene som vist til høyre på bildet under. Aluminiumstrimlene leder strøm og vil skape forbindelse mellom målepunktene. Fest strimlene med klar tape.

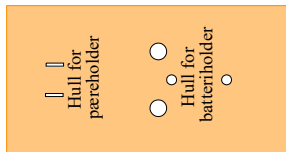
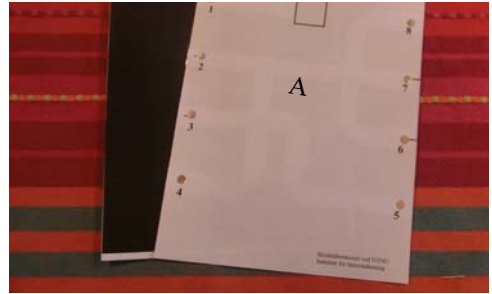


- Der du vil forbinde to strimler elektrisk med hverandre så legger du dem over hverandre og setter på en tape. Der du vil lage en isolert bru, legger du tape i mellom to kryssende aluminiumstrimler som vist på figuren under. Sett en tape over aluminiumen der de dekker et hull.

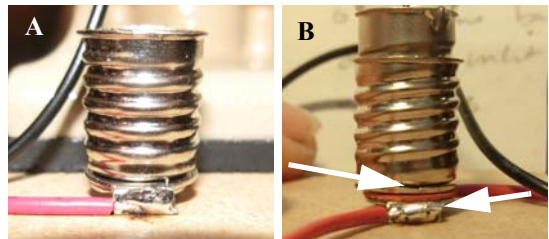




5. Dekk til aluminiumstripene med baksidekartongen og legg de to arkene inn i lamineringslommen. Påse at hullene i lamineringslomma faller over hullene med aluminiumsfolie. Det kan være lurt å la baksiden være svart eller legge inn en ekstra papp slik at det blir umulig å se banene ved å holde plata opp mot lyset.
6. Kjør lamineringslommen med kartongen og aluminiumstripene gjennom lamineringsmaskina med den sveisede sidekanten først. så er den hemmelige “boksen” ferdig. Merk den hemmelige “boksen” med en bokstav som vist på bildet over til høyre.
7. For å lage proben som vi skal bruke for å teste om det er forbindelse mellom målepunktene med, bruker vi en batteriholder (2 x AA) med ledninger og en lyspæreholder med lyspære som vi monterer på en papplate eller en MDF-plate, som er litt kraftigere.



Det er viktig å passe på når man lodder ledningene på pæreholderen slik at det ikke blir kortslutning. Det er viktig at de to delene av sokkelen merket med piler ikke forbindes (figuren til høyre, bilde B). Da oppstår en kortslutning og pæra vil ikke lyse.





8. Skru fast holderen med to maskinskruer (f.eks. M3x10mm eller kortere) og stikk beina til lyspæreholderen gjennom de to små hullene i plata og bøy dem på undersida.
9. Klipp av den sorte ledningen slik at stubben som står igjen, lett kan rekke bort til det ene beinet til lampe-sokkelen. Avisoler den korte ledningen med avmantlingstangen eller avbiteren. Dersom det er vanskelig å komme til, kan batteriholderen løsnes fra plata. Avisoler enden av resten av den svarte ledningen.
10. Lodd den korte sorte ledningen til den ene siden av lyspæresokkelen og resten av den svarte ledningen til den andre siden av pæresokkelen.

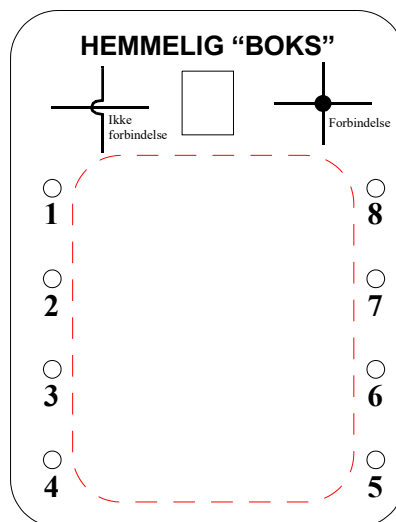


Dermed er det bare å sette i to AA-batterier og den hemmelige “boksen” er ferdig til bruk.

Det kan også være lurt å lage et ark der elevene kan tegne inn koblingsskjemaet sitt. På arket under er det også vist hvordan de skal tegne koblingsskjemaet på papiret når to forbindelser møtes og man vil markere at de har elektrisk forbindelse eller ikke har elektrisk forbindelse.

Se vedlegg B.1 på side 188 for kopioriginal.

La elevene selv lage koblingsskjemaet for “boksen” på forhånd for deretter å lage den med aluminiumstrimler i en hemmelig “boks”. Deretter kan ulike grupper i klasserommet utfordre hverandre.



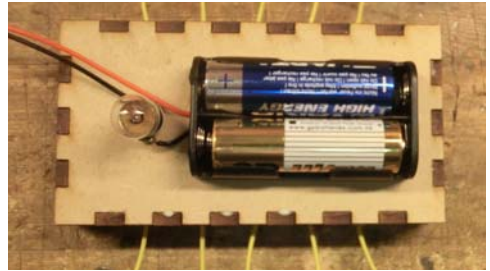
Den neste boksen er litt mer varig, men krever at man har tilgang til en laserkutter. Ev. kontakter ett av de ti regionale vitensenterne.



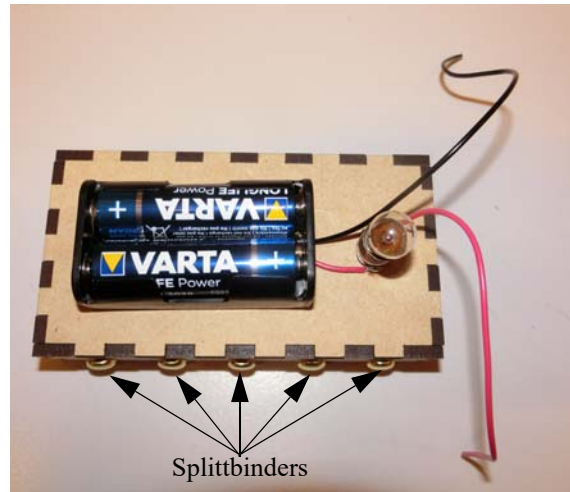
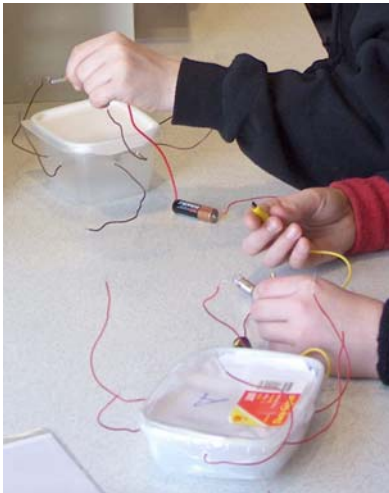
3.2 Lag en enkel laserkuttet hemmelig boks II

Eksperiment: 5 Hemmelig "boks" II

Til dette eksperimentet trengs en laserskåret boks, skruer og muttere, tynn ledning, maskerings- eller elektriskertape, batteriholder, batterier (2xAA) og lyspære, ev. et lite koblingsbrett. I tillegg trengs loddebolt og loddetinn, avmantlingstang og avbitter. Man kan også bruke en standard ugjennomsiktig plastboks som man borer hull i.



På bildet under til venstre ser vi to eksempler på hemmelige bokser laget av ugjennomsiktige plastbokser hvor ledningene stikker ut av hull i siden av boksene. Under til høyre ser vi en laserkuttet hemmelig boks.



Fra boksen kan det komme inntil 10 ledninger som er merket med tallene 1 til 10 (se bildet under). I lokket av boksen er det montert en batteriholder med lyspære som kan brukes som probe for å sjekke hvilke ledninger som er forbundet med hverandre.

Et alternativ til bruk av ledninger er splittbinders (figur over til høyre). Dette gir en enklere og ryddigere oppkobling, men det viser seg at elevene mister noe mht. å forstå at det handler om sammenkobling av ledninger.

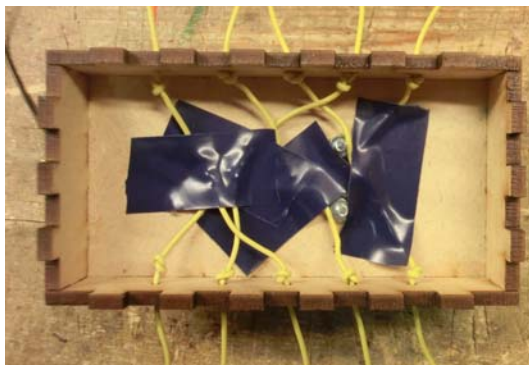


1. Har man designet boksen riktig er det unødvendig å bruke lim. Da skal det være nok å klemme de innfelte "fingrene" inn i hverandre så skal boksen henge sammen. Merk boksen med tall som vist på bildet til høyre. Ett tall for hver åpning i siden.
2. Lag koblingsskjema over hvordan du ønsker å koble sammen ledningene. Husk at mer enn to ledninger kan kobles sammen, i tillegg til at noen kan henge helt fritt uten forbindelse med noen andre.



Alternativ 1 – med ledninger

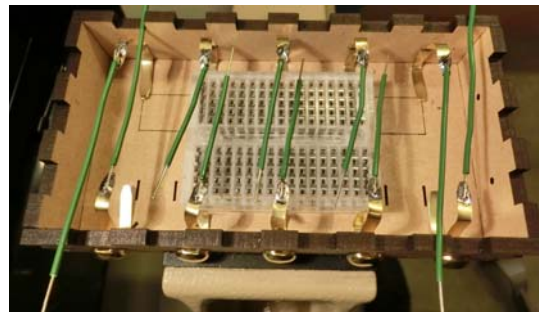
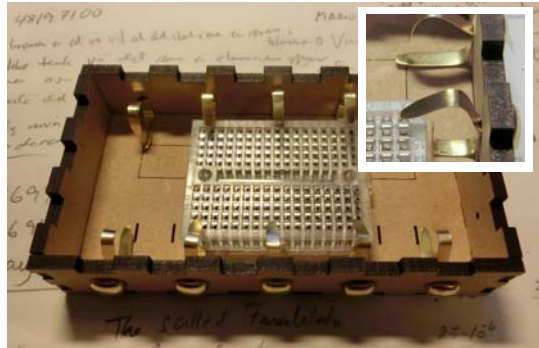
3. Kutt til det ønskede antall ledninger (inntil 10 stk.) hver på 15 cm. Avisoler ledningene (ca. 1 cm) i begge ender.
4. Knytt en knute på ledningene ca. 5 cm fra den ene enden og stikk den lange enden ut gjennom hullene fra innsiden.
5. Tvinn de aktuelle ledningene sammen og lodd. Bruk tape til å feste ledningene i bunnen av plata, eller isoler endene slik at de ikke berører hverandre og det oppstår uønskede eller ustabile forbindelser.
6. Pass på at ledningene ikke er så stramme, eller løse, at det er mulig å bestemme hvilke ledninger som er sammenkoblet ved å dra eller dytte i dem. Om *det* er tilfelle, må de gjøres slakkere og festes bedre. Sørg for å forsinne de avisolerte endene til ledningene som stikker ut av boksen.
7. Alternativt kan en bruk mini koblingsbrett og stikke ledningene ned i for sammenkobling. Det er da spesielt viktig at det knytes en knute på ledningen på innsiden av boksen. Det er også viktig å bruke en-tråd ledninger da disse er lettere å stikke ned i hullene i koblingsbrettet.





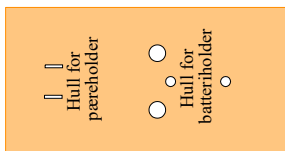
Alternativ 2 – med splittbinders og koblingsbrett

3. Ta av dekkpapiret på limflaten og monter koblingsbrettet i bunnen av boksen. Dette vil gjøre det mulig raskt å endre oppkoblingen av boksen.
4. Stikk inntil ti splittbinders inn gjennom spaltene i sidene på boksen. Bruk et flatt skrujern til å presse den underste delen av bindersen ned i hjørnekanten til boksen slik at bindersen sitter godt. Den øverste delen kan peke rett ut fra veggen i boksen.
5. Bruk entråd leder ikke tykkere enn 0,6 mm og klipp til fire ledning på 6 cm og fire ledninger på 4 cm. Avisoler endene til ledningene og lodd dem til splittbindersene som vist på bildet til høyre.
6. Bruk koblingsbrettet til å forbinde ledningene etter koblingskjemaet.

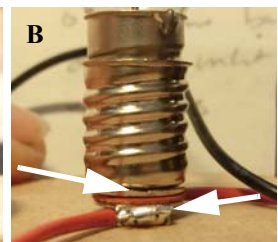
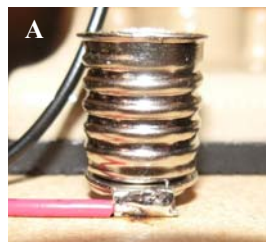


Lag proben

7. For å lage proben som vi skal bruke for å teste om det er forbindelse mellom målepunktene, bruker vi en batteriholder (2 x AA) med ledninger og en lyspæreholder med lyspære som vi monterer på toppen av boksen



Det er viktig å passe på når man lodder ledningene på pæreholderen at det ikke blir kortslutning. De to delene av sokkelen merket med piler *må* ikke forbindes (figuren til høyre, bilde B). Da oppstår en kortslutning og pæra vil ikke lyse.





Elektrisitetstlære

8. Skru fast holderen med to maskinskruer (f.eks. M3 x 10 eller kortere). Stikk beina til lyspæreholderen gjennom de to små spaltene i plata og bøy dem på innsida av boksen.

9. Klipp av den sorte (eller røde) ledningen slik at stubben som står igjen lett kan rekke bort til det ene beinet til lampesokkelen. Avisoler den korte ledningen med avmantlingstanga eller avbiteren. Dersom det er vanskelig å komme til, kan batteriholderen løsnes fra boksen.

Avisoler enden av den avkappede delen av den svarte ledningen.

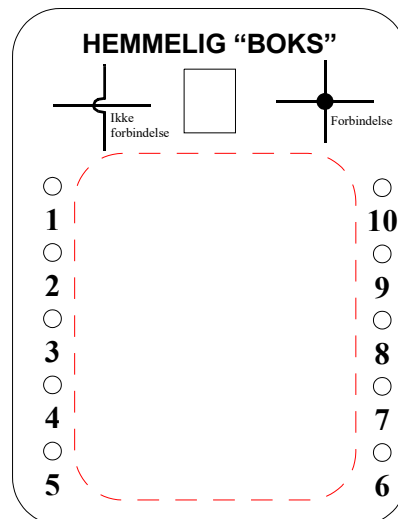
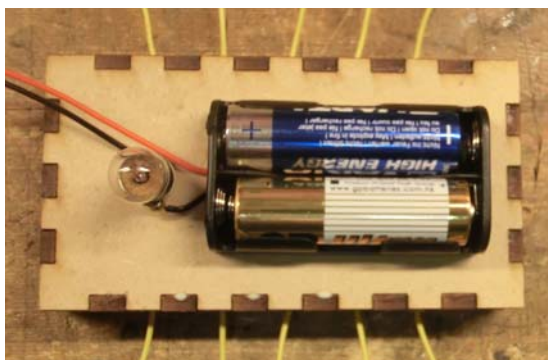
10. Lodd den korte sorte (eller røde) ledningen til den ene siden av lyspæra og resten av den svarte (eller røde) ledningen til den andre siden av sokkelen.

Dermed er det bare å sette i to AA-batterier og den hemmelige boksen er ferdig til bruk.

Det kan også være lurt å lage et ark hvor elevene kan tegne inn sitt forslag til koblingsskjema. Arket til høyre viser hvordan de skal illustrere når to forbindelser møtes på papiret og man vil markere at de *har elektrisk forbindelse* eller *ikke har elektrisk forbindelse*.

Se vedlegg B.2.2 på side 191 for kopioriginal

Elever i ungdomsskolen kan selv konstruere og koble opp slike bokser og utfordre hverandre med å bestemme koblingsskjemaet.



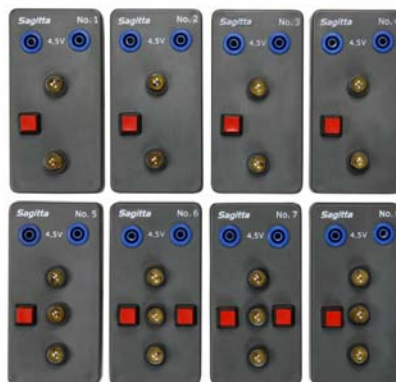
3.3 Lag en avansert laserkuttet hemmelig boks III

Den neste boksen er litt mer avansert og passer kanskje best for elever i ungdomsskolen. Den krever også at man har tilgang til en laserkutter, ev. kontakter ett av de ti regionale vitensenterne.



Læremiddelfirmaet Sagitta¹⁴ selger en serie med 8 slike bokser som er nummerert fra 1 til 8 med økende vanskelighetsgrad. For å komme igang med å utforske boksene, kobler man til et 4,5V batteri med laboratorieleddninger. Derne kan man studere hva som skjer med lyset i lyspærene når man trykker ned en eller flere brytere. I tillegg kan man kontrollere hypotesene sine ved å skru ut og inn lyspærene og se hva som skjer med lysstyrken hos de andre.

Det finnes et lignende sett av hemmelige bokser som er utstyrt med elektroniske komponenter som lysdioder, transistorer, LDR, motstander og brytere¹⁵. Disse boksene kan enten tilsluttes likespenning eller vekselspanning (10 – 15 V).



3.3.1 Framstilling av en avansert hemmelig boks

Eksperiment: 6 Hemmelig “boks” III – Avansert

Til dette eksperimentet trengs en laserskåret boks, skruer og muttere, ledning, batteriholder, batteri (4,5 V), to binders, trykkbrytere, lyspæreholdere og lyspærer. I tillegg trengs loddebolt og loddetinn, avmantlingstang¹⁶ og avbiter.

Disse hemmelige boksene er av en helt annen type og langt mer krevende enn de vi har beskrevet så langt. Dvs. denne typen hemmelige bokser kan differensieres fra de helt enkle til det meget kompliserte.



Denne boksen består av inntil tre lyspærer og tre trykkbrytere, brytere som slutter en krets når de trykkes inn. En kan selv velge antall pærer og brytere og hvordan de skal kobles sammen. Et 4,5 V batteri kobles til boksen for å gi strøm til kretsen.

Å komponere et koblingsskjema som gir en passende utfordring for elever på et visst kunnskapsnivå kan være vanskelig. Det kan derfor være lurt å lage en serie bokser med økende vanskelighetsgrad.

14. <https://www.sagitta.se/artikel.php?kid=101-116&sok=&id=2884&sort=#.Wdkxarpulhc>

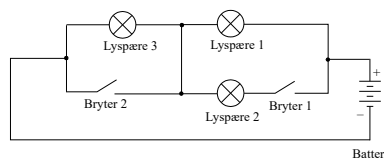
15. <https://www.sagitta.se/artikel.php?kid=101-116&sok=&id=2885&sort=#.Wdkyypulhc>

16. En avmantlingstang er et verktøy for å ta av isolasjonen på ledninger.

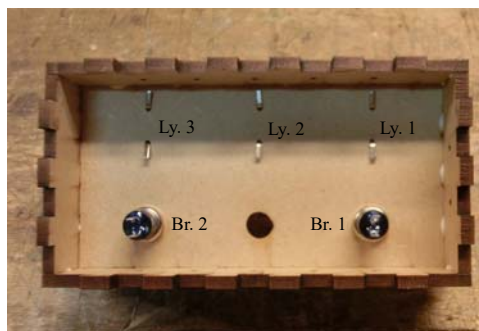


La oss se hvordan vi kan lage slike hemmelige bokser.

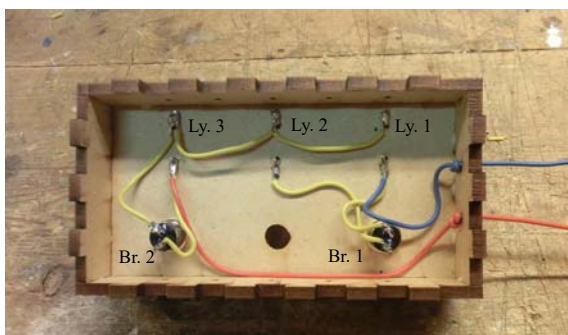
1. Begynn med å tegne koblingsskjema. Ta hensyn til hvilken vanskelighetsgrad boksen skal ha. Husk at det som kan synes enkelt når en tegner skjemaet, kan oppfattes som svært komplisert når man skal finne ut av det.



2. Monter lyspæresoklene og bryterne. Bøy loddespydene til soklene på baksida av topp-plata og fest bryterne¹⁷ med en mutter på oversida.



3. Ta utgangspunkt i topplokket til boksen og monter de fire sideveggene. Er boksen rett dimensjonert skal det ikke være nødvendig å bruke lim for å holde boksen sammen.
4. Avisoler endene og koble opp ledningene i henhold til koblingsskjemaet ved hjelp av loddebolt.



17. Bryteren i dette eksemplet er en bryter som er i salg hos Clas Ohlson og er dermed lett tilgjengelig men dyr.

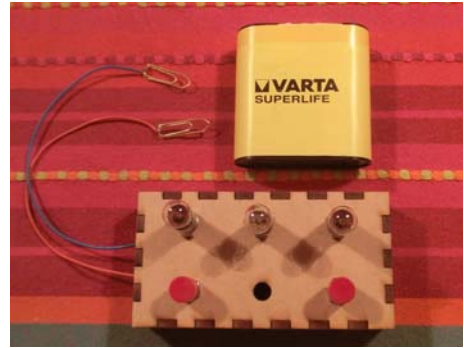


5. Til slutt loddes to binders til de to ledningene som stikker ut av boksen. Disse kobles til de to polene på et 4,5V batteri.

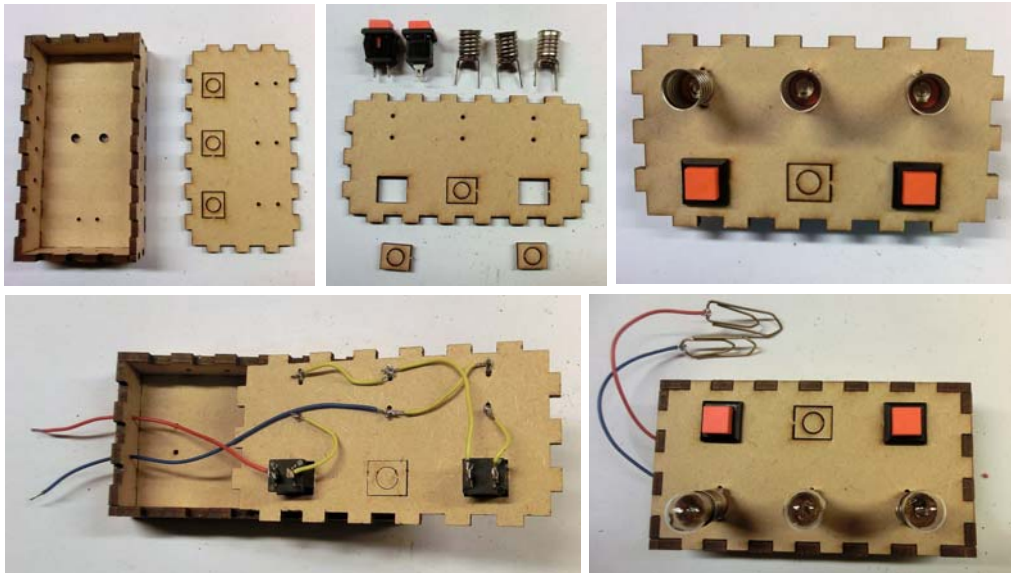
Den hemmelige boksen er nå klar for bruk.

Siden bryterne i denne varianten er lett tilgjengelig, men relativt dyre, så har vi også laget en billigere variant med brytere innkjøpt fra ELFA.

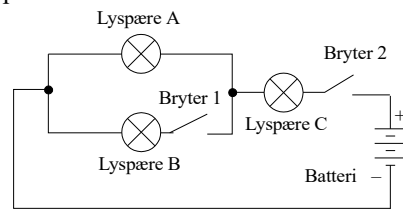
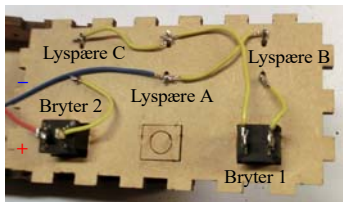
Siden framstillingen er svært lik den som er omtalt foran, så gjentar vi ikke beskrivelsen, men viser resultatet.



Bildene under viser en alternativ utgave av den hemmelige boksen.



Koblingsskjemaet for denne boksen er vist i figuren under til høyre. Oppkoblingen er vist til venstre, bildet viser undersiden av topplata.

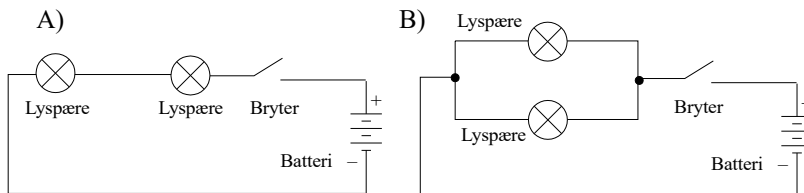


Bryteren som er benyttet er en enpolt trykkebryter (ELFA 135-03-765). Komplette komponentliste finne i vedlegg B.2.3 på side 192.



3.3.2 Bruk av den avanserte boksen

Selv om vårt eksempel beskriver en svært krevende boks, så kan vi begynne mye enklere. I koblingsskjemaet under er vist to enkle koblinger, en seriekobling av to pærer og en parallellkobling av to pærer, begge med en bryter

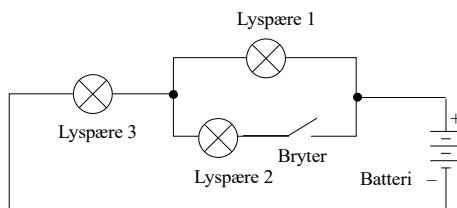


La oss tenke oss at vi har en boks med to lyspærer og en bryter. Hvordan skal man avgjøre hvilken av disse koblingene som er den riktige. Begge lyspærene tenner når bryteren trykkes inn.

Det finnes to løsninger på denne utfordringen:

- En seriekobling (A) vil redusere strømmen i pærene slik at lysstyrken reduseres. Det er imidlertid vanskelig å bedømme lysstyrken dersom man ikke kan sammenligne med en lyspære som ikke er seriekoblet.
- En kan trykke ned bryteren og så skru ut den ene pæra. Dette vil løse problemet.

Her er en annen oppgave:



Forsøk å tenk igjennom hva som skjer med lyset i de tre lyspærene når bryteren trykkes inn, ev. en eller flere av pærene skrur ut:

- Hvilke lyspærer lyser og hvordan er den forholdsmessige lysstyrken når batteriet kobles til?
- Hva skjer med lyset i lyspærene når man trykker på bryteren?
- Hva skjer med lyset i de tre lyspærene når en og en av de tre pærene skrur ut og bryteren ikke er trykket inn?
- Hva skjer med lyset i de tre lyspærene når en og en av de tre pærene skrur ut og bryteren er trykket inn?
- Er det mulig å skru ut to av pærene, slik at den siste fortsatt lyser når bryteren er trykket inn?

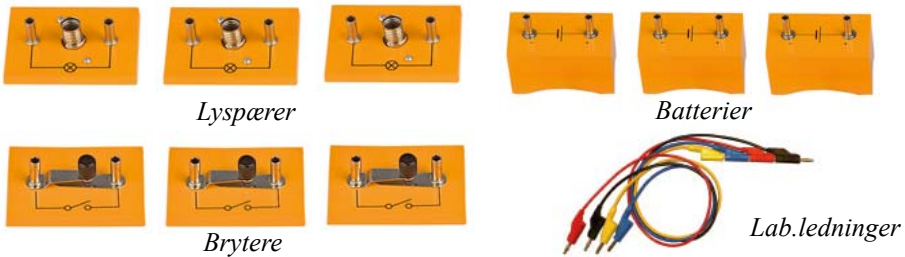
Det kan være lurt å gjennomgå slike spørsmål for hver oppgave man lager.



Uttesting med bruk av konkreter

Det er flere måter å bruke hemmelig boks III på:

- *Man kan gi elevene en rekke alternative kretsløsninger og be dem velge og argumentere for den løsningen de mener er den riktige. Om flere grupper arbeider med den samme boksen, men oppnår forskjellig svar, så kan man la dem argumentere for hver sin løsning og se hvem som til slutt får gjennomslag for sitt forslag.*
- *En mer abstrakt arbeidsmetode er at elevene tegner skjema etter som de arbeider med kretsen, helt til de kommer fram til et forslag de vil gå for. La dem så argumentere for hvorfor den løsningen de har valgt er den riktige.*
- *Som en forlengelse av metoden foran så kan de få utlevert lyspærer i holdere, brytere, lab.ledninger og et batteri, for så å prøve ut den løsningen de har foreslått, dermed kan de kontrollere og ev. korrigere seg selv.*



Denne siste metoden synes å være den mest konstruktive da de selv kan etterprøve forslaget sitt til løsning, for ev. å gjøre endringer om de ser at oppkoblingen ikke reagerer på samme måte som den hemmelige boksen.

Her kan man også benytte Snap Circuit eller lignende for uttesting.



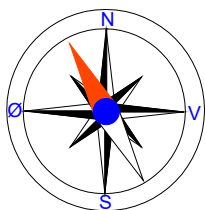
4 Magnetisme¹⁸

Helt fra forhistorisk tid har menneskene visst at klumper av en viss type stein kan tiltrekke eller frastøte hverandre, avhengig av hvilken vei de holdes. Denne steinsorten kalte man *magnetstein*, eller *magnetitt* (Fe_3O_4). Det er jernoksidet i steinen som gjør den naturlig magnetisk [13]b.¹⁹

De gamle grekerne kjente godt til magnetsteinen. Magnetene har fått sitt navn fra den gamle oldtidsbyen Magnesia, der man fant slike steiner. Greske legender forteller om magnetiske klipper som trakk naglene ut av skipene som passerte, og som naglet gjeternes føtter til bakken på grunn av jernstiftene i skoene deres.



4.1 Jordmagnetisme og kompasset



Alle magneter har to poler, en “nordpol” og en “sørpol”. Også jorda selv er en kjempestor magnet med to poler, som påvirker alle andre magneter til å peke i samme retning hvis de får svinge fritt. Vi kan observere at *to like poler frastøter hverandre, mens to ulike poler tiltrekker hverandre*. Dette er lett å se hvis vi har to magneter som vi kan snu og vende i forhold til hverandre.

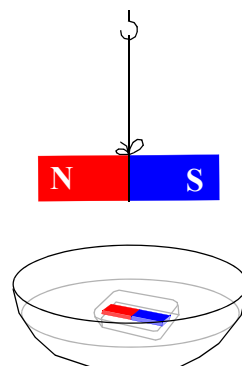
Kompasset er egentlig ei magnetisk nål som svinger fritt. Derfor vil “nord” på magnetnåla alltid peke mot jordas magnetiske nordpol (som egentlig er en sørpol), fordi den tiltrekkes av jordas egen magnetisme. Kompasset er viktig for å finne retningen til sjøs, på fjellet og ellers i terrenget.

Ekspériment: 7 Lag et enkelt kompass

Til dette eksperimentet trengs en magnet, en liten plasteske, en bolle med vann og en tynn tråd.

Fest magneten til en krok i taket ved hjelp av en tynn tråd. En vil da oppdage at den retter seg inn i en spesiell retning. Dersom vi henger den opp et annet sted, vil den etter kort tid rette seg inn i samme retning.

Det samme kan oppnås ved å legge magneten i en liten eske som flyter på vannet i en bolle. Magnetten retter seg inn i en bestemt retning. Skal eksperimentet lykkes, bør en unngå at esken legger seg inntil kanten av bollen.

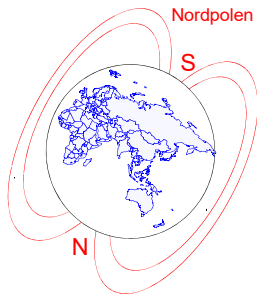


18. Dette kapittelet er hentet fra *Fysikkeksperimenter - for bruk i skolen*, (Rossing, 2008)

19. Bildet magnetittmalm er tatt av Kåre Kullerud, Universitetet i Tromsø. Prøven er hentet fra gruva ved Bjørnevatten i Finnmark: <http://www.ig.uit.no/geostudiesamling/magnetitt.htm>. Bildet er gjengitt med tillatelse fra fotograf.



Årsaken til dette fenomenet er at den opphengte magneten vil rette seg inn etter jordmagnetismen. Siden like poler frastøter hverandre og ulike tiltrekker hverandre, kan vi slå fast at nordpolen på magneten retter seg mot jordas “nord”-pol, som dermed egentlig er en sørpol.

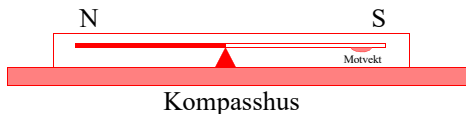


Ved å studere den størknede lavaen nær den midtatlantiske rygg, har en funnet ut at jordas magnetiske poler har endret retning med 100 000–200 000 års mellomrom. Siden Amerika og Europa gjennom millioner av år har drevet fra hverandre, har det stadig strømmet ut flytende lava langs den midtatlantiske ryggen. En har dessuten oppdaget at lavaen nær ryggen er magnetisk, slik vi vil forvente ut fra dagens nord- og sørpol. Undersøker en magnetismen i lavaen som ligger lenger borte fra den aktive sonen, ser en imidlertid at lavaen er magnetisert i motsatt retning. En antar at dette skyldes at jordmagnetismen har skiftet retning opp gjennom tidene.

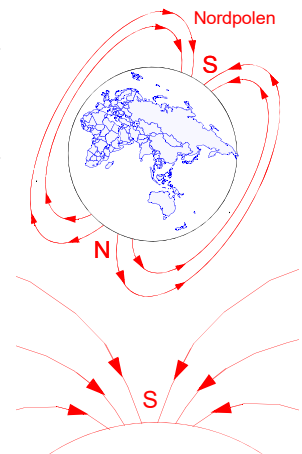
Magneter trekker kun til seg *magnetisk materiale*. Jern og nikkel er eksempler på slike materialer. I det neste eksperimentet skal vi bruke denne egenskapen til å bestemme hvilken magnet som er sterkest.

Et vanlig kompass består av en liten magnetnål med en nord- og en sørpol. Nåla balanserer i et hus med sprit og vil stille seg inn etter jordas magnetfelt på stedet.

Siden magnetfeltet nær polene ikke er parallelt med jordoverflata, men peker bratt ned mot jorda, vil magnetnåla i kompasset ha en tendens til å peke nedover. Dette vil hindre nåla i å rotere. Det er derfor vanlig at en henger en liten motvekt på den andre enden av nåla, slik at en kompensere for tendensen til å bikke framover.



Så kan en gruble over hva en gjør med kompassene på den sørlige halvkule. På hvilken side skal motvekta monteres der?





Ekspiriment: 8 Det magnetiske kjøleskapet

Jordmagnetismen har dessuten en evne til å gjøre gjenstander av jern (eller nikkell) magnetiske. Dette kan for eksempel observeres i kjøleskap, som gjerne er laget av et magnetisk materiale. Når kjøleskapet har stått lenge nok i magnetfeltet fra jorda, så blir det selv magnetisk. Et kjøleskap på den nordlige halvkule vil ha sin nordpol nederst og sin sørpol øverst. På den sørlige halvkule er det motsatt, samtidig som effekten blir sterkere jo nærmere en kommer de magnetiske polene. Effekten kan lett observeres ved å holde et kompass nær toppen og bunnen av kjøleskapet.

Lignende effekter kan observeres på andre gjenstander, for eksempel laboratoriestativer av jern. Dersom en slår på et slikt stativ, skal en ikke bli overrasket om magnetismen forsvinner eller reorganiseres slik at polene bytter plass.



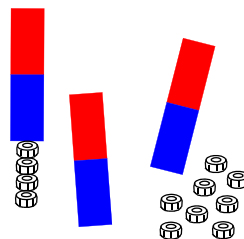
4.2 Styrken til magneter

Ekspiriment: 9 Magnetisk styrke I

Magneter kan ha forskjellig styrke. I dette eksperimentet skal vi på en enkel måte finne ut hvilken magnet som er sterkst.

Legg fram tre ulike magneter av forskjellig styrke, i tillegg til mange muttere. Utfordre elevene til å bestemme hvilken magnet som er sterkst, nest sterkst og svakest.

For at mutterne skal bli et mål på magnetenes styrke, må de henges under hverandre.



Det finnes i hovedsak fire typer magneter:

- *Neodymmagneter* (NdFeB eller NIB), $T_{curie} = 310 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- *Samarium Cobolt* (SmCo), $T_{curie} = 750 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- *Alinico* (aluminium, nikkell, cobolt), $T_{curie} = 860 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- *Keramiske eller Ferritmagneter*, $T_{curie} = 460 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Neodym og Samarium Cobolt ble utviklet i 1970–80-åra og er 5–8 ganger sterkere enn tidligere utviklede magneter. Alinico ble utviklet i 1940-åra.



Ved sterk oppvarming vil magneter slutte å være magnetiske. T_{curie} forteller ved hvilken temperatur magneten *avmagnetiseres*. Denne temperaturen kalles magnetens *Curie-punkt* eller *Curie-temperatur* etter den franske fysikeren **Pierre Curie** (1859–1906), som først undersøkte fenomenet.

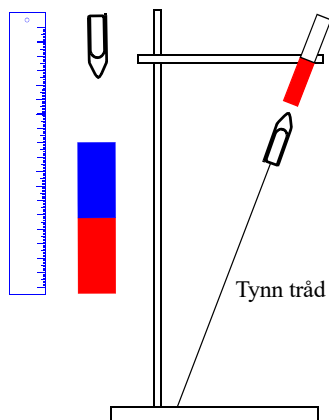
Her er et par alternative måter å undersøke styrken til magneter på.

Eksperiment: 10 Magnetisk styrke II

Til dette eksperimentet trengs magneter med ulik styrke, binders og et stativ for å holde en magnet.

Undersøk hvor nær bindersens må være magneten for at den skal trekke til seg bindersens. Jo større avstand, jo sterkere magnetisk felt.

Dersom en monterer magneten i et stativ, kan en få en binders som er festet i en tråd til å sveve under magneten. Jo større vi kan gjøre gapet mellom magneten og bindersens uten at bindersens faller ned, jo sterkere er magnetfeltet nær magneten.



En kan også undersøke hvilke materialer som er “gjennomsiktig” for magnetisme. Alle gjenstander som gjør at bindersens faller når de føres inn i gapet mellom magneten og bindersens, lar seg magnetisere.

Eksperiment: 11 Stoffer som er “gjennomsiktig” for magnetisk felt

Til dette eksperimentet trengs papir, plast, aluminiumfolie, andre metaller, en saks og andre gjenstander som kan stikkes mellom magneten og bindersens i forsøket foran.

Stikk ulike gjenstander mellom bindersens og magneten og undersøk hvilke stoffer som gjør at bindersens faller ned.

For moro skyld kan en late som at en “klipper av feltlinjene” ved hjelp av en saks, da faller nemlig bindersens ned. Det som skjer, er at de magnetiske feltlinjene går i saksen og dermed ikke når fram til bindersens, som dermed faller ned.

La oss se på et lite eksperiment som gjør at vi kan skille permanente magneter og et stykke metall som bare lar seg magnetisere.



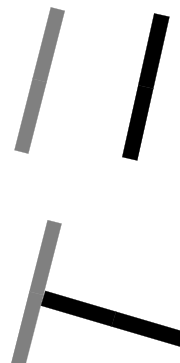
Ekspériment: 12 Hvilken stav er en permanent magnet?

La oss tenke oss at vi har to staver, en svart og en grå. Vi vet at den ene er en permanent magnet, den andre ikke. Hvordan skal vi gå fram for å bestemme hvilken stav som er en permanent magnet, og hvilken som bare er laget av et materiale som kan gjøres magnetisk?

Problemet kan løses på følgende måte. Vi tar den svarte staven og holder den bort til midten av den grå. Dersom den fester seg godt, vet vi at den svarte er en permanent magnet, og dersom den ikke fester seg, vet vi at den grå er den permanente magneten.

Årsaken er at i en permanent stavmagnet vil feltlinjene midt på staven befinne seg inne i staven. Den magnetiske kraften vil derfor være liten på midten.

Det er en nær sammenheng mellom elektrisitet og magnetisme. Den rådende forklaringen på permanent magnetisme er at den består av en rekke små atomære magneter som stiller seg inn i samme retning og dermed forsterker hverandre. At atomer er magnetiske, skyldes elektronenes spinn. All magnetisme kan derfor føres tilbake til ladning i bevegelse. Se avsnitt 7.1 på side 113.

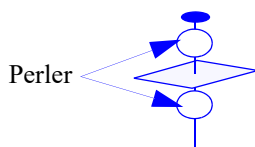
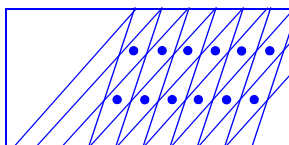


4.3 Magnetiske feltlinjer

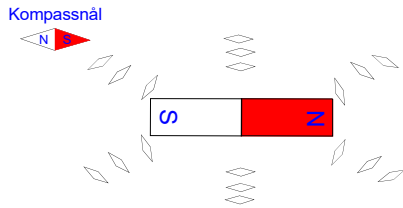
Ekspériment: 13 Magnetiske feltlinjer

Til dette eksperimentet trengs en hermetikkboks, små nåler, perler, saks, syl, boremaskin, 1 mm bor, treplate og pleksiglass.

Klipp opp hermetikkboksen og brett blikkplata ut som et rektangel. Trekk skrå streker på plata med en syl, som vist øverst på figuren til høyre. Merk av for hullene



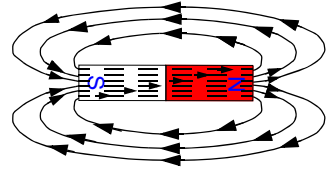
og bor før du klipper de små kompassnålene fra hverandre. Klipp ut de små nålene og fest dem med innbyrdes lik avstand på ei treplate ved hjelp av små stifter eller messingnåler. Legg en perle på over- og undersiden av kompassnåla slik at den roterer lett. Legg ei plate av akryl på avstandstykker over kompassnålene. Pass på at plata går fri fra nålene. Legg magneten på akrylplata og se hva som skjer med kompassnålene.



Om vi legger ei lita kompassnål i nærheten av en magnet, vil vi se at den legger seg i en bestemt retning. Flytter vi kompassnåla rundt til forskjellige steder, vil vi se at den endrer retning.

Kompassnålene er små magneter som påvirkes av de magnetiske kreftene fra den store magneten. Retningen til magnetnålene viser hvilken vei kraften peker.

Vi kan tegne piler og linjer som viser retningen til denne kraften på forskjellige steder i nærheten av magneten. Linjene er et "bilde" på det *magnetiske kraftfeltet* rundt magneten.





DEL II

Elektriske energiomvandelere:

Fra mekanisk bevægelse til elektrisitet (generatoren)

Fra elektrisitet til mekanisk bevægelse (motoren)

-

Fra elektrisitet til lys (LED)

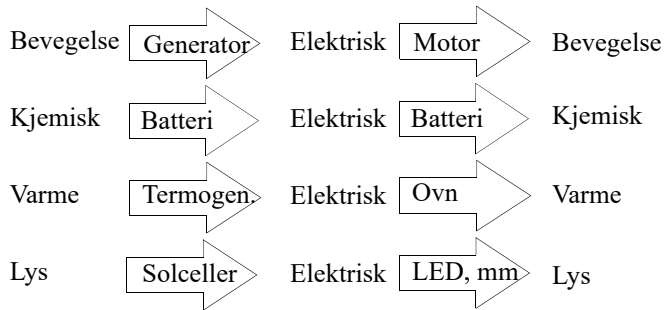
Fra lys til elektrisitet (solceller)





5 Elektriske energiomvandlere - en introduksjon

Elektrisitet er i seg selv ingen *energi-kilde*, men en *energibærer*. I dette avsnittet skal vi se nærmere på elektriske energiomvandlere. De mest vanlige er batterier som omdanner kjemisk energi til elektrisitet, og generatorene som omdanner bevegelsesenergi til



Figur 5.1 Fire omvandlere brukt til å framstille elektrisk energi

Figur 5.1 Fire omvandlere brukt til å framstille ulike former for energi fra elektrisk energi

elektrisk energi. I tillegg kan vi nevne solceller som omdanner lys til elektrisk energi og termogeneratoren som omdanner varme til elektrisk energi. En variant av den kjemiske omvandleren er *brenselcellen* som ved å opprette binding mellom to gasser (f.eks. hydrogen og oksygen) skaper en strøm i en elektrisk krets og på den måten kan avgi energi.

Generatoren er i en særstilling både fordi den er meget effektiv og fordi den leverer *vekselspenning*, mens de andre leverer *likespenning*. Generatoren er derfor den som er desidert mest anvendt.

En likespenning har en konstant verdi over tid, mens en vekselspanning skifter retningen, gjerne mange ganger i sekundet.

Energiovandling kan også skje den andre veien, dvs. fra elektrisitet til for eksempel mekanisk-, kjemisk- og elektromagnetisk energi (lys og varme)

5.1 Noen fellestrekk ved energiomvandlere

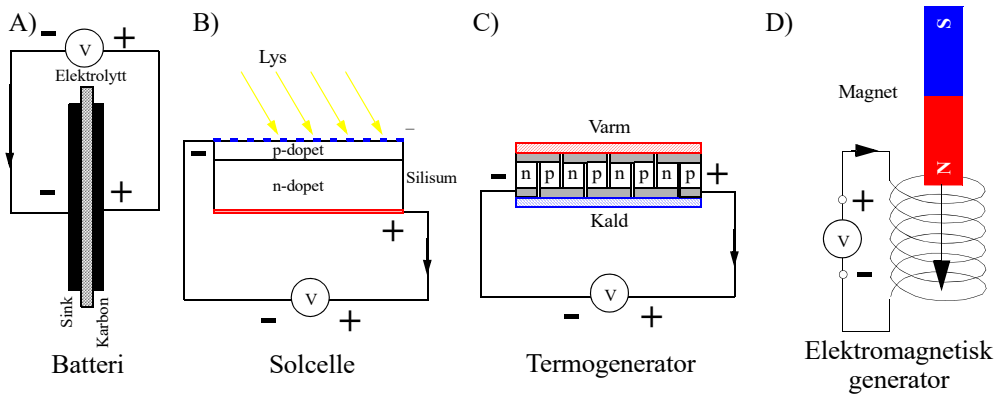
Forskjellige stoffer har ulik evne til å oppta eller avgi ladninger, i dette tilfellet elektroner. Oksygen er et stoff som har stor affinitet til elektroner, mens natrium lett gir fra seg elektroner. Når et stoff tar elektroner fra et annet stoff, sier vi at stoffet blir *reduisert*, mens det stoffet som mister elektroner blir *oksidert*. Graden av affinitet til elektroner betegnes ved stoffets *elektronegativitet*.

H 2.20	Electronegativity Values for Some Elements					
Li 0.98	Be 1.57	B 2.04	C 2.55	N 3.04	O 3.44	F 3.98
Na 0.90	Mg 1.31	Al 1.61	Si 1.90	P 2.19	S 2.58	Cl 3.16
K 0.82	Ca 1.00	Ga 1.81	Ge 2.01	As 2.18	Se 2.55	Br 2.96

Figur 5.2 Noen grunnstoffers elektronegativitet



Figur 5.2 viser noen grunnstoffer i det periodiske system og deres elektronegativitet²⁰. Jo større tallet er, jo større er deres affinitet til elektroner. Stoffers elektronegativitet er også viktig når det gjelder å danne bindinger mellom ulike stoffer.



Figur 5.3 Prinsippskisser for batteri, solceller, termogenerator og elektromagnetisk generator

I **batteriet** på figur 5.3 A) er det sinken og elektrolytten som vekselvirker slik at det oppstår en forskyvning av ladning. Etter en stund oppstår det en balanse bestemt av stoffenes evne til å avgi og oppta elektroner. Karbonet fungerer i denne sammenhengen kun som en passiv elektrode. Når sink og karbonelektroden forbindes gjennom en sluttet krets, begynner det å flyte en strøm i kretsen, dvs. at sinkelektroden tappes for elektroner. Dermed blir ladningsbalansen mellom sink og elektrolytten forskyvet slik at netto utvekslingen av elektroner mellom de to skyter fart og strømmen i kretsen kan opprettholdes.

Solceller er ofte laget av silisium som er svakt forurenset av f.eks. bor og fosfor. Silisium har 4 elektroner i valensskallet og danner krystaller med elektronbinding hvor silisiumatomene danner gitterstrukturer hvor atomene deler på elektronene slik at de tilsammen får åtte elektroner i valensskallet. Bor har derimot bare tre elektroner i valensskallet slik at silisium som er tilsatt bor får ledige elektronplasser i gitteret, såkalte “hull”. Vi sier at silisium forurenset med bor er *p-dopet*. Fosfor har derimot 5 elektroner i valensskallet. Silisium som er forurenset med fosfor vil derfor få elektroner som ikke “passer” inn i gitteret og som lett kan opptre som frie ladningsbærere. Silisium forurenset med fosfor kalles derfor *n-dopet*. Både n- og p-dopet silisium er svakt elektrisk ledende (halvledende) og elektrisk nøytrale.

Når n-dopet og p-dopet silisium settes inntil hverandre, vil det i ett tynt sjikt mellom de to skje en utveksling av elektroner fra det n-dopede området til det p-dopede området på grunn av stoffenes ulike elektronegativitet. På grunn av forskyvningen av elektroner mellom de to områdene oppstår det en potensialforskjell (eller potensialbarriere) i overgangen mellom områdene, som er bestemt av stoffenes elektronegativitet.

20. I denne sammenheng benyttes Linus Paulings elektronegativitetsskala som går fra 0,7 for francium til 3,98 for fluor. Hydrogen har en elektronegativitet på 2,20, mens oksygen har 3,44.



Når det p-dopede området belyses vil elektroner i overgangen mellom de to områdene tilføres energi slik at elektroner sparkes over potensialbarrieren og blir liggende på overflaten av solcellen hvor de kan fanges opp av metallgitteret som blir negativt ladet. Baksiden av solcella er dekket av metall som på tilsvarende måte blir positivt ladd.

Når for- og bakside kobles sammen vil det flyte en strøm som kan anvendes til et nyttig formål.

Termogeneratoren er bygget opp av en rekke små p- og n-dopet halvlederelementer som omtalt foran. Som nevnt har det p-dopede materialet ledige elektronplasser i gitteret, såkalte “hull”, mens det n-dopede materialet har elektroner “til overs” som kan flyte fritt i materialet. De ulike p- og n-elementene er seriekoblet ved hjelp av metallektroder på over- og undersiden. På toppen og i bunnen av alle elementene ligger elektrisk isolerende plater som kan lede varme. Ved temperaturforskjell mellom topp- og bunnplaten vil det bli en ladningsforskyvning i hvert av halvlederelementene slik at det oppstår en liten potensialforskjell mellom elektrodene på hvert element. Disse seriekobles slik at de danner en passende potensialforskjell mellom de ytre elektrodene. Er temperaturforskjellen tilstrekkelig stor, vil det flyte en strøm i en ytre krets.

I den **elektromagnetiske generatoren** er det et varierende magnetfelt som forårsaker potensialforskjellene. Dersom en elektrisk ladning beveger seg inn i et konstant magnetfelt, vil ladningen avbøyes. Tilsvarende vil det skje en ladningsforflytning i en elektrisk leder som er i ro, når den utsettes for et varierende magnetfelt. Slik vil det oppstå en liten potensialforskjell eller spenning i lederen. Dersom lederen legges i en sløyfe omkring magneten, vil ladningsforskyvningen skje langs hele sløyfen. Tilsvarende kan vi legge flere sløyfer rundt magneten, og det vil genereres en spenning i hver av sløyfene. Dersom alle sløyfene seriekobles vil spenningene fra hver sløyfe adderes, slik at den resulterende spenningen blir proporsjonal med antall sløyfer. Flere seriekoblede sløyfer kalles en *spole*.

Som det framgår av denne beskrivelsen av ulike strømgeneratorer, er det snakk om en forskyvning av ladning. For at denne ladningsforskyvningen skal bli en kontinuerlig prosess må det tilføres energi, enten ved at det avgis energi ved at elektriske bindinger opprettes, eller ved at det tilføres energi i form av lys eller varme, eller magneter i bevegelse.





6 Fra mekanisk til elektrisk energi

I dette kapittelet skal vi undersøke hvordan mekanisk energi kan omdannes til elektrisk energi.

6.1 Mekanisk energi

Før vi ser nærmere på generering av elektrisk energi, kan det være greit å se litt på hva energi er. Begrepet oppsto på 1700-tallet, men fikk ikke noen klar definisjon før mekanikken ble utviklet. En vanlig definisjon av energi er:

Energi er et systems evne til å utføre arbeid.

I denne sammenhengen kan “system” også være noe så enkelt som en ball eller en stein. Det kan også være *elektrokjemisk* energi slik vi finner det i et batteri, eller elektrisk energi slik som en generator kan levere, når det for eksempel drives av en turbin.

Stort sett kan all mekanisk energi plasseres i to hovedkategorier:

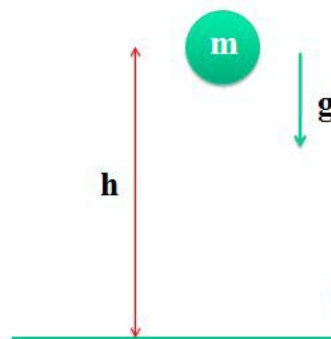
Stillingsenergi (potensiell energi)

Stillingsenergien til en gjenstand forutsetter at den påvirkes av en kraft. Det vanligste er *tyngdekraften* som trekker gjenstanden til jorden. En stein som ligger på bakken, kan normalt ikke utføre noe arbeid. Vi sier at den har *null stillingsenergi i forhold til bakken* den ligger på. Dersom vi løfter den én meter over bakken, så vet vi av erfaring at det kan være tungt arbeid. Vi tilfører steinen energi, *stillingenergi*. Vi vet at mengden arbeid er avhengig av to ting: Hvor *tung steinen* er (hvilken masse (m) den har) og *hvor høyt (h)* den løftes over bakken. I tillegg er den tilførte energimengden selvfølgelig avhengig av tyngdekrafta (*tyngdeakselerasjonen* (g)).

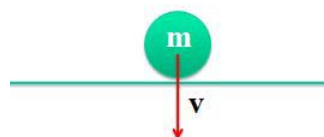
Bevegelsesenergi (kinetisk energi)

Som stillingsenergi *kan* steinen utføre et arbeid. Den utfører imidlertid ikke noe arbeid før vi ev. skulle finne på å slippe den. Akkurat idet vi slipper den har den ingen fart, dvs. den har fortsatt bare stillingsenergi. Rett før den treffer bakken, så har den stor fart, men ingen høyde. Da er alle stillingsenergien gått over til *bevegelsesenergi*. Bevegelsesenergien er også avhengig av *tyngden til steinen* (*massen* (m)) og *av farten* (v). Ja, den er til og med avhengig av *kvadratet av farten* (v^2).

Idet steinen treffer bakken, vil den utføre et arbeid tilsvarende det arbeidet vi tilførte den da vi løftet den opp. Dette arbeidet kan f.eks. bestå i at den knuser eller deformerer det den treffer, at treffstedet varmes opp og at det frambringes lyd. Når steinen igjen ligger i ro er all bevegelsesenergien omdannet til andre energiformer som nevnt foran. Med andre ord:



Figur 6.1 Stillingsenergi
 $= m \cdot g \cdot h$



Figur 6.2 Bevegelsesenergi
 $= 1/2 \cdot m \cdot v^2$



Energi kan ikke oppstå eller forsvinne, men bare gå over i andre former.

Dette kalles Bevaringsloven for energi, og er et svært viktig prinsipp, også i det eksperimentet vi skal beskrive i det neste avsnittet.

6.2 Fra mekanisk til elektrisk energi

La oss begynne med et innledende eksperiment.

Eksperiment: 14 Den fallende magneten

Til dette eksperimentet trenger du en kraftig sylindrisk neodym-magnet og et kobberør (f.eks. Ø 15 mm). Magneten må ikke være større enn at den kan slippes gjennom røret. Om du har rør med forskjellige diametre eller forskjellige materialer (aluminium, messing, pleksiglassrør) så er det fint. Stålrør fungerer imidlertid dårlig.

Gjør slik: Slipp magneten gjennom røret og ta tiden det tar for magneten å falle gjennom røret. Sammenlign med fallhastigheten utenfor røret eller i et pleksiglassrør.

Observer følgende: Du vil da oppdage at fallhastigheten i røret er mye langsommere enn utenfor røret. Magneten vil bremses opp uten i særlig grad å berøre veggene i røret. Har du flere rør vil du oppdage følgende:

- *Magneten bremses mer i rør med liten diameter enn med stor*
- *Magneten bremses mer i kobberør enn i rør av aluminium eller messing*
- *Magneten bremses mer i et rør som er helt enn i et rør med en slisse (se figuren over)*

Årsaken til denne oppbremsingen er at energien i fallet omdannes til elektrisk energi i veggene til røret. Den elektriske energien i rørveggen opptrer som elektriske virvelstrømmer (eng. “eddy current”). Vi sier at det *induseres* elektrisk strøm i rørveggen. Siden kobberøret ikke er en ideell elektrisk leder, men har litt motstand, vil strømmen i rørveggen etterhvert omdannes til varme (termisk energi). Den induserte strømmen vil tappe magneten for kinetisk energi som dermed bremses opp.

- *En større del av magnetfeltet rundt magneten vil trenge inn i et trangt rør enn i et vidt rør. Dermed induseres en større strøm og magneten faller langsommere.*
- *Kobber har høyere ledningsevne enn f.eks. aluminium. Strømmen i veggene på kobberøret blir derfor større enn hos aluminiumsrøret og mer energi tappes ut av fallet slik at magneten bremses mer.*
- *Et kobberør med en langsgående spalt vil bryte en sirkulær strøm rundt røret. Lavere strøm betyr at mindre effekt tappes ut og magneten faller raskere enn om røret var helt.*



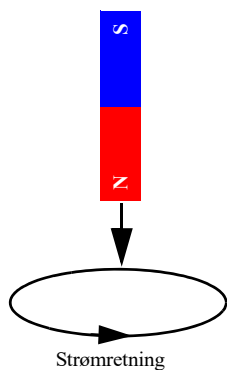
Figur 6.3 Magnet som faller i et kobberør med slisse.



Vi merker oss at når magnetens bevegelsesenergi går over til elektrisk energi, så må fallhastigheten reduseres siden den totale energien er konstant.

Så hvordan kan strømmen i kobberøret bremse opp magneten?

6.3 Induksjon



Figur 6.4 Faradays lov

Det sentrale prinsippet for å omdanne mekanisk energi til elektrisk energi er at elektriske ladninger lar seg påvirke av magneter i bevegelse. Vi husker at elektriske ledninger og kobberør inneholder mange frie elektroner. Når en magnet passerer nær en ledning eller gjennom et kobberør, vil de frie elektronene påvirkes av en kraft som skyver dem gjennom ledningen, dvs. det oppstår en spenning inne i ledningen som en konsekvens av at ladningene har forflyttet seg. Dersom ledningen danner en *sluttet krets* eller *ring*, vil det kunne gå en strøm i kretsen (et kobberør vil være en sluttet krets). Dette kalles elektrisk *induksjon* og ble først oppdaget av den engelske fysikeren **Michael Faraday**. Han fant også ut hvilke regler som gjelder for elektrisk induksjon. Disse reglene kalles for *Faradays lov*.

Han fant ut at:

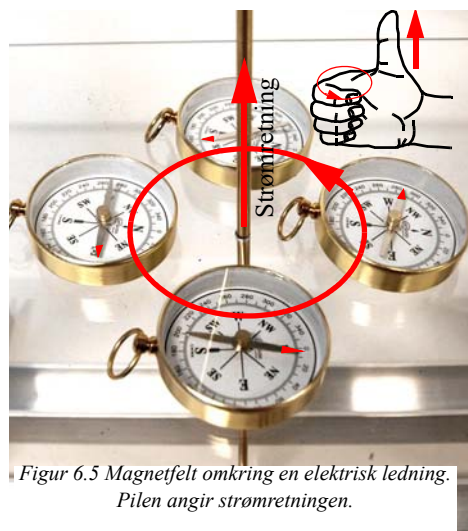
Størrelsen til spenningen som driver strømmen gjennom ringen (den sluttete kretsen), vil være avhengig av hvor fort magnetfeltet som skjærer gjennom ringen, endrer seg (endring pr. tidsenhet (sekund)). En kraftig magnet vil kunne bidra til å gjøre endringen av magnetfeltet større, likeså vil farten magneten beveger seg med kunne bidra til å gjøre endringen pr. tidsenhet større.

Størrelsen til spenningen som driver strømmen vil også avhenge av hvor mange viklinger ringen med ledning (spolen) har. Har vi to viklinger vil spenningen som driver strømmen ideelt sett bli dobbelt så stor som med en vikling, har vi ti viklinger vil spenningen bli ti ganger så høy.

Flere viklinger vil også si lengre ledning og større motstand, strømmen trenger derfor ikke bli tilsvarende høy.

6.4 Strøm og magnetfelt

I 1820 oppdaget den danske fysikeren og kjemikeren **Hans Christian Ørsted** (1777–1851) at når han kjørte en kraftig strøm gjennom en ledning så fikk han utslag på et kompass som befant seg i nærheten av ledningen. Han skjønnte da at det er en sammen-

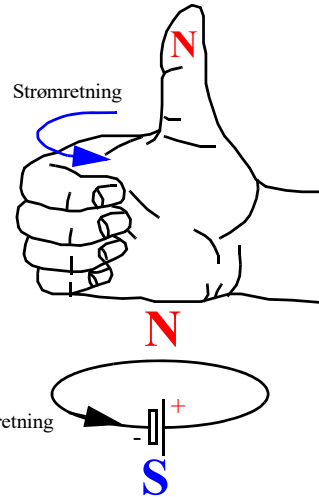


Figur 6.5 Magnetfelt omkring en elektrisk ledning. Pilen angir strømretningen.



heng mellom elektrisk strøm og magnetisme. Han publiserte sin oppdagelse i en artikkel i 1820. Fenomenet var observert 18 år tidligere av den italienske fysikeren *Gian Domenico Romagnosi (1761–1835)*, men han publiserte ikke oppdagelsen sin.

Nå vet vi at dersom det går en strøm gjennom en ledning så vil det oppstå et sirkulært magnetisk felt omkring ledningen. Dette er vist med fire kompasser som er plassert omkring ledningen, se figur 6.5 på side 95. Vi kan bruke høyrehåndsgesellen for å bestemme retningen på magnetfeltet. Dersom vi lar tommelfingeren peke i strømretningen, så vil de fire andre fingrene peke i feltretningen, dvs. i den retningen nordpolen på kompassnåla peker (merket med liten rød pil på kompasset).



Figur 6.6 Høyrehåndsgesellen for å bestemme nordpolen til elektromagneten.

Dersom vi lager en sløyfe av ledningen vil vi få en “spole” med én vikling (figur 6.6). Kobler vi til et batteri slik at det går en strøm i denne vesle “spolen”, så vil vi få en *elektromagnet* med en nordpol og en sørpol. Igjen kan vi bruke en variant av høyrehåndsgesellen for å bestemme elektromagnetens nord- og sørpol. Vi kan formulere høyrehåndsgesellen slik:

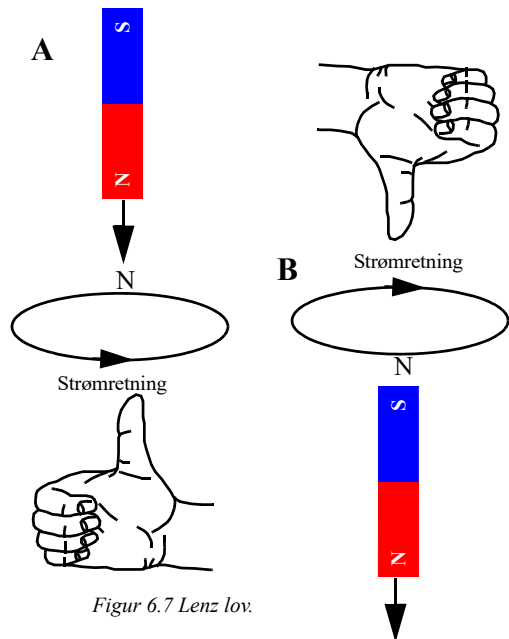
Høyrehåndsgesellen:

Legger du høyre hånd over strømsløyfen slik at fingrene (ikke tommelen) peker i strømretningen, vil tommelen peke mot strømsløyfas nordpol. Husk at strømmen i sløyfa går fra pluss til minus på batteriet.

6.5 Lenz’ lov

Vi har nå sett at slipper vi en magnet gjennom en ledningssløyfe (“spole”) vil det oppstå en strøm i sløyfa (Faradays lov). Tilsvarende vil en elektrisk strøm i en ledningssløyfe gi en elektromagnet med en nord- og en sør-pol.

Vi kan også bruke høyrehåndsgesellen for å bestemme strømretningen i en ledningssløyfe som påvirkes av en magnet som føres gjennom ledningssløyfa (“spolen”).



Figur 6.7 Lenz lov.



Figur 6.7 viser ledningssløyfa. Når vi slipper en magneten gjennom sløyfa, vil elektronene bevege seg slik at “de forsøker å hindere” at magneten kommer inn i sløyfa. Husk at vi nå overfører energi fra bevegelsen til magneten til en strøm i sløyfa. For at energiregnskapet skal stemme, må strømmen i sløyfa ha en slik retning at den bremses farten til magneten, gjør den ikke det så vil det ikke være mulig å tappe energi ut av fallet til magneten.

Vi vet at nordpol frastøter nordpol. Strømretningen må derfor være slik at det lages en nordpol på oversiden av sløyfa siden magneten faller med nordpolen først (se figur 6.7). Idet magneten faller ut av sløyfa, vil strømmen gå slik at “den forsøker å hindre” at magneten forlater sløyfa. Det gjør den ved å lage en nordpol på undersiden som forsøker å holde igjen sørpolen som prøver å forlate sløyfa. Vi husker at ulike poler tiltrekker hverandre.

En strømsløyfe av denne typen er altså temmelig konservativ, “den forsøker å hindre” forandring. Loven som beskriver dette fenomenet kalles Lenz’ lov oppkalt etter den russiske vitenskapsmannen **Heinrich Lenz** (1804–1865).

Dermed skjønner vi hvorfor magneten bremses opp. Strømmen som genereres i spolen eller i kobberørret vil sette opp et magnetfelt som bremses fallet. Slik må det være for at det skal være mulig å hente ut mekanisk energi fra fallet og omdanne den til elektrisk energi.

Et kobberør er ganske effektivt for å omdanne mekanisk energi til elektrisk energi, men ikke særlig effektivt for å framstille anvendbar elektrisk energi.

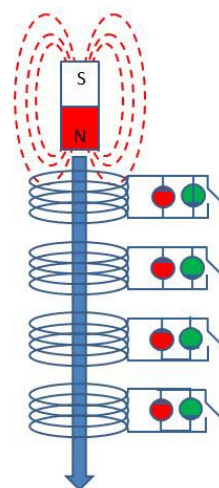
Figur 6.8 viser fire spoler som hver er koblet til to lysdioder og en bryter. Lysdiodene (en grønn og en rød) er koblet motsatt vei. Dersom vi slipper magneten gjennom spolene, vil det, når magneten går inn i en spole, oppstå en strøm den ene veien i spolen og den grønne lysdioden lyser. Når magneten passerer ut av spolen, vil det oppstå en strøm den motsatte veien og den røde lysdioden vil lyse opp. Vi vil altså se at lysdiodene blinker idet magneten faller gjennom spolene.

Siden lysdioder trekker lite strøm vil det ikke omdannes mye elektrisk energi og magneten bremses lite. Dersom vi derimot kortslutter de fire spolene går det en større strøm og magneten bremses opp mer, dvs. en kortslutning trekker mer energi ut av fallet.

Vi kan konkludere med følgende:

- *Det er kun når magnetfeltet endrer seg at det genereres strøm i spolene. Er magneten i ro, skjer det ingen ting.*
- *Når magnetfeltet er økende, dvs. magneten beveger seg inn i spolen, så går strømmen den ene veien. Når magnetfeltet er avtagende, dvs. magneten beveger seg ut av spolen, så går strømmen den andre veien.*

Dette fenomenet, som kalles elektrisk induksjon, er grunnlaget for størsteparten av den elektriske energien vi til daglig bruker.

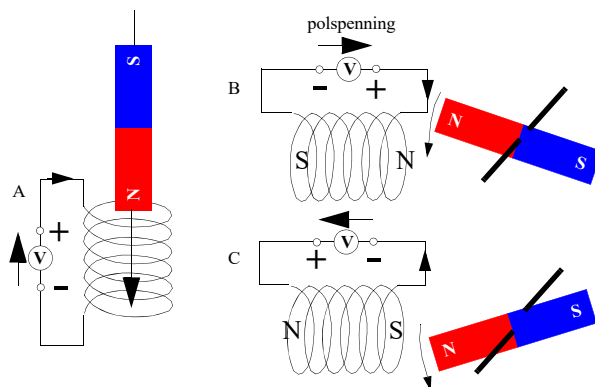


Figur 6.8 Magnet som slippes gjennom spoler



Nå er det ikke særlig praktisk å basere produksjonen av elektrisk energi på magneter som slippes gjennom spoler. I stedet lar man magnetene passere forbi spolene.

Vikler vi opp en ledning slik at vi får en spole og fører en magnet raskt forbi den som vist på figur 6.9, vil de frie elektronene i ledningen settes i bevegelse idet magnetfeltet trenger inn i spolen. Det er viktig at spolen er tett viklet og befinner seg så nær magneten som mulig (ikke som vist på figur 6.9 B og C). Som oftest har spolene en kjerne av blikkplater som har evnen til å samle magnetfeltet slik at størst mulig del av feltet trenger inn i spolen.



Figur 6.9 Magneten setter elektronene i bevegelse og det skapes en spenning over spolens tilkoblingspunkter.

Når magneten nærmer seg spolen (figur 6.9 C) vil det induseres en spenning i spolen som gir en strøm som er slik at det skapes et magnetfeltet rundt spolen som “forsøker å hindre” magneten i å trenge inn i den. Det gjør den som vi har sett, ved å lage en nordpol der magneten trenger inn (figur B). På tilsvarende måte vil den “forsøke å hindre” at nordpolen forlater spolen ved å lage en sørpole (figur 6.9 C). På den måten får vi en spenning over spolenes tilkoblingspunkter som veksler mellom å være positiv og negativ. Vi har fått en elektrisk vekselspenning.

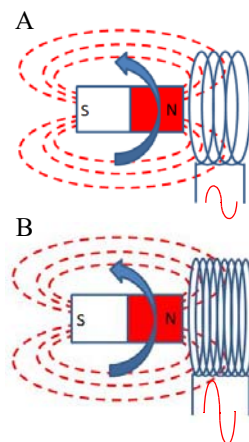
6.6 Antall viklinger

For en ideell generator vil antall viklinger til spolen bestemme størrelsen til spenningen over klemmene (figur 6.10). Dobbelt så mange viklinger gir ideelt sett dobbelt så høy spenning (figur 6.10 B). Legg også merke til at spenningen over spolen svinger mellom pluss og minus, det er en vekselspenning.

For å forstå hvorfor det er slik kan vi se på hver enkelt vikling som en liten generator som lager en liten spenning. Når flere viklinger er koblet etter hverandre (seriekoblet) så vil spenningen på klemmene bli lik summen av alle delspenningene for hver vikling. Dersom f.eks. én vikling gir 0,2 V så vil 8 viklinger gi 1,6 V. Dette forutsetter at magnetfeltet er likt for alle viklingene i spolen.

6.7 Generatoren

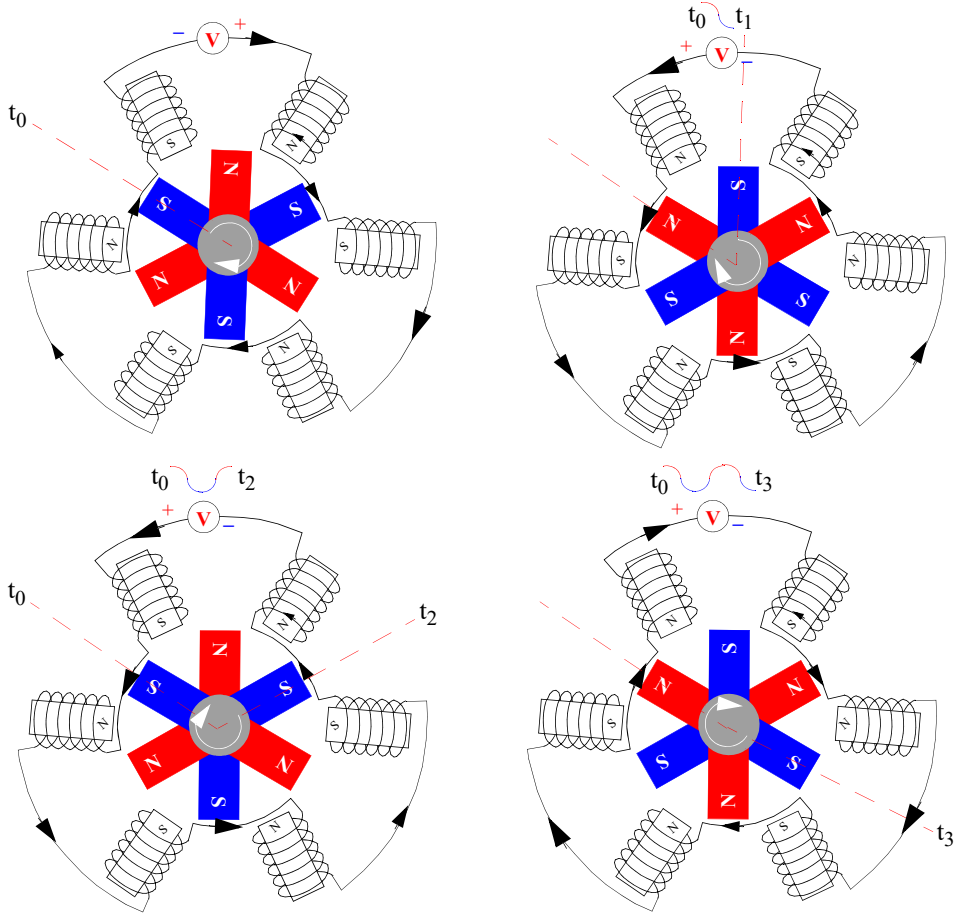
Michael Faraday (1797–1867) som undersøkte fenomenet induksjon, var også tidlig ute med å lage noe som lignet en dynamo eller generator.



Figur 6.10 Antall viklinger bestemmer størrelsen på spenningen



I prinsippet er en generator bygget opp som vist på figur 6.10. Som oftest er flere spoler koblet i serie eller i parallell som vist på figur 6.11, bare med den forskjellen at det er flere magneter og flere spoler som vist på figur 6.11.



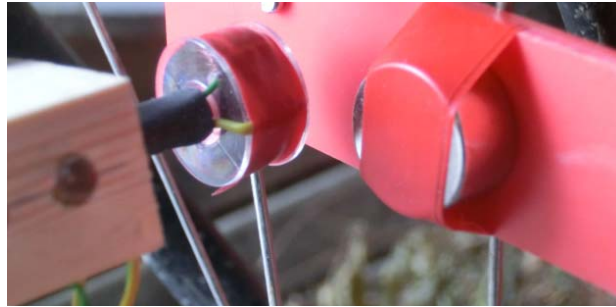
Figur 6.11 Prinsippkisse av en generator: Spolene er koblet i serie for å få høyere spenning.

Spolene i en generator er koblet slik at spenningene (seriekoblede spoler) eller strømmene (parallellkoblede spoler) forsterker hverandre. Generatoren på figur 6.11 vil lage en *vekselspenning*. For at vi skal få en effektiv generator er det viktig at alle spolene gir sitt bidrag i samme retning til riktig tid. Dette får vi til ved å velge et fornuftig antall spoler og retning for viklingene i spolene, og innbyrdes plassering av spolene. Magnetenes polretning og plassering er også viktig.

I store generator bruker man elektromagneter i stedet for permanente magneter. Det er også vanlig at generatoren selv produserer den elektrisiteten som skal til for forsyne elektromagnetene med energi. I så fall må den ha en ekstern startspenning for å komme igang.

Eksperiment: 15 Lag en enkel sykkeldynamo med blinkende baklys

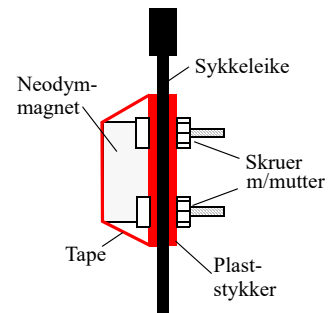
I dette eksperimentet skal vi beskrive en enkel hjemmelaget sykkeldynamo som kan forsyne et blinkende baklys. Dynamoen består av en magnet som fastes mellom eikene i bakhjulet. En spole er festet til ett av stagene som holder bagasjebrettet. To lysdioder som peker bakover er koblet til spolen. Hver gang magneten passerer spolen gir lysdiodene et blink.

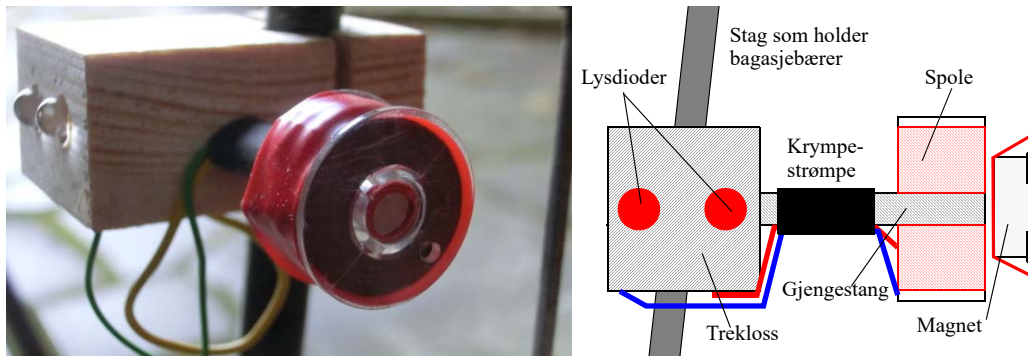


Figur 6.12 En sylindrisk neodymmagnet er festet til to plater av plast som klemmes fast mellom eikene.



Figur 6.13 Montasje av neodymmagnet.



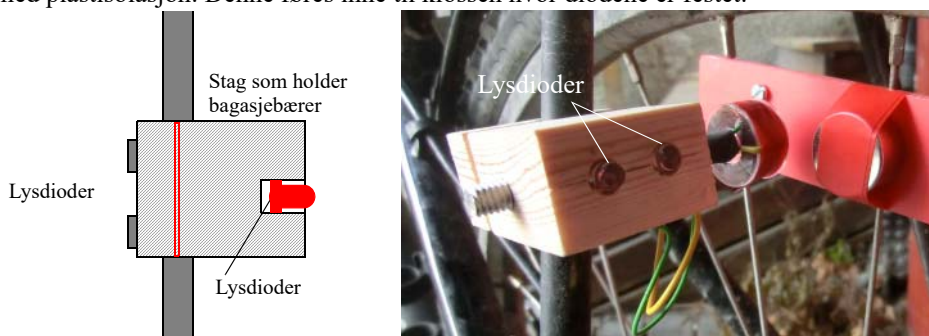


Figur 6.14 Spolen er festet til en gjengestang som er skrudd inn i holderen for lysdiode, og som er festet til ett av stagene som holde bagasjebrettet.

En krympestrømpe er tredd inn på gjengestaget og ledningene, og vil feste ledningene til gjengestaget.

Avstanden mellom magnet og spole gjøres så liten som man tør f.eks. 1 mm. Her må man sørge for at spolen ikke slår borti magneten. Spoleformen er trådsnellen til undertråden til en symaskin (kan bestilles på Internet). Denne er viklet med isolert kobbertråd med diameter 0,15 mm, så mye som går på. Deretter dekkes spolen med elektrikertape.

Den tynne kobbertråden er loddet til en mer robust ledning, f.eks. 0,6 mm (gjærne flertrådsledning), med plastisolasjon. Denne føres inne til klossen hvor diodene er festet.



Figur 6.15 Montering av lysdioder og fest til stag som holder bagasjebærer

For montering av lysdiode bores to “brønner” for diodene med diameter 6 mm rett inn fra siden i klossen. La hullet være litt grunnere en lysdiode. Dernest bores to hull med diameter 1,5 mm



fra undersiden (ev. oversiden) av klossen og inn i “brønnene” der dioden skal plasseres. Beina på dioden bøyes i en krum bue og stikkes ned gjennom hullene i bakkant av “diodebrønnene”.



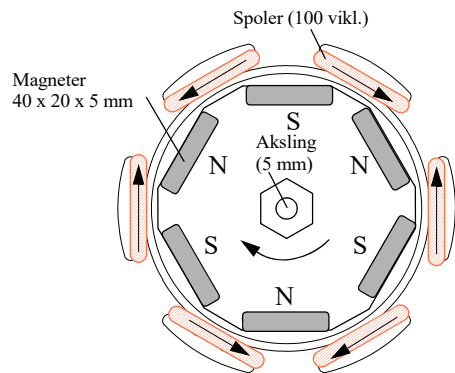
Figur 6.16 Klossen festes til staget som holder bagasjebrettet.

I det neste eksperimentet skal vi lage en håndgenerator.

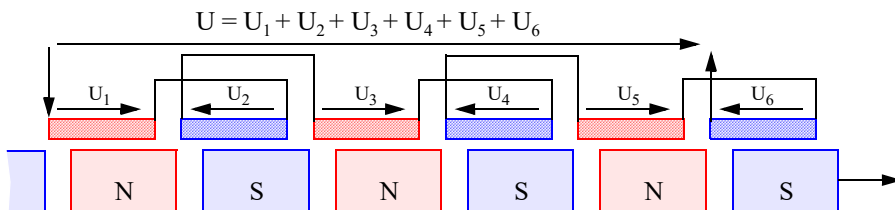
Eksperiment: 16 Lag en håndgenerator

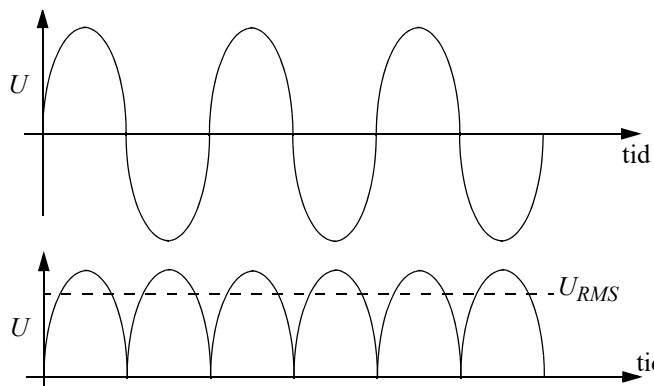
For å lage denne generatoren har vi benyttet en laserkutter. Slike finnes i dag på samtlige regionale vitensentere, fra Nordnorsk vitensenter i Tromsø i nord, til DuVerden i Porsgrunn i sør.

Figuren til høyre viser et tverrsnitt av generatoren sett ovenfra, med rotoren innerst med magneter og statoren ytterst med seks spoler. Spolene er viklet annen hver vei, slik at spenningen skal adderes opp i samme retning etter som magnetene roterer (se figuren under).



I figuren under er magneter og spoler brettet ut slik at vi lettere ser hvordan spolene er koblet sammen. Som vi ser så kobles spolene slik at strømmen går annen hver gang mot venstre og mot høyre.





Det betyr at generatoren vår gir en vekselspenning som, dersom spoler og magneter er plassert symmetrisk, vil gi en vakker sinusformet spenning som vist i figuren til høyre.

Dersom vi måler denne vekselspenning med et voltmeter, måler vi vanligvis det som kalles "RMS-verdien²¹". På et vis er det likespenningen vi måler etter at spenningen er likerettet med en dobbelt likerettet og

jevnet ut (U_{RMS}) som vist nederst på figuren over.

Konstruksjon

Både rotoren og statoren er bygget opp lagvis av tverrsnitt skåret ut av 6 mm finer.

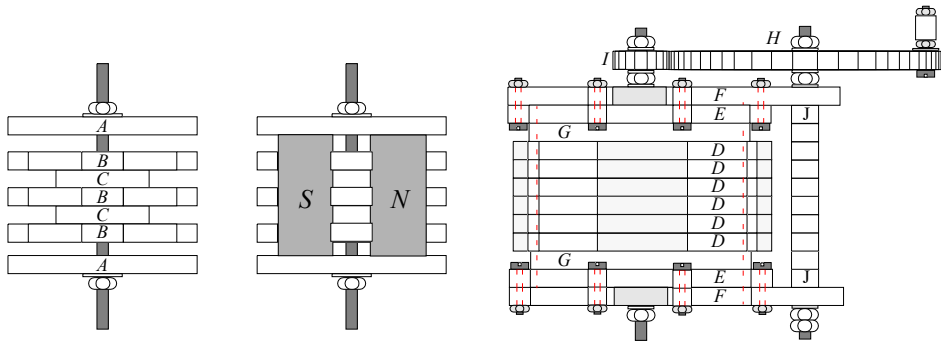


Figuren over viser delene som skal til for å lage generatoren. Ser en svært godt etter vil en også se at det finnes et ekstra sett topp- og bunnplater skåret i akryl slik at det skal være mulig å se hva som foregår inne i generatoren når den roterer.

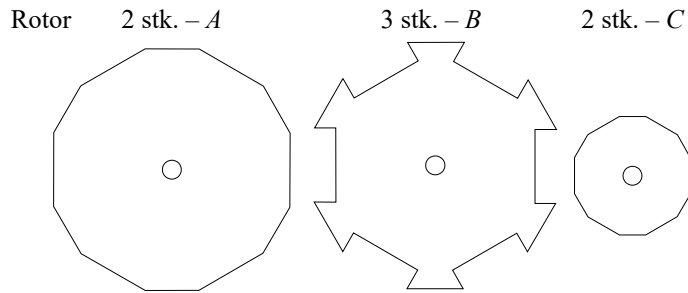
21. RMS - Root Mean Square (dvs. sinusen er kvadrert, midlet over tid for så å beregne roten av verdien som så oppgis på displayet til måleinstrumentet).



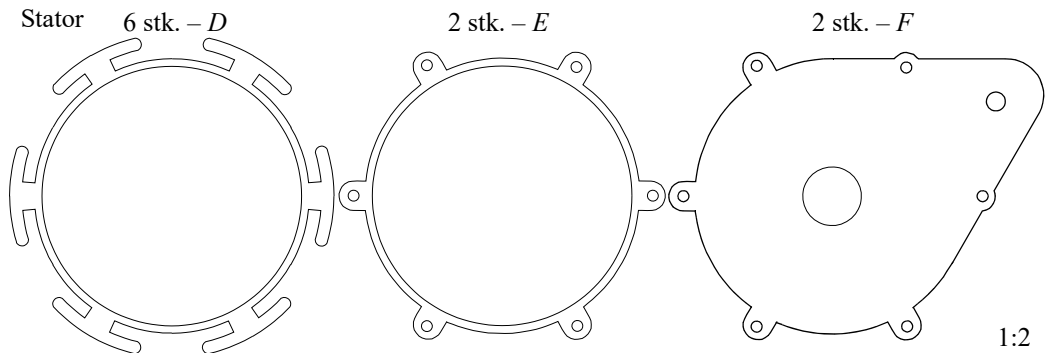
På topp av generatoren er det laget et lite gir og en sveiv. Den lagdelte oppbygningen av rotor og stator er vist på figuren under.



Figuren under viser omrisset av de enkelte delene som rotoren er satt sammen av, sett ovenfra.



Figuren under viser tilsvarende deler for statoren, sett ovenfra.

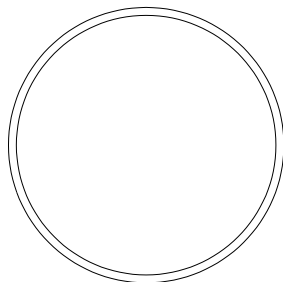


De enkelte delene er merket med bokstaver som man også finner igjen på profiltegningene av rotor og stator over.

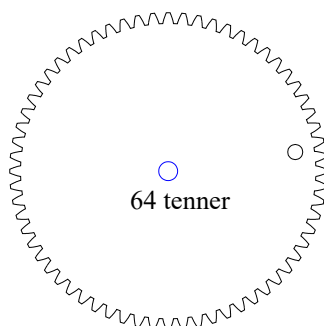


Og her er resten av delene til statoren inkludert tannhjulene til håndsveiva som har en utveksling på 1 : 4.

Stator 2 stk. – *G*



1 stk. – *H*



1 stk. – *I*



16 tenner



Sveiv av
10 mm
rundlist

10 stk. – *J*



1:2

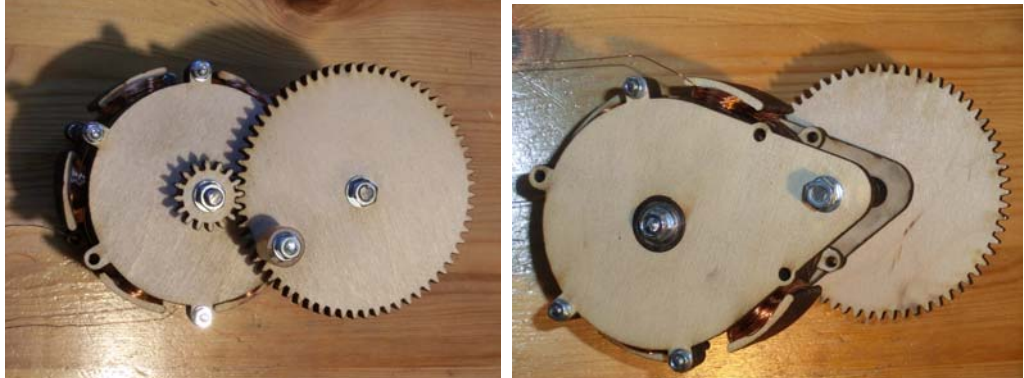
Akslingene er laget av 5 mm gjenget stang som er kappet i hensiktsmessige lengder og giret har en utveksling på 1:4. Rotoren er montert i lag *F* med kulelager med dimensjoner: 16 x 5 x 5 mm (ytre diameter, indre diameter og tykkelse). Tannhjulene er laget med programmet GearDXF og har parametrene: Stort tannhjul T64 DP20 BHD5,0 OD8,382 BD7,638 RD7,81 og lite tannhjul T16 DP20 BHD5,0 OD2,286 BD1,909 RD1,714²².



På figuren over ser vi den ferdige generatoren ovenfra med sveiva (t.v.) og fra siden (t.h.).

22.T – antall tenner, DP – Diametral Pitch, BHD – Bore Hole Diametre, OD – Outer Diametre, BD – Base Diametre, RD – Root Diametre.

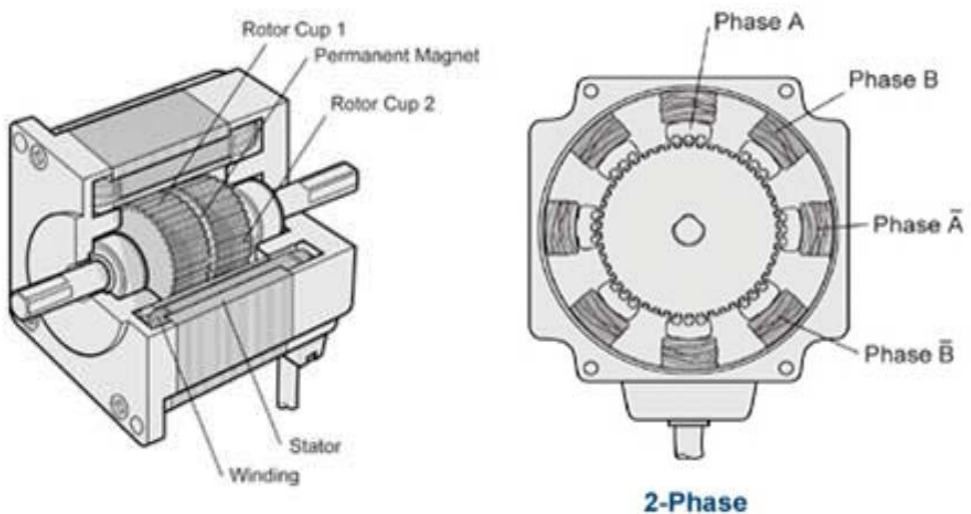
Figuren under viser håndgeneratoren sett ovenfra (t.v.) og fra undersiden (t.h.).



For detaljerte tegninger se heftet *Idehefte for bruk av laserkutter* (Rossing, 2017).

6.8 Steppmotor som generator

Stemmotorer er bygget for å kunne dreies en bestemt vinkel ved hjelp av styrespenninger. *Rotoren* (den delen som roterer) har påmontert fastmagneter, mens *statoren* (den delen som er i ro) har en rekke spoler som det kan settes spenning på i en spesiell sekvens. Motoren kan dermed styres i små trinn med en nøyaktighet fra ca. 2 grad og nedover, bestemt av hvordan den er laget.

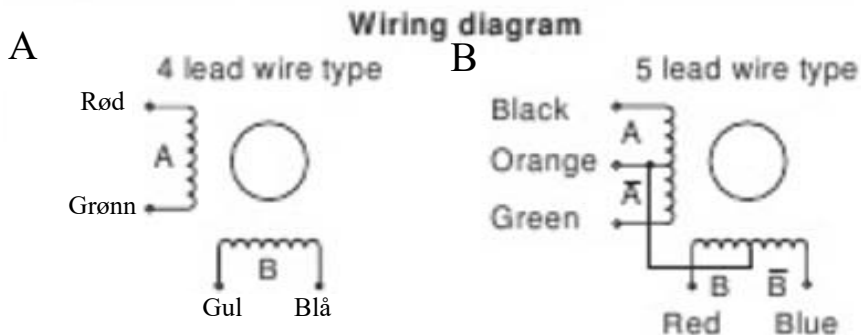


Figur 6.17 To-fase steppmotor

Som det framgår av figur 6.17 B) så er annen hver spole seriekoblet slik at de danner to sammenhengende spoler A og B. Vi legger også merke til at vikleretningen er snudd for annen hver A og annen hver B. Dette er markert med et strek over henholdsvis \bar{A} og \bar{B} . Dermed ender vi opp med to spoler som vist på figur 6.18 A).

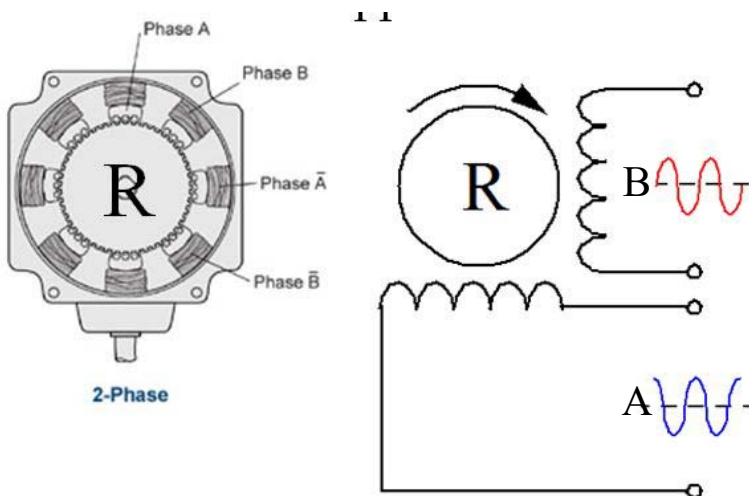


Spolene kan være organisert på ulike måter som vist på figuren under.



Figur 6.18 Fargekoding av tilkobling til steppmotorer.
Vi bruker variant A) til venstre (4-tråds type)

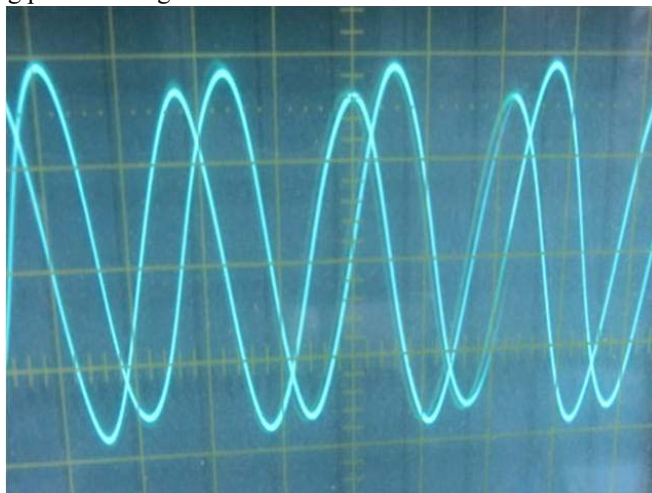
Når magnetene passerer forbi spolene, vil de skape spenninger som er forskjøvet 90° i forhold til hverandre som vist på figur 6.19.



Figur 6.19 Signalet fra spolene A og B er 90° faseforskjøvet.



Dette ser vi tydelig på bildet i figur 6.20.



Figur 6.20 Spenningen fra spole A og B fra steppmotoren.

Vi skjønner at det vil være lite optimalt å addere disse to vekselspenningene som er 90° faseforskjøvet i forhold til hverandre. En måte å gjøre dette på, er først å likerette spenningene hver for seg for så å addere dem.

I kapittel 10 på side 169 skal vi se nærmere på likeretting og dobbelt likeretting. Til slutt i kapitlet, avsnitt 10.3 på side 177, skal vi vise hvordan vi kan likerette og summere spenningene fra steppmotorer av typen bruk som generator.

6.9 Fra lave til høye spenninger (Transformatoren)

Transformatoren er en viktig komponent som vi finner igjen flere steder i elektrisitetsforsyningen. Fra de store transformatorene som sørger for å heve spenningene ut fra kraftstasjonene opp til flere 100 000 Volt, til de små adapterne som vi f.eks. bruker til å lade mobiltelefonen.



Figur 6.21 Transformatorer har mange størrelser, fra linjetransformatorer til små strømadaptere for lading av mobiltelefoner.



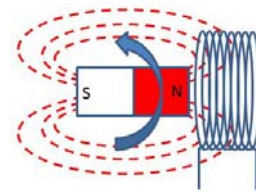
Transformatorer brukes hovedsakelig for å endre spenningen. For å kunne transformere spenningen opp eller ned, må den være en vekselspenning. Likespenninger kan ikke uten videre transformeres, skal det være mulig så må likespenningen først hakkes opp og gjøres om til en vekselspenning, for så å transformeres opp eller ned ved hjelp av en transformator. Deretter må den likerettes slik at en igjen får en likespenning (for likeretting se avsnitt 10).

Men la oss bygge opp forståelsen for transformatoren fra bunnen av.

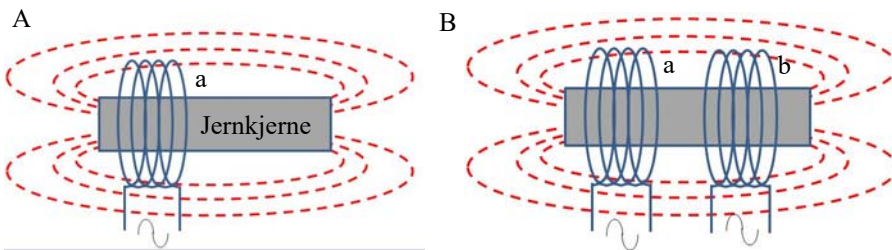
6.9.1 Transformatorens virkemåte

I avsnittet om generatoren husker vi at for å kunne skape en induisert spenning i spolen så måtte den gjennomtrenges av et varierende magnetfelt. Det varierende magnetfeltet ble frambragt ved hjelp av magneter som passerte forbi spolene. Sterke magnetfelter med raskt variasjon frambringer mye elektrisk energi.

Et alternativ til en magnet i bevegelse er å lage en *elektromagnet* som tilføres en varierende spenning, en vekselspenning. Vekselspenningen vil skape en vekselstrøm i spolen (a) som igjen generer et varierende magnetfelt i jernkjernen. Som vi har sett så har det varierende magnetfeltet evnen til å indusere en spenning i en nærliggende spole.

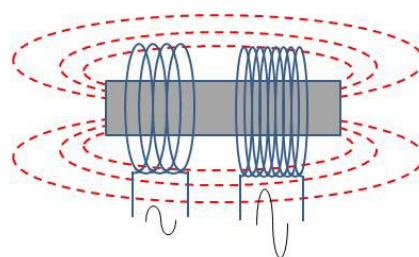


Figur 6.22 Magnet i bevegelse induserer spenning i spolen



Figur 6.23 A viser en elektromagnet som forsynes med en vekselspenning, dermed skapes et varierende magnetfelt B) Trer vi en ny spole inn på jernkjernen med det varierende magnetfeltet vil det induseres en spenning i den nye spolen.

Ved å tre en ny spole (b) inn på jernkjernen, så vil det varierende magnetfeltet indusere en spenning i denne spolen. Dersom antallet viklinger er likt for spole a og b, vil spenningen indusert i spole b ideelt sett være lik spenningen tilført spole a. Dersom antallet viklinger i spole b dobles, så vil spenningen ut av spole b også dobles.



Figur 6.24 Dobbelt så mange viklinger på spole b som på spole a gir en dobling av spenningen.

Transformeringen av spenningen fra spole a til b, vil være lik forholdet mellom antall viklinger i spole a og b.

Tilsvarende vil en kunne transformere ned spenningen ved at spolen a har flere viklinger enn spole b.

Jernkjernen i transformatorer er gjerne laget av bløtt jern (blikk) og består av en stabel av tynne blikkplater som er

isolert fra hverandre. Dette er for å hindre at det skal begynne å gå virvelstrømmer i kjernen som medfører energitap slik at kjernen blir varm. Det er heller ingen fordel at magnetfeltlinjene spres ut i lufta. En mer effektiv transformator med mindre tap er gjerne utformet som vist på figur 6.25 A). Her ser vi hvordan magnetfeltet følger jernprofilen dermed reduseres tapet. I figur 6.25 B) ser vi hvordan det er vanlig å legge spolene a og b utenpå hverandre. Spolen der vi tilfører energien kaller vi *primærspolen*, og spolen hvor vi tar energien ut kalles *sekundærspolen*.

En transformator kan i prinsippet brukes begge veier, enten for *opptransformering* av spenningen (fra generatoren og ut på høyspentlinjen), eller for *nedtransformering* av spenningen som f.eks. tilfellet er for mobilladere (230 V til 5 V). Det er alltid forholdet mellom antall vindinger på primær og sekundær spolen som bestemmer forholdet mellom spenningene.

6.9.2 Hvorfor høyspentlinjer?

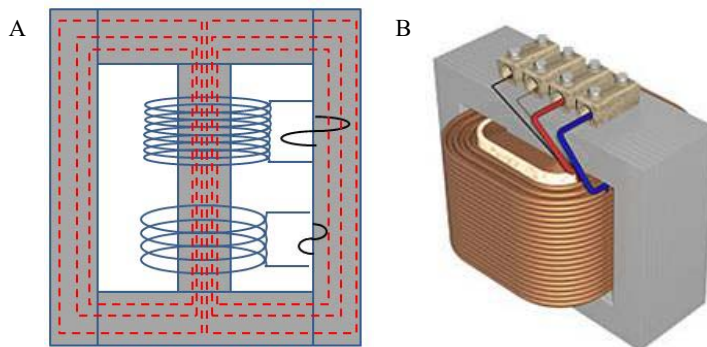
Vi vet alle at høye spenninger kan være livsfarlige. Selv en spenning på 100 V kan være dødelig dersom strømmen den forårsaker velger uheldige veier gjennom kroppen. Det er to ting som gjør elektrisk spenning og strøm så farlige: Det ene er at strømmen kan forstyrre nerveimpulsene i kroppen, som også er elektriske impulser. Det er spesielt impulsene som styrer hjerteslagene som er utsatte. Selv små strømmer i hjerteregionen (mA) vil kunne forårsake hjertestans. Det andre er at store strømmer vil forårsake skade på vevet både innvendige og utvendige skader. Innvendige skader er ikke alltid like lett å oppdage. Får man et kraftig elektrisk støt vil være lurt å drikke mye om man er ved bevissthet og så oppsøke lege.

Så hvorfor kunne man ikke i stedet ha bruke 25 V i strømmettet fra kraftstasjonen til husstandene? Da hadde man unngått mange ulykker. Dessuten hadde man ikke trengt de store mastene som skjemma naturen.

For å forstå dette må vi se litt på sammenhengen mellom effekt (energi), strøm og spenning. Vi har tidligere sett at:

$$\text{Energi} = \text{effekt} \times \text{tid}$$

Med andre ord effekt er energi per sekund (tidsenhet).



Figur 6.25 Vanlig utforming av en transformator.



Vi har dessuten sett at elektrisk energi er lik:

$$\text{Energi} = \text{Strøm} \times \text{spenning} \times \text{tid}$$

Vi ser altså at dersom vi ønsker å overføre store mengder energi, slik vi gjør i strømmettet, så kan vi gjøre det på ulike måter:

1. Vi kan bruke **lav spenning** og **liten strøm**, men gjøre det over svært **lang tid**.
Dersom vi for eksempel skal koke mat så er denne måten ganske upraktisk siden det vil ta lang tid å varme opp maten.
2. Vi kan bruke **lav spenning**, men **meget stor strøm**, og gjøre det over relativt **kort tid**. Store strømmer vil kreve meget tykke kabler for å unngå å tape for mye energi til varme. Meget tykke kabler betyr stor kostnad og tilsvarende høyt forbruk av metall. Fordelen vil imidlertid være at man slipper store master som skjemmer landskapet. I stedet må man sannsynligvis grave store grøfter til kabler.
3. Vi kan bruk **høy spenning** og **relativt liten strøm**, og gjøre det over **relativt kort tid**. Siden spenningen blir så høy så vil overføringen kreve store master med stor avstand mellom ledningene, men vi trenger ikke bruke så mye metall og kostnadene kan holdes lave.







7 Fra elektrisk energi til mekanisk bevegelse

I dette avsnittet skal vi se hvordan strømførende ledere omgir seg med magnetisk felter, og påvirkes av en kraft om den befinner seg i et magnetfelt. Til sist skal vi se hvordan dette utnyttes i elektriske motorer. Men la oss først se hvordan en dansk fysiker gjorde en stor oppdagelse på begynnelsen av 1800-tallet.

7.1 Elektromagnetisme, Ørstedts forsøk

Den danske fysikeren *Hans Christian Ørsted* (1777–1851) gjorde i 1820 en epokegjørende oppdagelse. Under en forelesning ved Københavns universitet fikk han støtte for sin mistanke om at elektrisk strøm i en ledning påvirker ei magnetnål.



Hans Christian Ørsted

At dette ikke var oppdaget tidligere, skyldtes delvis at den franske fysikeren *Charles de Coulomb* (1736–1806) med stor autoritet hadde slått fast at det ikke var noen sammenheng mellom elektrisitet og magnetisme.

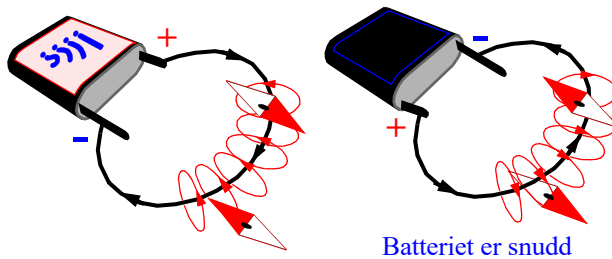
Ørstedts oppdagelse ble publisert og den franske fysikeren *André Marie Ampère* (1776–1836) gjentok forsøket i Paris kort tid etter.

Ekspériment: 17 Ørstedts epokegjørende eksperiment

Til dette eksperimentet trengs et batteri, en ledning og et kompass.

Legg kompasset på bordet. Hold ledningen i nærheten av kompasset idet batteriet kortsluttes ved hjelp av ledningen. Det vil da gå en kraftig strøm gjennom ledningen, og kompassnåla gir utslag.

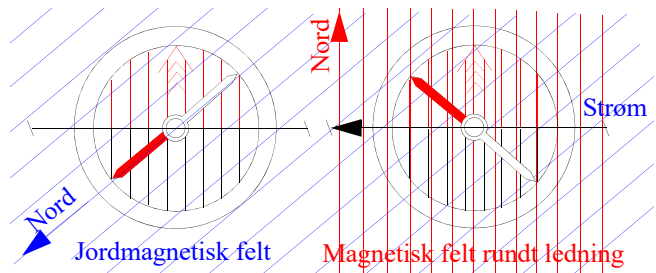
På grunn av kompassnålas utslag vet vi at det oppstår et magnetfelt rundt den strømførende ledningen. Dette feltet kan illustreres med sirkellinjer. Kompassnåla vil rette seg inn langs feltlinjene. Legg merke til at nåla skifter retning når vi legger den henholdsvis over og under ledningen. Det samme skjer når vi snur strømretningen.



I dette eksperimentet har vi brukt et vanlig kompass som stiller seg inn mot den magnetiske Nordpolen.



Vi legger merke til at kompassnåla ikke peker vinkelrett på ledningen som forventet. Dette kommer av at når det går strøm i ledningen, vil kompassnåla både påvirkes av det jordmagnetiske feltet og det magnetiske feltet rundt ledningen.



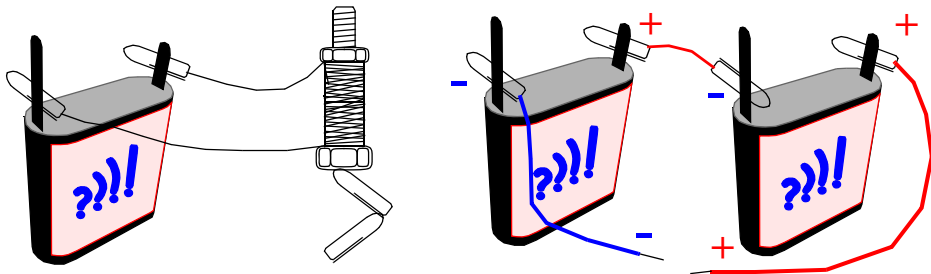
Når kompasset påvirkes av begge feltene samtidig, blir den stående på skrå. Påvirkningen av jordmagnetismen blir mindre dersom strømmen i ledningen er stor.

Det elektromagnetiske prinsippet utnyttes blant annet i elektromagneter. Elektromagneter brukes i mange sammenhenger, for eksempel som dørholdere, elektrisk styrte brytere (releer), lydholder på båndopptakere, innslaget i startmotorer på biler, kraner som løfter jernskrap osv.

Eksperiment: 18 Elektromagnet

I dette eksperimentet skal vi undersøke hvor sterk en hjemmelaget elektromagnet er. Detaljert bygge-beskrivelse av elektromagneten finnes i det neste eksperimentet nedenfor.

Koble ledningene fra magneten til klemmene på et 4,5 Volts batteri.



Seri kobling av to 4,5 Volts batterier

Undersøk hvor sterk magneten er ved å henge binders eller muttere på den. Hvor mye sterkere blir magneten når vi bruker en seri kobling av to 4,5 Volts batterier?

Eksperiment: 19 Lag en elektromagnet

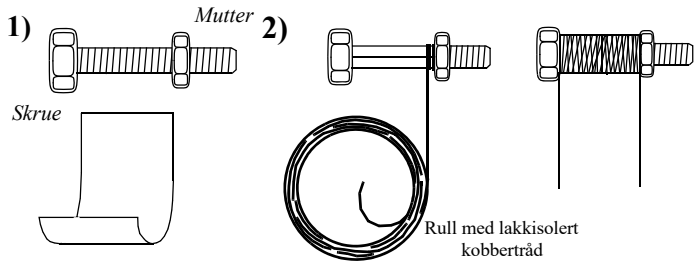
Dette eksperimentet beskriver hvordan man kan lage en elektromagnet. Dette kan gjøres på mange forskjellige måter. Vi har valgt å bruke en bolt.

For å lage en elektromagnet trengs en bolt med mutter (80 mm), en papirstrimmel (50 mm bred). 5–10 meter lakkisolert kobbertråd (f.eks. 0,3 mm), to binders, ett 4,5 Volt flatbatteri, litt isolasjonsbånd eller tape. Tillegg trengs en loddebolt og en kniv.

Slik lages elektromagneten:



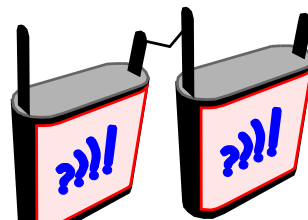
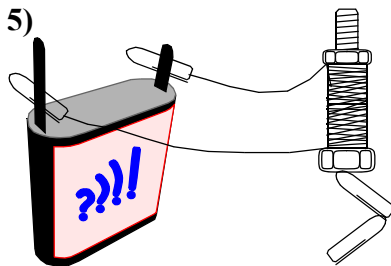
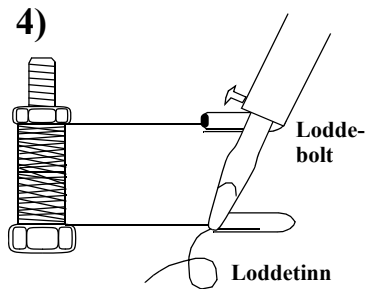
1. Skru mutteren inn på skruen slik at papirstrimmelen passer akkurat mellom mutteren og skruhodet.
2. Vikle den isolerte kobbertråden rundt skruen utenpå papiret. La begge endene stikke ut ca. 15 cm.



- 3) Bruk en liten kniv eller litt sandpapir til å skrape av isolasjonen på kobbertråden. Du ser at den blir litt blankere når isolasjonen er borte.
- 4) Lodd binderser på hver av ledningene.
- 5) Koble til batteriet, og undersøk om skruen blir magnetisk.



- 6) Undersøk hvilke andre ting enn binders som lar seg tiltrekke av magneten.
- 7) Undersøk om ulike materialer tiltrekkes med forskjellig styrke. Hvor mye sterkere blir magneten dersom du bruker to flatbatterier koblet i serie? Hva om du kobler dem i parallell?



Seriekobling av to flatbatterier

Styrken til en elektromagnet bestemmes av flere ting:

- *Antall vindinger med ledning.* Jo flere vindinger på spolen, jo sterkere magnet. Dette forutsetter imidlertid at strømmen holdes konstant. I virkeligheten vil motstanden i vindingene øke med antallet, og dermed vil strømmen reduseres noe.

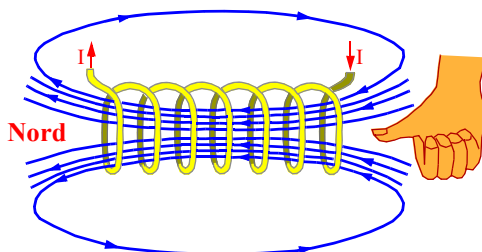


- *Strømstyrken.* Jo sterkere strøm, jo sterkere magnet (høyere spenning gir vanligvis større strøm).
- *Kjernen i magneten.* En kjerne av for eksempel jern vil samle feltlinjene, slik at magnetfeltet nær enden av jernstykket blir kraftigere enn om det ikke var jern inne i spolen.

For å bestemme hva som er nord- og sørpol på en elektromagnet, brukes høyrehåndsregelen.

Høyrehåndsregelen

Legg høyre hånd omkring spolen slik at fingrene peker i strømretningen. Tommelen vil da peke på elektromagnetens nordpol. Husk at strømretningen er definert fra pluss- til minuspolen på batteriet.

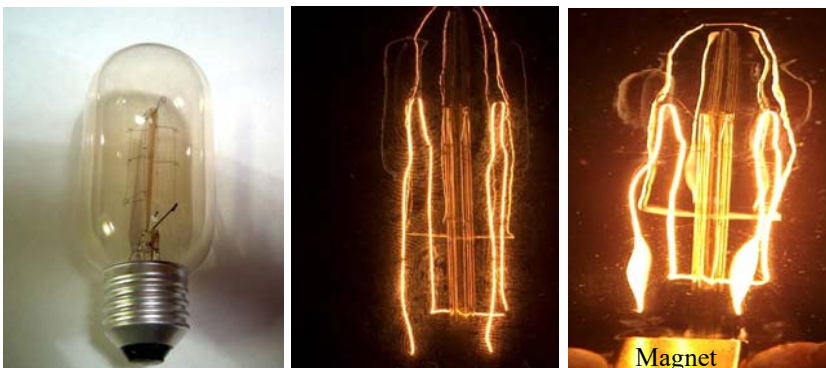


Som tidligere nevnt brukes elektromagneter til svært mange forskjellige ting i samfunnet vårt. En anvendelse er å omdanne varierende elektrisk strøm til lyd. Dette skjer i høyttalere.

Et annet litt spesielt eksperiment, som viser at det dannes et magnetisk felt rundt en strømførende leder, er følgende:

Eksperiment: 20 Den svingende glødetråden

Til dette eksperimentet trengs ei glødelampe med så lang glødetråd som mulig og med klart glass, i tillegg til en kraftig permanentmagnet. Sett glødelampa i sokkelen og slå på strømmen. Hold en magnet borttil og se hva som skjer med glødetråden. Det er viktig at glødelampa er utformet slik at det er mulig å komme så nært glødetråden som mulig med magneten.



En vil observere at glødetråden svinger fram og tilbake, slik at den ser ut som ei glødende flate. Dette skyldes at magnetfeltet rundt glødetråden og magnetfeltet rundt permanentmagneten virker sammen, slik at glødetråden utsettes for en kraft. Siden strømmen i glødetråden skifter retning 100 ganger i sekundet, vil også kraften på glødetråden skifte retning på samme måte. Resultatet er at glødetråden begynner å vibrere. I virkeligheten svinger glødetråden så fort at øyet ikke klarer å følge med, men ser tråden som ei utflytende flate, som vist til høyre på bildet over.



Dette eksperimentet viser tydelig hvordan magnetfeltet rundt en elektrisk leder skifter retning avhengig av strømretningen.

Et mer spektakulært eksempel er hvordan man kan lage et lite “tog” som beveger seg gjennom en spole av uisolert tråd. I dette eksempelet skal vi se hvordan magneter drives fram gjennom en spole som fører strøm.

Eksperiment: 21 Verdens enkleste tog

Til dette eksperimentet trengs et 1,5 Volt batteri (AAA), to sylindriske magneter med litt større diameter enn batteriet, 25 meter uisolert kobbertråd. Vi valgte å kjøpe sølvbelagt kobbertråd fra ELFA, men også fortinnet kobbertråd fungerer godt²³. Av verktøy trenger du et glatt metallrør med en diameter ca. 2 – 3 mm større enn magnetene.

Kobbertråden vinnes tett og jevnt langs røret. Spolen vil bli ca. 80 – 120 cm lang avhengig av diameteren på røret. Utfordringen er å strekke spolen slik at de enkelte vinningene ikke berører hverandre, samtidig som spolen må være helt jevn uten bulker og ujevnheter.

Det beste vil være å spinne spolen opp på en dreiebenk med maskinmating av tråden, slik at vindingene legges tett inntil hverandre uten å berøre naboene, dermed slipper du å strekke spolen som gjerne er med på å gjøre den ujevn.



Figuren over viser enden av spolen viklet på et forkrommet stålrør.

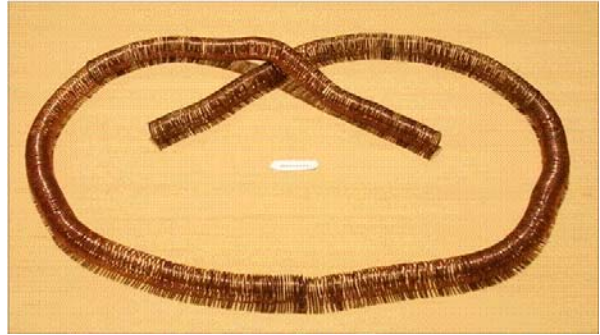
23. Fortinnet kobbertråd (0,75 mm) kan også brukes (ELFA 55-161-33)



Bildet²⁴ til høyre viser en spole av ubehandlet kobber, som også fungerer godt.

Fest en magnet på hver side av batteriet og stikk det inn i enden av spolen. Da vil en av tre ting inntreffe:

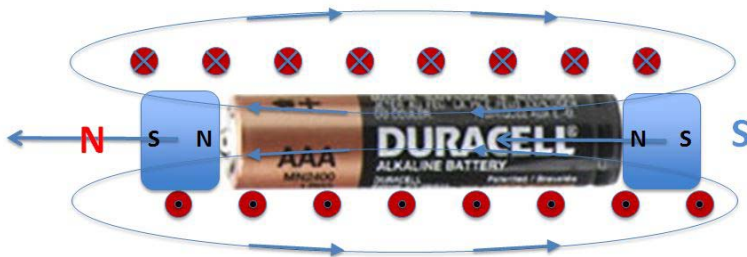
1. Batteriet stritter imot og vil ut igjen – snu batteriet og prøv igjen, eller send batteriet inn fra den andre siden av spolen.
2. Batteriet med magnetene vil ikke bevege seg – snu en av magnetene
3. Batteriet farer gjennom spolen og kommer ut på den andre siden – da fungerer det etter hensikten.



Det interessante er å reflektere over hvilken vei batteriet og magnetene må settes for at batteriet skal bevege seg gjennom spolen? Betyr det noe hvilken vei spolen er viklet?



Det som er avgjørende for om toget skal bevege seg er at retningen på feltet inne i spolen harmonerer med retningen på magnetene. Retningen til feltet inne i spolen bestemmes av strømrretningen som igjen bestemmes av hvilken vei batteriet står og hvilken vei spolen er viklet. Dernest må begge magnetene dra i samme retning. Det betyr at den forreste magneten må dra og den bakerste må skyve batteriet framover. Tegningen under viser betingelsene for at dette skal lykkes.



Legg merke til at de to magnetene må stå motsatt vei, begge med en nordpol inn mot batteriet, eller begge med en sørpole inn mot batteriet. Hvilken av disse to variantene du velger bestemmer hvilken vei batteriet vil bevege seg.

Det handler altså om at strømførende ledninger (spolen) omgir seg med et magnetfelt som sammen med fast magneter skaper en kraft som driver batteriet gjennom spolen.

24.Se: <https://www.youtube.com/watch?v=Aq7nMk8Lq8E>

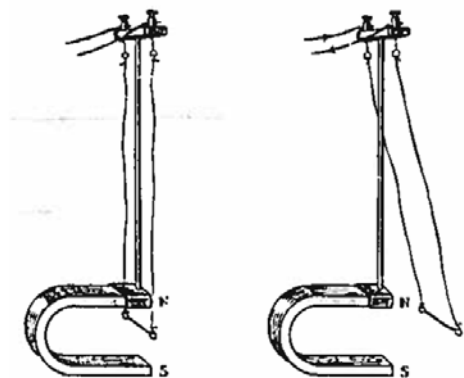


I det neste forsøket skal vi rendyrke denne egenskapen.

7.2 Kraftvirkning på strømførende leder i magnetfelt

Pohls forsøk demonstrerer tydelig hva dette handler om.

Ekspériment: 22 Pohls eksperiment – kraft på strømførende ledning i magnetfelt



Til dette forsøket trengs en hestekomagnet, en ledning opphengt mellom polene på magneten som vist på figuren til venstre, og en strømkilde²⁵.

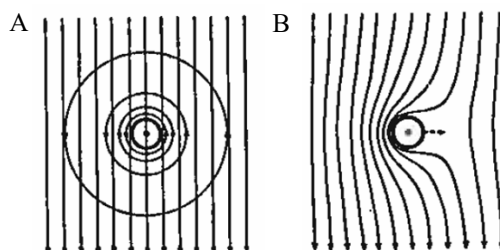
Når vi lar det gå strøm gjennom ledningen vil den enten svinge ut av hestekomagnetten eller lengre inn i magnetten avhengig av strømretningen.

Det er tydelig at den delen av ledningen som befinner seg inne i magnetten påvirkes av en kraft.

Vi er tidligere gjort kjent med at det omkring en strømførende er et magnetfelt og at magnetfeltet ligger som en sylindrisk kappe rundt en rette ledningen. Figuren under (A) viser magnetfeltet fra

magnetten og magnetfeltet rundt ledningen hver for seg

Imidlertid vil to magnetfelt som går i samme retning adderes og danne et sterkere felt, mens to felt som peker mot hverandre svekkes som vist på bilde til høyre (B). Vi ser altså at vi får et kraftigere felt på venstre siden av ledningen der feltene adderes, enn hva vi får på høyre siden hvor feltene svekker hverandre. I dette tilfellet vil det virke en mekanisk kraft på ledningen som peker mot høyre.



Størrelsen på denne kraften (F) vil være proporsjonal med styrken på magnetfeltet (B) mellom armene i hestekomagnetten, strømstyrken (I) i ledningen og lengden l til ledningen som er inne i magnetfeltet.

$$F = B \cdot I \cdot l \quad (7.1)$$

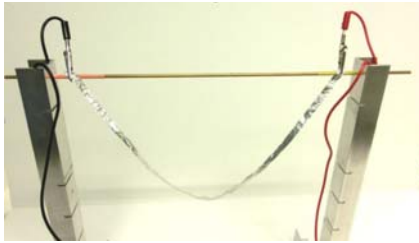
Ved å legge ledningen som en kveil (spole) inne i magnetfeltet, vil lengden på ledningen øke, likeså kraften dersom strømmen og magnetfeltet ellers holdes konstant.

25. Figuren er hentet fra Fysikk for gymnasen, Sverre Bruun, Olaf Devik - Elekrisitet, Magnetisme, Atomfysikk ved Hans Råstad og Henry Viervoll, Olaf Nordlis Forlag 1970



La oss se på et annet forsøk som illustrerer det samme på en litt overraskende måte.

Eksperiment: 23 Aluminiumfolien som beger seg når det går strøm gjennom den



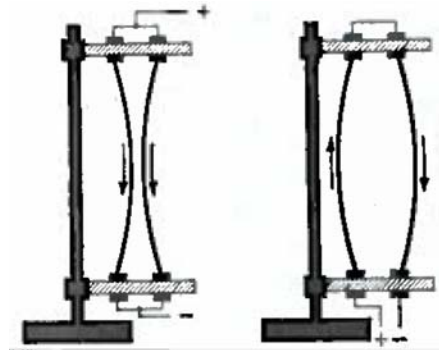
Til dette eksperimentet trengs en tynn stripe av aluminiumsfolie (40 - 50 cm), ledninger med krokodilleklemmer, en bryter og en strømkilde (batteri).

Aluminiumsfolien henges opp slik at den henger fritt i en bue, se figuren til venstre. Så kobles strømmen til, gjerne ved hjelp av en bryter slik at en ikke risikerer å sette folien i bevegelse ved tilkobling.

Dersom man ikke tydelig får fram effekten så kan man dreie litt på oppstillingen.

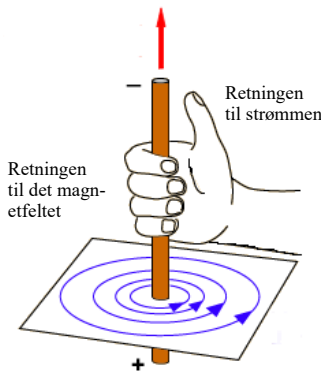
Det vi observerer her er at magnetfeltet omkring den strømførende aluminiumsfolien samvirker med jordmagnetismen, og gjør at folien påvirkes av en kraft som gir den observerte effekten.

En tilsvarende kraft vil påvirke to parallelle strømførende ledninger. Er strømmen sterk nok vil de to lederne utsettes for betydelige krefter. Kraftens retning vil dessuten være avhengig av den innbyrdes retningen på strømmen. De to ledningene vil dras mot hverandre dersom strømmen går samme vei, og skyves fra hverandre dersom strømmen i de to ledningene går motsatt vei som vist på figuren til høyre.

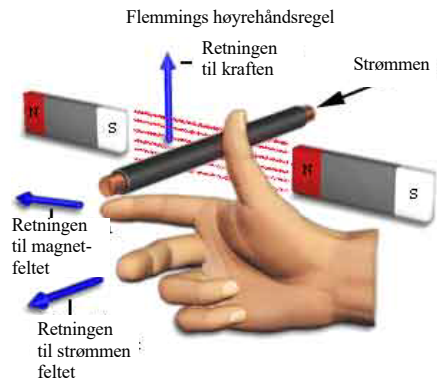


Den franske fysikere **André Ampère** (1775–1836) var den første som beskrev dette eksperimentet og fant et forenklet matematisk uttrykk for kraften som virker på de to ledningene. Derfor kalles denne loven for Ampères kraftlov.

7.3 Høyrehåndsregelen



Så hvordan skal vi finne ut hvilken vei kraften på ledningen virker? La oss ta utgangspunkt i retningen til strømmen i en rett strømførende leder. Ved å legge høyre hånd omkring lederen og la tommelen peke i strømretningen, så vil resten av fingrene på hånda peke i retningen





til det magnetiske feltet omkring ledningen. Se figuren over til venstre²⁶.

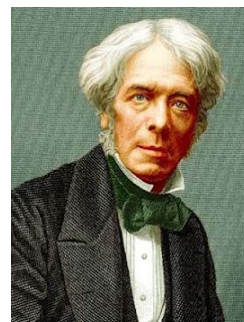
En tilsvarende høyrehåndsregel (Flemmings høyrehåndsregel) kan benyttes for å finne retningen til kraften på en strømførende ledning som befinner seg i et magnetfelt. Figuren over til høyre viser sammenhengen²⁷.

7.4 Den første elektriske “motoren” – Faradays “motor”

En annen viktig anvendelse av elektromagneter er i forbindelse med elektriske motorer. La oss se på ett av de første eksperimentene som ble gjort i denne sjangeren, nemlig *Faradays motor*.

Engelskmannen **Michael Faraday** (1791–1867) er en av de største eksperimentalfysikere som har levd. Han var ikke noen stor teoretiker, men gjorde en rekke banebrytende eksperimenter innen elektrokjemi og fysikk.

På bakgrunn av Ørsteds og Ampères eksperimenter med strøm og magnetisme, klarte Faraday i 1821 å demonstrere den første mekaniske roterende bevegelse frambragt av elektrisk strøm og magnetisme. ???



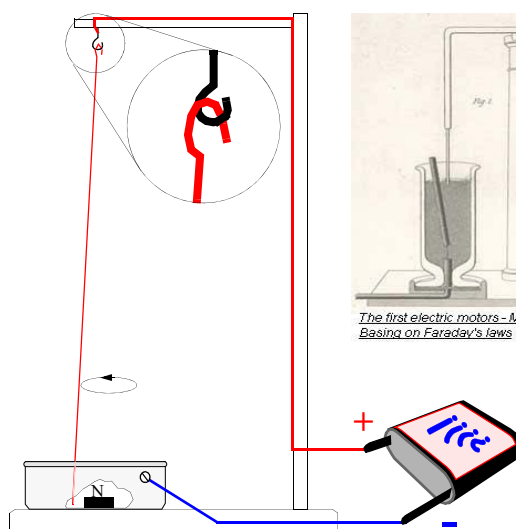
Michael Faraday

La oss forsøke å gjenta Faradays forsøk.

Ekspiriment: 24 Faradays “motor”

Til dette eksperimentet trengs et 4,5 Volt batteri, ledninger, en rund, kraftig magnet, en rund leverposteiboks og saltvann.

Fyll leverposteiboksen med saltvann (løs opp mye salt). Legg magneten i midten av boksen nede i saltvannet. La en avisolert tråd på ca. 30 cm henge ned i saltbadet midt over magneten, men slik at den blir liggende an mot siden av den. Koble minuspolen på batteriet til leverposteiboksen og pluss-polen til den hengende ??? ledningen. Sørg for at ledningen kan svinge fritt. Ledningen



*The first electric motors - Michael Faraday, 1821
Basing on Faraday's laws*

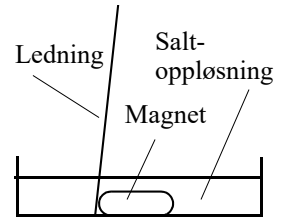
26. http://www.school-for-champions.com/science/magnetic_field_moving_charges.htm#VhZVQP_ovIU

27. <http://www.electrical4u.com/fleming-left-hand-rule-and-fleming-right-hand-rule/>



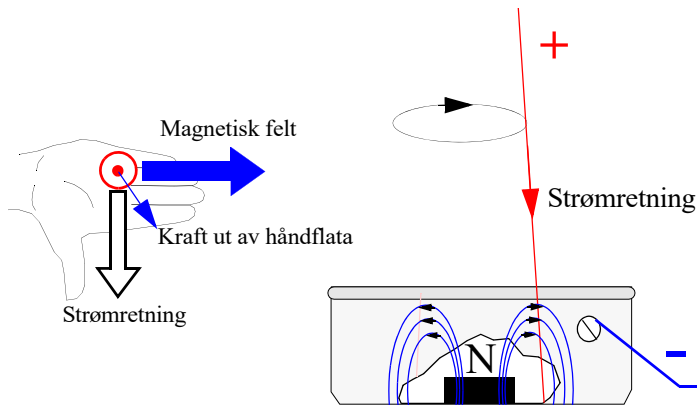
kan med fordel henges opp i en galge over saltbadet, som vist på figuren over. Om den elektriske kontakten med kroken er dårlig, kan en legge på en dråpe saltvann.

Når det settes spenning på oppkoblingen, vil ledningen pendle i sirkler rundt magneten. Til høyre på figuren over ser vi Michael Faradays oppsett. Han viste også at en fast magnet kan rotere rundt en strømførende ledning, på samme måte som en strømførende ledning roterer rundt en fastmagnet. Han brukte imidlertid kvikksølv i stedet for saltvann.



Denne modellen viser et svært viktig prinsipp:

Når det magnetiske feltet rundt en strømførende ledning virker sammen med feltet fra en permanent magnet, så vil det virke krefter på ledningen og magneten.



Siden magneten i vårt tilfelle sitter fast, vil den bevegelige ledningen rotere.

Dersom vi holder ei åpen hånd slik at tommelen peker i strømretningen og det magnetiske feltet langs de øvrige fingrene, vil kraften på lederen virke ut av håndflata. Også denne regelen er en variant av høyrehåndsregelen.



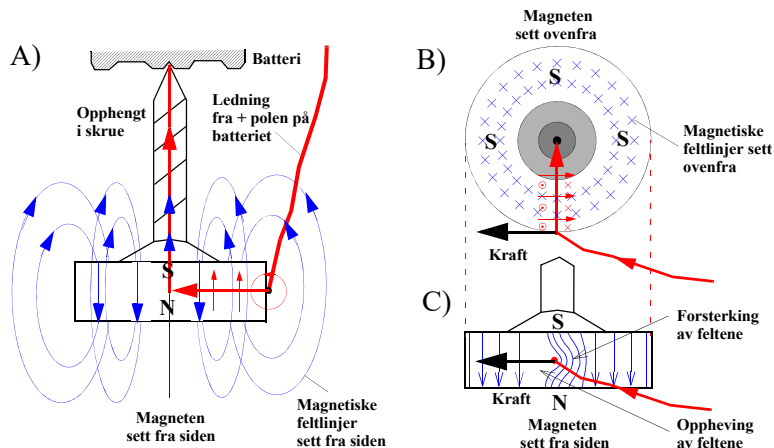
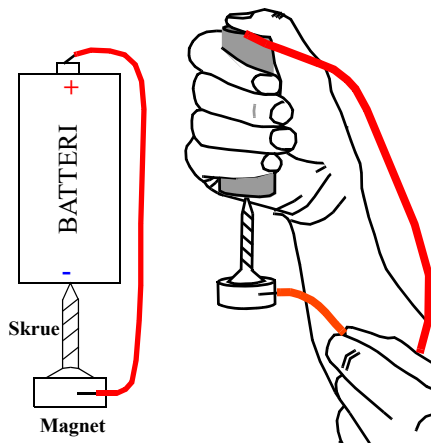
Vi kan utnytte dette prinsippet til å lage verdens enkleste motor.

Eksperiment: 25 Enkel homopolar motor for demonstrasjon og undring

Til dette eksperimentet trengs en kraftig neodym-magnet, en skrue, et rundbatteri og en ledning, gjerne med tynde kordeler (lisse).

Hold batteriet inne i hånda. La skruehodet feste seg til sentrum av magneten. La spissen til den nå magnetiske skruen feste seg til den negative polen på batteriet (underst). Hold ledningen borttil den positive polen på batteriet (øverst) og før den andre inntil siden av magneten. Husk å ta isolasjonen av endene på ledningen. Da vil du se at strømmen gir magneten et "spark", slik at den begynner å rotere.

Grunnen til at magneten går rundt, er den samme som i forrige eksperiment.



Den runde magneten har en nordpol (N) og en sørpole (S). På figuren har vi plassert sørpolen opp. Når vi holder ledningen borttil kanten av magneten, vil det gå en elektrisk strøm fra kanten og inn mot sentrum av magneten (radielt). Derfra følger strømmen skruen opp til minuspolen på batteriet. Magnetten omgir seg med et magnetfelt som vist på figuren (A). Kryssene i figur B skal vise at vi ser enden av felpilene. Feltet går derfor innover i papiret. En sirkel med en prikk viser spissen av felpilene og skal vise at feltlinjene peker ut av papirplanet.

Eksperimenter tyder på at det er strømmen som går radielt gjennom magneten som er skyld i rotasjonen. Magnetfeltet som dannes rundt denne strømmen vil sammen med det interne magnetfeltet i magneten gi en kraft som driver magneten rundt.



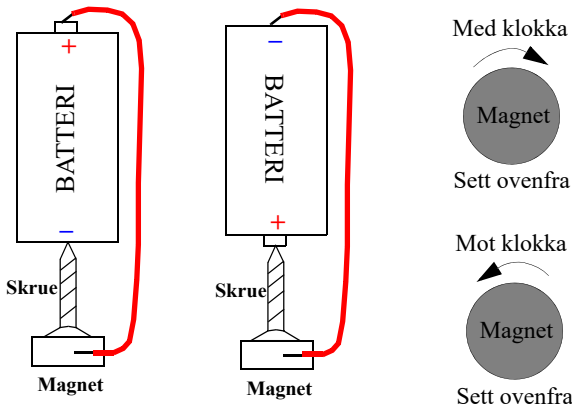
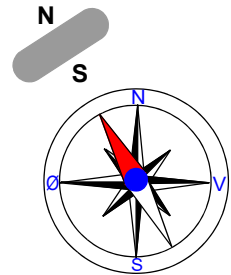
La oss undersøke hvordan rotasjonsretningen avhenger av strømretningen og hvilken vei magneten står.

Eksperiment: 26 Utforskning av enkel homopolar motor

I tillegg til batteriet, ledningen, skruen og neodymmagneten, trengs et kompass.

Ta av magneten og la den nærme seg kompasset, som vist på figuren til høyre. Den røde siden av kompassnåla peker mot sørpolen på magneten. Merk denne siden av magneten med en S.

Vi skal nå undersøke hvilken vei magneten roterer avhengig av retningen på batteriet og magneten.



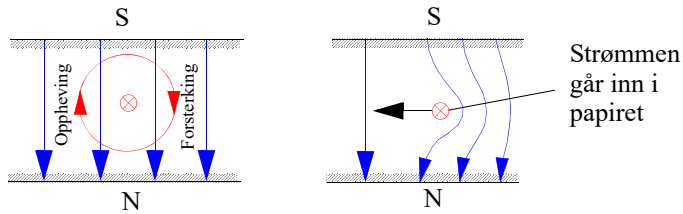
Fyll inn i tabellen hvilken vei magneten roterer, med eller mot klokka, når:

	Batteri + opp	Batteri + ned
Magnet sør opp		
Magnet sør ned		

For å forstå hvilken vei kraften virker, må vi tenke oss at feltlinjene på den høyre siden av den radielle strømmen peker *i samme retning* som feltlinjene i neodymmagneten. De vil derfor forsterke hverandre (se figur under). På venstre side vil feltlinjene fra den radielle strømmen og



neodymmagneten peke *i motsatt retning*, og feltet vil dermed oppheve hverandre og bli svekket. Det forsterkede magnetfeltet på høyre side vil dermed skyve den radielle lederen mot venstre der feltet er svekket.

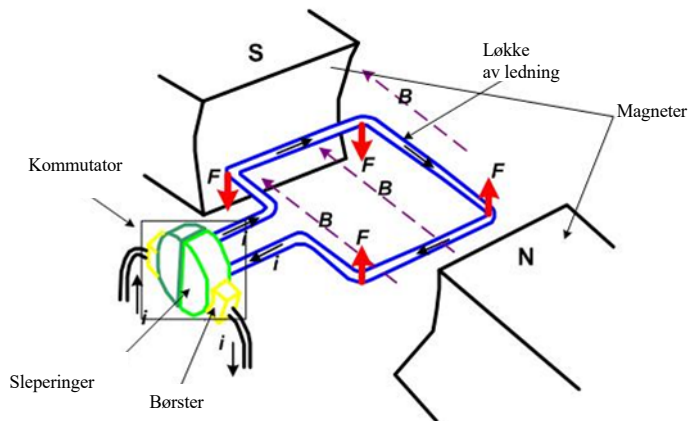


Når vi nå er innforstått med at det virker en kraft på en strømførende ledning i et magnetfelt, kan vi gå over til å se på hva som skjer i en likestrømsmotor.

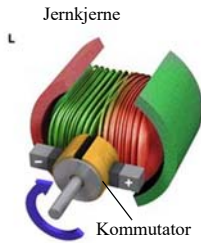
7.5 Likestrømsmotoren

For å forstå hvordan en likestrømsmotor fungerer tar vi utgangspunkt i en strømførende ledning i et magnetfelt.

I figuren til høyre har vi laget en sløyfe av en elektrisk ledning og plassert den i magnetfeltet mellom polene på to magneter. Vi husker at en strømførende ledning i et magnetfelt vil påvirkes av en kraft. Siden strømmen på høyre og venstre side av sløyfa går motsatt vei i forhold til retningen til magnetfeltet, vil kreftene som virker på sløyfa forårsake en dreining som vist på figuren til høyre. Så lenge sløyfa



befinner seg i magnetfeltet, vil krafta vare ved. Vi legger imidlertid merke til at når sløyfa står vertikalt, så opphører rotasjonen, med mindre vi klarer å snu kraften slik at den drar sløyfa videre rundt i magnetfeltet. Dette er bare mulig dersom strømmen i sløyfa skifter retning, dvs. vi må bytte polaritet på strømkilden.



Dette skjer ved at strømmen føres inn i sløyfa gjennom en såkalt *kommutator*. Dette er en bryter som skifter strømretningen etter som den roterer. Dette vises tydelig på figuren over. B - angir magnetfeltet (magnetisk fluks), F - kraften på sløyfa og i den elektriske strømmen. Ved å øke antall vindinger i sløyfa økes kraften, dersom strømmen opprettholdes.

Sløyfa som roterer kalles en *rotor*, mens magnetene som ligger fast i huset til motoren kalles *stator*. Dersom rotoren består av mange sløyfer kaller vi den en *spole*. Spolen på rotoren er gjerne viklet på en jernkjerne satt sammen av tynne blikkplater. Dermed konsentreres den magnetiske fluksen (styrken på magnetismen gjennom solen) slik at virkningsgraden på motoren øker.

La oss se på en liten likestrømsmotor som elevene kan lage selv:

Eksperiment: 27 Lag en enkel likestrømsmotor med roterende spole

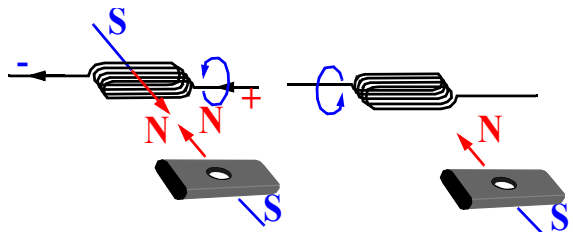
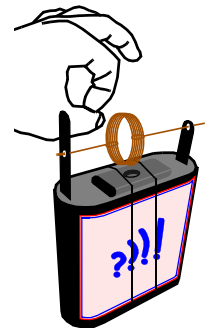
Til dette eksperimentet trengs en magnet fra en dørlås, et 4,5 Volts batteri, en lakkisolert kobbertråd (ca. 40 cm lakkisolert kobbertråd f.eks. $\text{\O} 0,7$ mm), en bor eller syl, tape og en kniv eller litt smergelpapir.

Rotoren lages av ca. 40 cm lakkisolert kobbertråd som stikker ut til hver side som en aksling. Den ene siden av akslingen avisoleres, mens den andre avisoleres *bare på oversiden* av tråden. To hull i polfjærene på batteriet fungerer som lager. Dørlåsmagneten festes på toppen av batteriet med en tape og fungerer som *stator*. Statoren er den delen av motoren som er i ro.

Det er viktig at oppskriften følges meget nøye for at motoren skal fungere, se derfor detaljert byggebeskrivelse nedenfor.

Når de uisolerte delene av akslingen berører batteripolene, vil det gå en strøm gjennom spolen som danner rotoren. Spolen blir en elektromagnet, som vekselvis vil frastøtes og tiltrekkes av den permanente magneten (*statoren*), slik at motoren går.

Når rotoren har rotert en halv omdreining, vil den isolerte delen av akslingen bryte strømmen i spolen. På grunn av treghet fortsetter den å rotere til det igjen begynner å gå strøm i spolen, og motoren får et nytt "spark" (se figuren over).



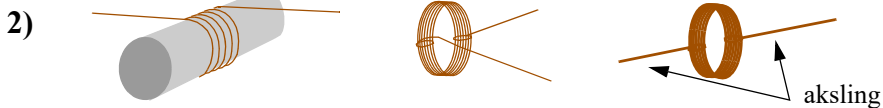


Dersom all isolasjonen var blitt fjernet på begge sider av akslingen, ville det ha gått strøm i spolen hele tida. Da ville elektromagneten i halvparten av tida bli tiltrukket av magneten og i den andre bli frastøtt, og motoren ville dermed ha låst seg i én stilling.

1. Bor et 1,5 mm hull i hver av polfjærene på batteriet. Avstanden fra batteriet til hullet skal være 15 mm (se figur 1 til høyre).
2. Vi skal nå vikle *rotoren* til motoren. Det første vi gjør, er å legge kobbertråden åtte runder rundt fingeren eller en rundpinne (figur 2), slik at vi får en ring av kobbertråd.

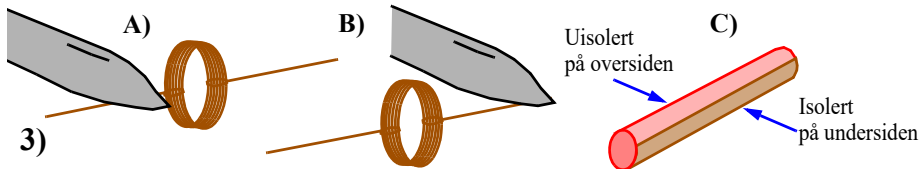
Ta trådringen av pinnen, stikk endene gjennom den samme ringen noen ganger og stram slik at spolen holdes sammen.

De to endene festes mest mulig rett overfor hverandre, slik at de stikker diametralt og rett ut fra ringen (figur 2). Disse endene fungerer som motorens aksling.



3. Vi skal nå lage strømtilkoblingen (*kommutatoren*) (figur 3).

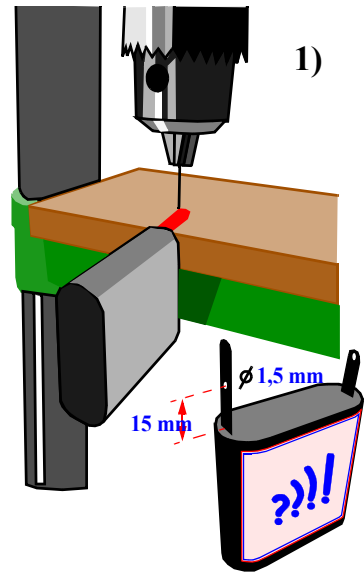
A) Bruk en skarp kniv eller fint smergelpapir til å skrape/pusse av all lakkisolasjonen på den ene siden av akslingen.



B) På den andre siden av akslingen skrapes isolasjonen bare av på *oversiden* av ledningen. Legg merke til orienteringen til spolen (vertikalt) når du skraper bort isolasjonen.

C) Kommutatoren hos en elektromotor skal snu strømretningen i rotoren, slik at den permanente magneten alltid skal gi rotoren et puff i riktig retning. I stedet for å snu strømmen, slår vi i denne enkle motoren, av strømmen i halvparten av tida.

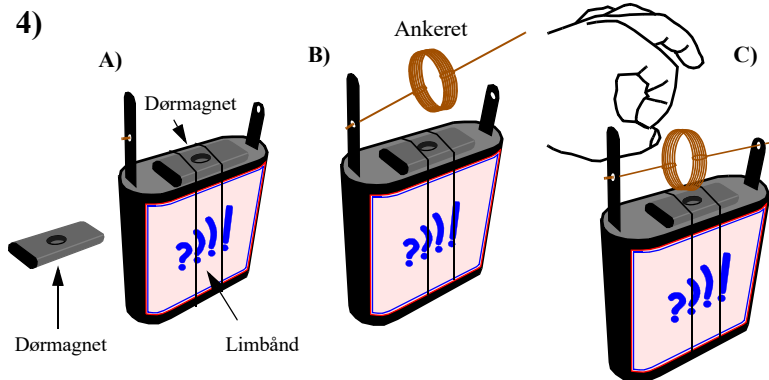
4. Vi er nå klare til å sette sammen motoren.





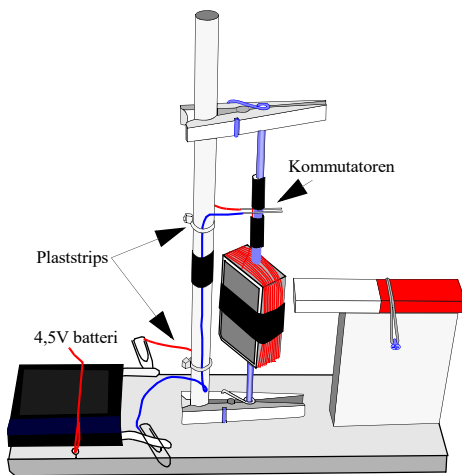
A) Fest magneten til batteriet med litt tape (figur 4 A)

4)



B) Tre rotoren på plass ved å stikke akslingen gjennom hullene i polfjærene på batteriet (figur 4 B).

C) Nå er vi klare til å starte motoren for første gang. Pass på å holde motoren vannrett og knips lett på rotoren til det begynner å gå rundt av seg selv (figur 4 C).



Som vi skjønner så er dette en meget enkel motor med en særdeles primitiv kommutator. I stedet for at strømmen snus så slås den bare av i halve perioden. Siden rotoren har en tyngde og relativt lite friksjon, så vil den fortsette å rotere til den igjen får tilført elektrisk strøm.

Den neste motoren er derfor mer lik en ordentlig likestrømsmotor hvor strømmen snus.

Det er kommutatoren som sørger for at strømmen i spolen snus med rotasjonen, dermed vil puffet som permanentmagneten gir spolen, hele tida virke i samme retning. Den forrige motoren var derfor enklere og mindre effektiv, da den bare avbrøt strømmen slik at rotorens magnetfelt ikke skulle bremse farten.

Dersom en lykkes med kommutatoren, virker denne fyrstikkeskemotoren svært godt. Det er imidlertid viktig med en kraftig stavmagnet.

Ekspiriment: 29 Lag en fyrstikkeskemotor med kommutator

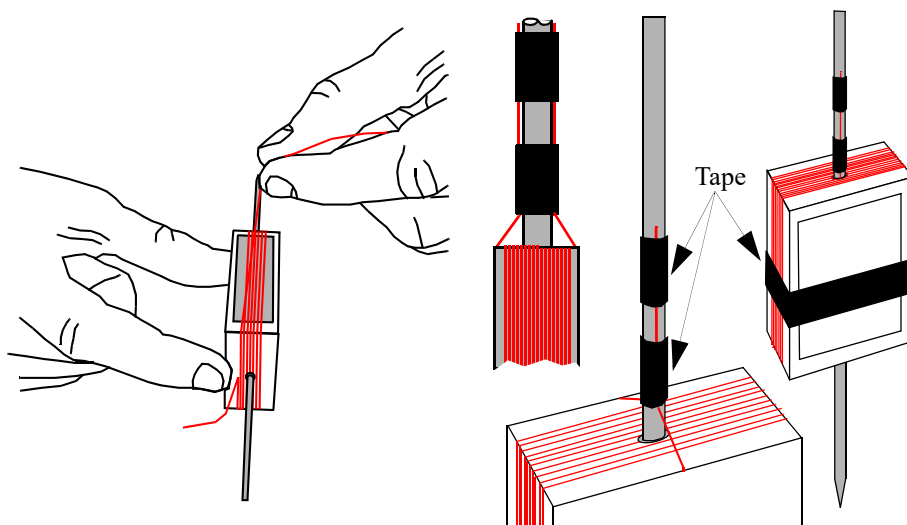
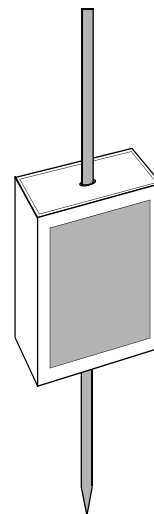
Til denne motoren trenger du følgende:



- Materialer: Tom fyrstikkeske
 Strikkepinne eller grillpinne (ikke for lang og så tynn at den passer inn i hullene på fjærene på klesklypene)
 To klesklyper
 20 - 25 cm rundstav med diameter 10 mm
 3 meter, 0,7 mm lakkisolert vikletråd
 4,5 V batteri (ev. 2 koblet i serie til 9 V)
 Rød og blå ledning (2 · 25 cm)
 Isolasjonstape eller krympestrømpe
 Tremateriale til bunnplate og sokkel for stavmagnet(er)
 Treskruer for feste sokkel og magneten
 Stavmagnet (Fredriksson)
 To små øyeskruer (for feste av batteri)

- Verktøy: Kniv
 Boremaskin
 Syl

Tøm fyrstikkesken og stikk et hull midt på begge kortsidene med en syl, slik at grillpinnen akkurat går gjennom, men blir sittende fast i esken. Kutt grillpinnen i den butte enden slik at den blir ca. 23 cm.



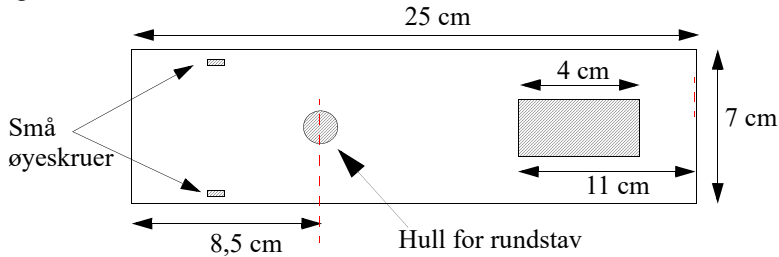
1. Stikk grillpinnen gjennom hullene i esken, slik at den stikker like langt ut på begge sider.
2. Vikle kobbertråden rundt fyrstikkesken som vist på figuren over. Påse at de to endene kommer opp på samme side av esken, men på hver side av grillpinnen. Skrap av isolasjonen på de to endene av kobbertråden med en kniv.



3. Fest de to avisolerte endene opp langs hver side av grillpinnen med tape eller krympestrømpe. Det er viktig at ledningene legges på de *to* sidene av grillpinnen som vender ut mot den lengste siden av fyrstikkeskens kortende, som vist midt på figuren over.

Vi har nå laget den delen av motoren som skal gå rundt (*rotoren*).

4. Skjær til ei bunnplate på $1 \cdot 7 \cdot 25$ cm og en rundstav på 20 – 25 cm med en diameter på 10 mm (tykke blomsterpinner kan også brukes). Bor et hull i plata og fest rundstaven i hullet som vist på figuren under.

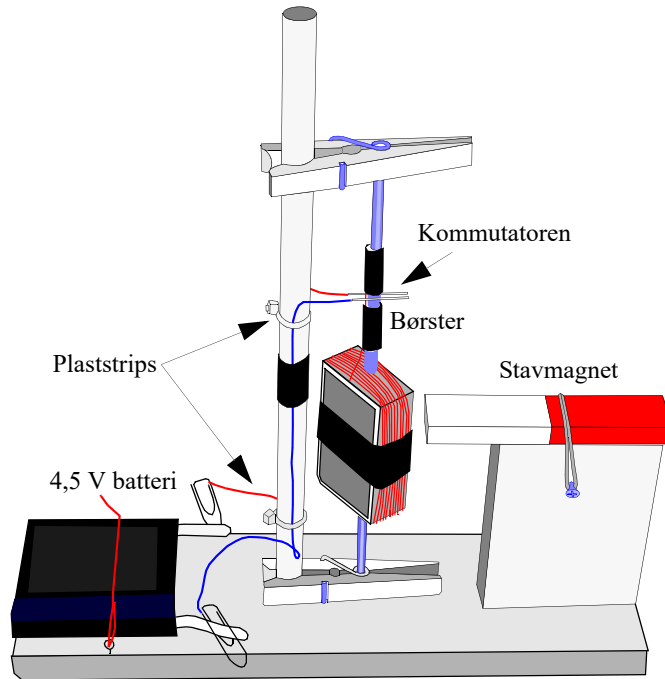


5. En kloss $2 \cdot 4,5 \cdot 8,5$ cm festes på høykant til høyre på plata ved hjelp av to skruer skrudd inn fra undersiden. På denne klossen legges stavmagneten. Vi kan også sløyfe klossen og bare holde magneten nær langsidene av fyrstikkesken.
6. Fest en klesklype nederst og en øverst på rundstaven, som vist på figuren under. Plasser grillpinnerotoren mellom de to klesklypene, slik at endene til grillpinnen stikker inn i hullene i spiralfjærene på klesklypene. Pass på at den spisse enden peker nedover.
7. Kutt til to plastisolerte ledninger (enleder) med en lengde på 25 cm hver. Ta av ca. 2 cm isolasjon i den ene enden av ledningene (“langenden”) og 5 mm i den andre (“kortenden”). Lodd to binderser til “kortenden”. Disse skal kobles til batteriet.
8. Fest de to ledningene med tape eller plaststrips opp langs hver side av rundpinnen, slik at de uisolerte endene av “langendene” berører de avisolerte ledningene som ligger langs strikkepinnen. Dette er motorens *kommutator*, og ledningene som berører ledningen på rotoraksen kalles *børster*.
9. Koble 4,5 Volts batteriet til bindersene og legg stavmagneten på klossen, slik at den roterende fyrstikkesken passerer tett ved ende magneten. Sett fyrstikkesken i bevegelse og se hva som skjer.

Dersom motoren ikke roterer, kan det komme av at ledningene som skal berøre ledningsendene langs grillpinnen, ikke har god nok kontakt idet de passerer. Kommutatoren skal tilføre den roterende spolen strøm akkurat idet spolen passerer forbi stavmagneten. Når spolen får spenning, vil den danne et magnetfelt som sammen med magnetfeltet rundt stavmagneten vil gi spolen et “spark” i rotasjonsretningen. Spolen vil få et nytt “spark” i samme retning når den har rotert en halv omdreining. At “sparket” gis i samme retning, skyldes at kommutatoren i mellomtiden har snudd strømretningen i spolen.



Vi skjønner derfor at det er viktig at strømmen tilføres spolen akkurat på rett tidspunkt.



7.6 Børsteløse motorer

I dette avsnittet skal vi se nærmere på *børsteløse motorer* som er blitt særdeles populære i hobby-sammenheng. Disse er små og meget kraftige og raske motorer med store mulighet til å regulere farten. Det er også en slik motor som brukes i Marinteks båtprosjekt.

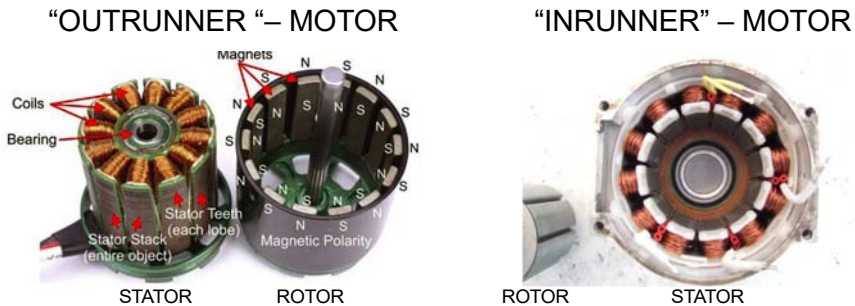
Vi vil i dette avsnittet gjennomgå virkemåten til slike motorer, for deretter å sammenligne børsteløse motorer med tradisjonelle likestrømsmotorer med børster. Til sist skal vi også vise hvordan motoren kobles opp i båten.

7.6.1 To hovedtyper av børsteløse motorer

De motorene vi skal se på er alle basert på permanentmagneter, gjerne kraftig neodymmagneter. Magnetene er alltid montert på rotoren. Rotoren behøver imidlertid ikke å være i sentrum av motoren slik den vanligvis er for tradisjonelle likestrømsmotorer. Figuren under viser to varianter: "Outrunner" som er en motor hvor rotoren med permanentmagnetene omslutter statoren med spo-



ler som ligger i sentrum (figuren under til venstre). Hos “Inrunner” motorene ligger spolene på utsiden og rotoren med permanentmagnetene er en sylinder plassert i sentrum av motoren (figuren under til høyre).



Siden disse motorene ikke har børster som skifter strømretningen slik at kraften som virker på rotoren hele tiden er i dreieretning, så må de utstyres med styreelektronikk som sørger for at strømretningen i hver av spolene hele tiden er optimal.

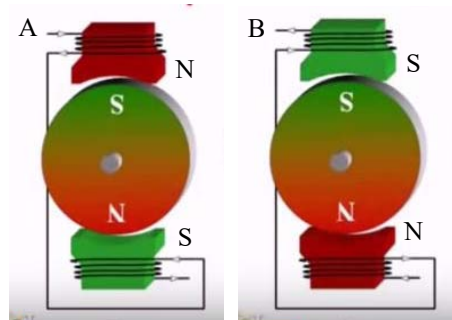
I båtprosjektet brukes motoren CF2822 EMAX som er en “outrunner” som vist på figuren til høyre. Den veier 39 g og er 46 mm lang og har en ytre diameter på 28 mm. Den er optimalisert for en spenning på 11,1 V (3S - 3 celler LiPo). Den har en KV = 1200, hvilket betyr at den har et maksimalt antall omdreining pr. minutt og volt (RPM/V) lik 1200 RPM/V. Med en omdreiningshastighet på 6100 RPM har den en drivkraft på 740 g og trekker da 14,5 A (pulset).



Med en så stor fart og kraft vil dreiemoment bli svært stort, hvilket gjør at den kan gi alvorlige kuttskader ved bruk av store propeller.

7.6.2 Virkemåten til børsteløse likestrømsmotorer

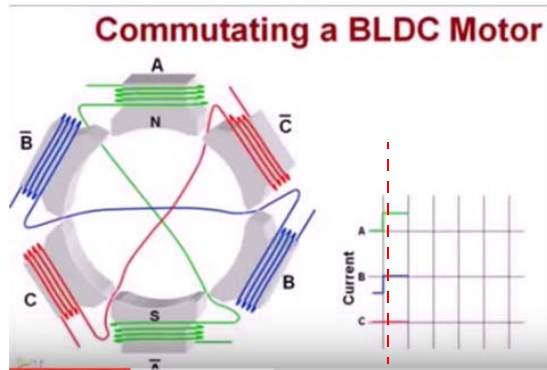
Figuren til høyre viser to spoler (stator) og en sirkulær magnet (rotor) mellom de to spolen. Spolene er viklet slik at når den øverste spolen danner en nordpol inn mot rotoren så vil den andre danne en sørpol inn mot rotoren. Dersom vi snur strømmen i spolene vil polariteten på elektromagnetene (spolene) snu, dvs. vi får en sørpol inn mot rotoren øverst og nordpol inn mot rotoren nederst.





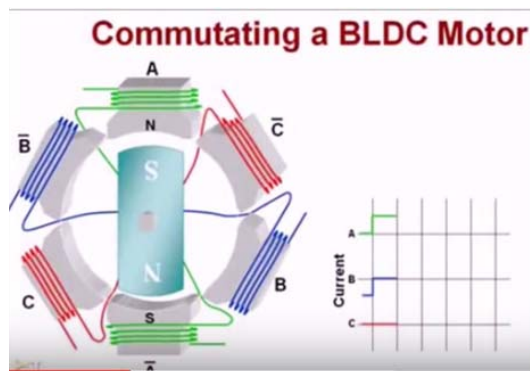
Til høyre på figuren (A) er rotoren i en stabil tilstand, og vil om ingenting gjøres bli stående i ro. For å få bevegelse i rotoren må vi skifte polariteten på elektromagnetene, hvilket vi gjør ved å snu strømretningen i spolene (fra (A) til (B)). Da vil rotoren være i en labil stilling og vil ønske å dreie 180° slik at sørpolen vender nedover. I prinsippet vil det være likegyldig hvilken vei motoren går for å oppnå sin nye stabile tilstand. Dette er normalt ikke noe problem når rotoren er i fart.

Børsteløse motorer har normalt mer enn to spoler. La oss gå et skritt videre og se hvordan en motor med seks spoler (AA, BB og CC) fungerer. Som det framgår av figuren til hyre²⁸ så er to og to diametralt motstående spoler koblet sammen slik at de alltid har motsatt polaritet inn mot rotoren. Diagrammet til høyre i figuren antyder hvilke spolepar som har spenning og hvilke som er avslått til en hver tid.



På bildet til høyre ser vi inn i motoren akkurat idet spolene AA er slått på, mens BB og CC er avslått (stiplet linje i diagrammet). Rotoren er for anledningen avslått. Legg spesielt merke til at spenningene kan være både positive og negative.

På figuren til høyre har vi satt inn statoren som her er vist som en stavmagnet. Slik situasjonen er, så vil magneten bli værende i denne tilstanden. Sørpolen på magneten peker mot nordpolen på stator-viklingen A, og nordpolen på magneten peker mot sørpolen på stator-viklingen A-bar.

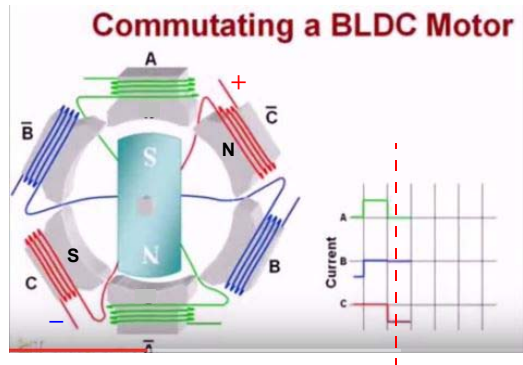


Nå er det ikke slik vi ønsker det. Vi ønsker at rotoren skal settes i rotasjon f.eks. fra venstre mot høyre, dvs. med klokka.

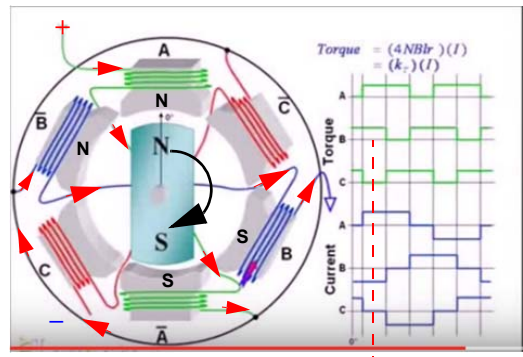
28. Figurene i dette avsnittet er hentet fra: <https://www.youtube.com/watch?v=ZAY5JInyHXY>



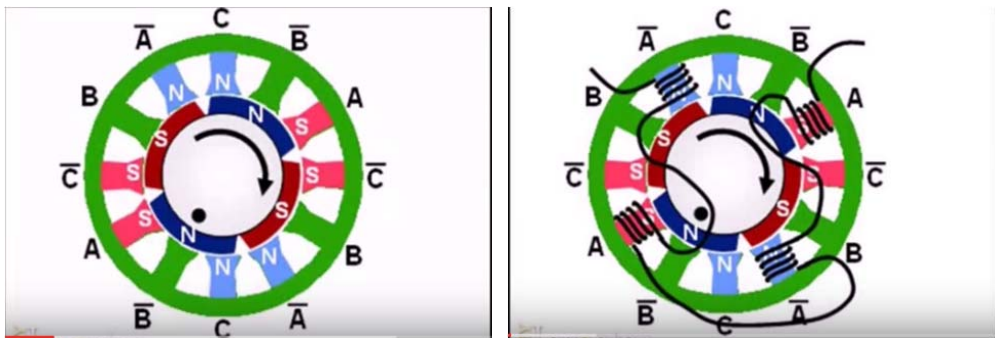
Skal vi få til dette må vi slå av spenningen på spolene \overline{AA} og sette spenning på spolene \overline{CC} slik at disse drar rotoren mot høyre, dvs. vi trenger en nordpol ved spole \overline{C} . Dette får vi til ved å slå av spenningen på \overline{AA} og sette en negativ spenning på spoleparet \overline{CC} som vist på figuren til høyre. Dette vil medføre at stavmagneten i sentrum dreies med klokka. Slik kan vi fortsette fra spole til spole hele veien rundt.



Den neste figuren viser hvordan vi kan koble opp de seks spolene slik at tilkoblingen sett utenfra blir meget enkel. Vi ser at den ene enden av hvert av de tre spoleparene er koblet sammen (sort ring) slik at vi sitter igjen med tre enkle tilkoblinger. På figuren antydes det at spolene \overline{A} og \overline{B} har nordpol inn mot rotor, mens \overline{A} og \overline{B} har sørpoler inn mot rotoren.



Som nevnt vil en børsteløs motor ha mange spoler, og et antall på 12 er ikke uvanlig som vist på figuren under. Her vil fire og fire spoler være koblet sammen i serie som vist til høyre på figuren. Disse vil igjen være forbundet til et felles nøytralt punkt slik at vi fortsatt ender opp med kun tre tilkoblinger. Disse tre tilkoblingene forbindes til en styreelektronikk (ESC - Electronic Speed Control)



Ved å variere tiden mellom hver puls kan vi kontrollere hastigheten meget nøyte.



7.6.3 Fordeler og ulemper med børsteløse motorer

Den tradisjonelle likestrømsmotoren ble første gang demonstrert i 1879, det skulle imidlertid gå over 80 år før den børsteløse motoren så dagens lys. Ikke fordi man ikke kjente prinsippet, men fordi teknologien ikke var moden. Som vi nå skjønner krever den børsteløse motoren en relativ kompleks styringselektronikk som kan koble store strømmer til og fra i et stort tempo. Når denne først var tilgjengelig så har de børsteløse motorene en rekke fordeler som antydnet i tabellen under.

Børstemotor	Børsteløs motor (BLDC)
– Utsatt for slitasje, mindre driftssikker	+ Mindre utsatt for slitasje
– Gnister fra børstene	+ Gnistfri
– Energitap i børstene	+ Ingen energitap fra børster
– Støyende og dårlig mht EMC ^a	+ Ingen børstestøy, god mht. EMC
– Spoler på rotoren, økt slitasje	+ Spoler på statoren, redusert slitasje
– Mindre dreiemoment pr. vekt	+ Større dreiemoment versus vekt
+ Ingen styreelektronikk	– Kompleks og dyr styreelektronikk

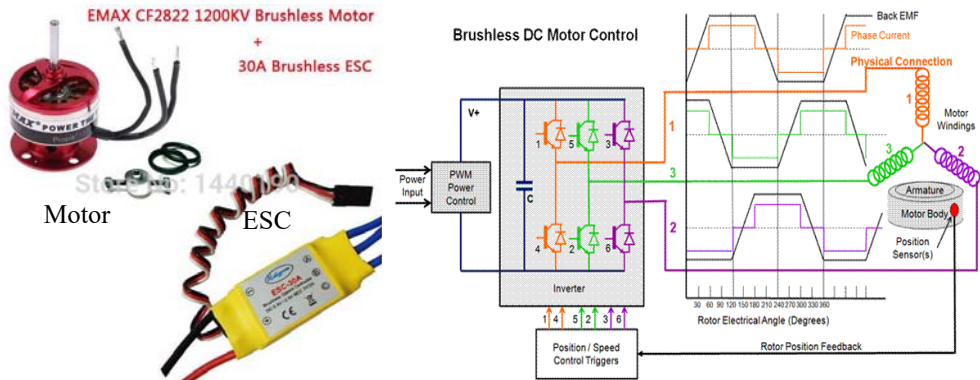
- a. EMC - Electromagnetic Compatibility (at ulike elektroniske innretning forstyrrer hverandre)

7.6.4 Styreelektronikk – ESC (Electronic Speed Control)

Styreelektronikken leveres i små pakker med to terminaler for batterispenningen inn og tre terminaler for å styre en motor (se figuren under til venstre). I tillegg leveres slike enheter med en ekstra ledning for styreformål. Denne styreledningen vil normalt kobles til en mikrokontroller med pulsbreddemodulert utgang eller en RC-radiomottaker (Radio Control).

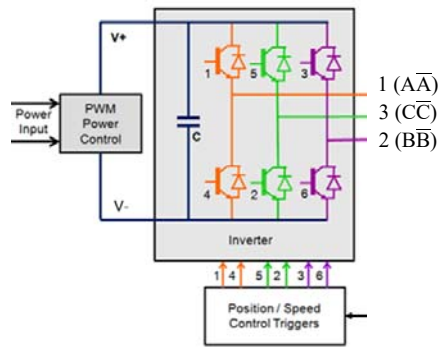


Til venstre på figuren under er vist en motor ala den som brukes i b tprosjektet til Marintek med tilhørende ESC. Til høyre er vist et prinsippskjema for virkemåten til ESC-en.



Det vi spesielt bør merke oss er de seks halvlederbryterne som er plassert i den grå boksen på figuren. Dette er transistorbrytere som sørger for å legge spenningen negativ eller positiv i forhold til nøytralpunktet til riktig tidspunkt. I denne tegningen har en benyttet 1, 2 og 3 for spolene (lengst til høyre på figuren) i stedet for \overline{AA} , \overline{BB} og \overline{CC} .

Ved å slå på transistor 1 og slå av transistor 4, så f r \overline{AA} en positiv puls. Ved å slå på transistor 4 og slå av transistor 1 f r \overline{AA} en negativ puls. Slik kan en med PSCT-elektronikken (Position / Speed Control Trigger) sørge for at de riktige spolene f r pulser til riktig tid slik at vi også kan kontrollere farten.



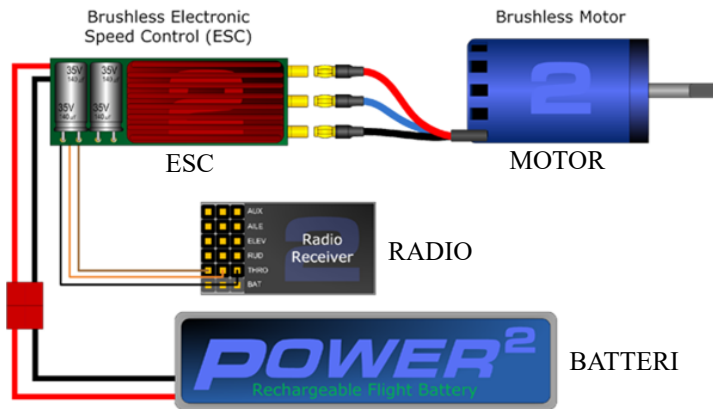
Styresignalet inn på ESC-enheten er vanligvis et pulsbredde modulert digitalt signal. Dvs. det består av et tog av elektriske pulser hvor man kan endre lengden (bredden) av pulsene. Elektronikken er laget slik at en pulslengde på 1500 ms (millisekunder) at motoren skal stå stille. Dernest vil en pulslengde på mellom 1500 – 2000 ms bety at den skal bevege seg framover med en fart som er økende med økende pulslengde. En pulslengde på mellom 1500 – 1000 ms vil bety at motoren skal gå bakover med økende fart etter som pulslengden avtar.

Dersom en slik motor viser seg å gå motsatt vei av hva man forventer, så er det bare å bytte om på to av de tre tilkoblingene, uansett hvilke.



Oppkobling i båten

OPPKOBLING AV STYRESYSTEM FOR BØRSTEFRI MOTOR

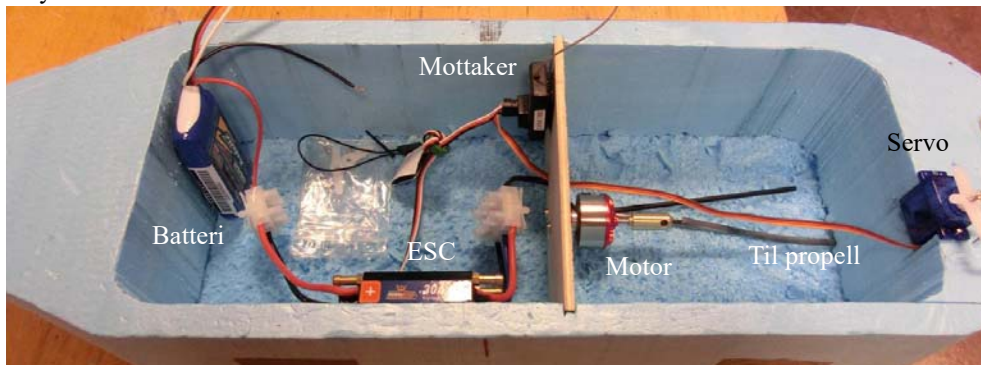


Til slutt i dette kapitlet skal vi se hvordan vi kobler sammen de ulike delene av motorsystemet i båten. Vi ser i første rekke kun på oppkobling av motoren og ser i denne sammenhengen bort fra servoen som brukes til å styre roret.

Figuren til venstre viser på en oversiktlig måte oppkobling av styresystemet for motoren. Det viktigste er å sørge for at vi vet hvilken kanal på

mottakeren som er koblet til fartskontrollen på fjernstyringsenheten. I eksempelet over nest nederste kanal valgt for å styre farten på motoren.

Bildet under viser det ferdig monterte systemet i båtskroget, hvor vi ser servoen for roret er ytterst til høyre.







8 Fra elektrisk energi til lys (LED) – pn-overgangen

I dette kapittelet skal vi se hvordan elektrisk energi kan omdannes til lysenergi i lysstoffrør og LED, og hvordan lysenergi kan omdannes til elektrisk energi ved hjelp av solceller. For å kunne forstå hva som skjer i disse to energiomvandlerne så må vi kunne litt grunnleggende halvlederfysikk. La oss derfor begynne med å studere halvledermaterialet og deretter pn-overgangen.

8.1 Halvledere og pn-overgangen

I dette avsnittet skal vi se hvordan vi kan forklare virkemåten til lysdioder og solceller. Begge disse teknologiske innretningene har et felles fundament. La oss begynne med å se på det periodiske system (eller periodesystemet).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H	Atomic Sym	[C] Fast stoff															2 He
2	3 Li	4 Be	[Hq] Væske															
3	11 Na	12 Mg	[Rf] Ukjent															
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57–71 Lantanoider	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89–103 Aktinoider	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo

For grunnstoffer uten stabile isotoper er massetallet for isotopen med lengst halveringstid oppgitt i parentes.

57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Periodesystemet Design og grensesnitt kopierrett © 1997 Michael Dayah Plabik.com Sist oppdatert 20. sep. 2014

Figur 8.1 Det periodiske system.

Det periodiske systemet ordner grunnstoffene på en systematisk måte i rader og kolonner. Atomnummeret angir hvor mange protoner og elektroner hvert atom inneholder. Raden angir hvor mange “skall” elektronene er ordnet i. Som vi ser så finnes det bare to grunnstoffer, hydrogen (H) og helium (He) som bare har ett “skall”. Derneft er det ytterligere åtte grunnstoffer som har to “skall” osv. De mest kompliserte grunnstoffene som er kjent i dag har elektroner ordnet i opp til 7 “skall”.

Kolonnene angir på sin side antallet elektroner i valensskallet og er særdeles viktig for atomenes evne til å danne bindinger.



Til venstre i det periodiske system finner vi grunnstoffer som lett avgir elektroner, dette gjelder blant annet metallene, vi sier at disse stoffene er *svakt elektro-negative*. Til høyre i systemet finner vi grunnstoffer som lett opptar elektroner, vi sier at disse er *starkt elektro-negative*. Dette gjelder *ikke-metaller*. Mellom disse to gruppene finner vi halvmetallene som bl.a. omfatter germanium og silisium som er vanlig brukt i lysdioder, solceller og annen halvleder-teknologi som transistorer og integrerte kretser.

H	Electronegativity Values for Some Elements					
2.20						
Li	Be	B	C	N	O	F
0.98	1.57	2.04	2.55	3.04	3.44	3.98
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl
0.90	1.31	1.61	1.90	2.19	2.58	3.16
K	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br
0.82	1.00	1.81	2.01	2.18	2.55	2.96

Figur 8.2 Verdier for elektro-negativitet for noen utvalgte grunnstoffer

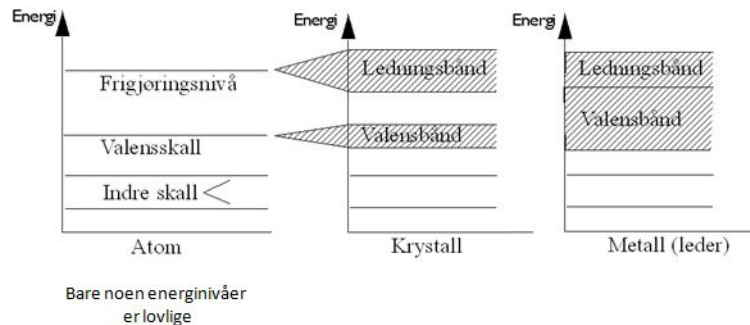
Elektro-negativitet er et uttrykk for mange sentrale egenskaper ved de ulike atomene, og som er spesielt viktige for kjemiske bindinger.

Figur 8.2 viser verdier for elektro-negativitet for noen utvalgte grunnstoffer. Vi ser at karbon, silisium og germanium har verdier fra 1,9 til 2,55. Mens f.eks. oksygen og fluor har høyere verdier (3,44 og 3,98).

Som tidligere omtalt så kan elektronene som er knyttet til et atom ordnes i orbitaler hvor hver orbital inneholder elektroner med et gitt energinivå, også omtalt som “skall” i Bohrs atommodell²⁹. De elektronene som har størst energi og som likevel fortsatt er knyttet til atomet, befinner seg i det såkalte “valensskallet”.

Elektronene i valensskallet vil, dersom de tilføres tilstrekkelig med energi, frigjøres fra atomet og vil kunne bevege seg fritt rundt i materialet. Som nevnt er det hovedsakelig egenskapene til valensskallet som bestemmer stoffets evne til å inngå kjemiske bindinger med andre stoffer.

I figur 8.3 ser vi en meget forenklet illustrasjon av de ytterste *energibåndene* for atomer som er organisert i krystaller og metaller. Tradisjonelt har en tenkt seg at elektronene befinner seg i ulike “skall” med forskjellig avstand fra kjernen (Bohrs atommodell). Elektronene som befinner seg i de forskjellige “skallene” har økende energi avhengig av “skallets” avstand fra atomkjernen. “Skallene” kan ikke ha et hvilket som helst energinivå, kun bestemte energinivåer er lovlige i følge kvanteteorien. Elektronene som befinner seg i “valensskallet” er de mest energirike.



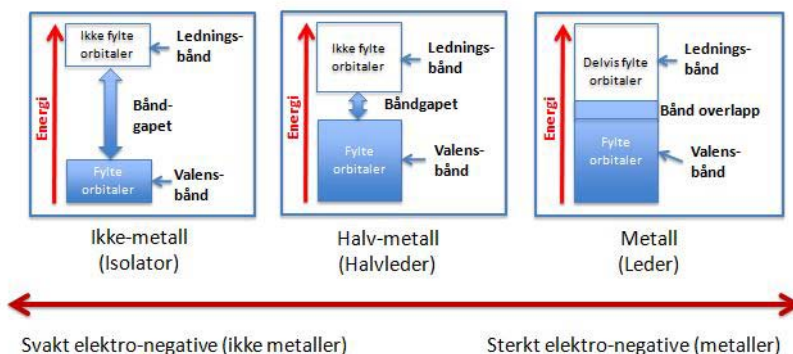
Figur 8.3 Forenklet illustrasjon av de ytterste energibåndene for atomer som er organisert i krystaller og i metaller.

29. Vi velger inntil videre å benytte begrepet “skall” og energibånd fra den gamle atom modellen til Bohr, da dette gir et relativt enkelt mentalt bilde av funksjon.



Når atomene binder seg til hverandre i et krystallgitter vil de påvirke hverandre slik at valensskallet for det enkelte atom vil bestå av en rekke lovlige energinivåer som befinner seg tett på hverandre. Vi snakker om et lovlig *energibånd*, i dette tilfellet *valensbåndet*.

For at elektroner skal frigjøres fra atomet og kunne bevege seg fritt omkring i materialet, så må de få tilført energi. Frigjorte elektroner vil bevege seg ut i det såkalte *ledningsbåndet*. Et stoff som har mange elektroner i

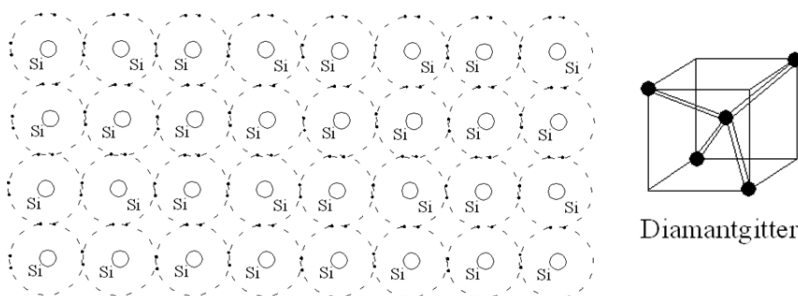


Figur 8.4 forenklet illustrasjon av de ytterste energibåndene for ikke-metaller, halvmetaller og metaller.

ledningsbåndet har mange frie ladningsbærere og egner seg godt som elektrisk leder.

Dersom det kreves mye energi til å “løfte” elektroner fra valensbåndet og ut til ledningsbåndet, så kaller vi disse stoffene for elektriske isolatorer. Dersom nødvendig energi for frigjøring er svært liten eller tilnærmet null så er disse gode ledere. Til høyre på figur 8.4 ser vi et stoff hvor valensbåndet overlapper ledningsbåndet. Det betyr at valenselektronene i prinsippet kan bevege seg fritt i materialet uten tilførsel av ekstra energi. Slike stoffer kalles *elektriske ledere* og mange *metaller* er av denne typen.

Figur 8.4 viser båndstrukturen for isolatorer (ikke-metaller), halvledere (halv-metaller) og for ledere (metaller).



Figur 8.5 Silisium (og Germanium) kan danne nærmest perfekte krystallgitter, og kan betraktes som en isolator. Begge disse stoffene brukes for fremstilling av halvledermaterialer.

Siden silisium har fire elektroner i valensskallet, vil de, når de binder seg til hverandre, oppnå en nærmest ideell binding ved å dele elektroner med fire naboatomer. De får da alle åtte elektroner i valensbåndet som er optimalt.



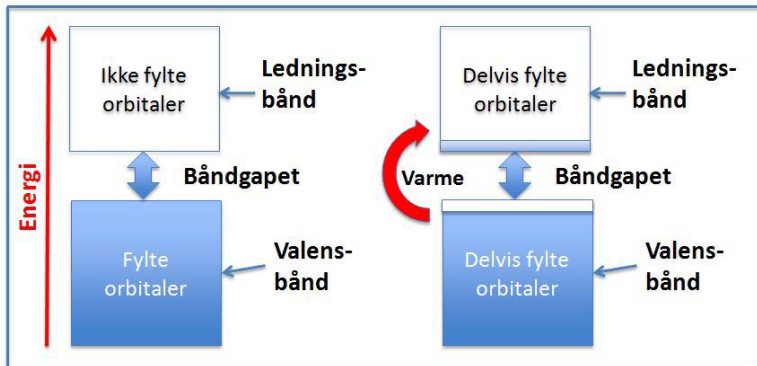
Tabell 4 oppsummerer egenskapene til sterke og svake elektronegative grunnstoffer.

Figur 8.6 viser båndstrukturen hos en halvleder. Vi ser at det er et energigap mellom valensbåndet og

ledningsbåndet (hos silisium er dette på 1,1 - 1.2 elektronvolt). Vi kaller dette for et *båndgap*. Det skal ikke mer til enn å varme opp materialet så vil elektroner få tilført nok energi til å bevege seg over i ledningsbåndet. Dette er også årsaken til at halvledere gjerne får økt ledningsevne når de varmes opp, hvilket i mange sammenhenger er en ulempe..

Tabell 4: Oppsummering av egenskapene til sterke og svake elektronegative stoffer.

Svak elektronegativitet	Sterk elektronegativitet
Gir lett slipp på elektroner	Holder på elektroner
Flere naboatomer i gitteret...	Flere naboatomer i gitteret
... men svak binding til naboene	... og sterk binding til naboene
Ikke retningsbestemte bindinger	Retningsbestemte bindinger
Intet båndgap (overlapp)	Båndgap
Elektrisk ledende	Elektrisk isolerende
Metallisk	Ikke-metallisk

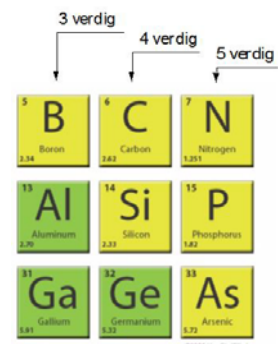


Figur 8.6 Båndstrukturen hos en halvleder.

Doping av silisium

Rent silisium kan nærmest betraktes som en isolator³⁰. For å endre ledningsevnen på en kontrollert måte, forurenses, eller *dopes* materialet. Det er to måter å gjøre materialet mer ledende på:

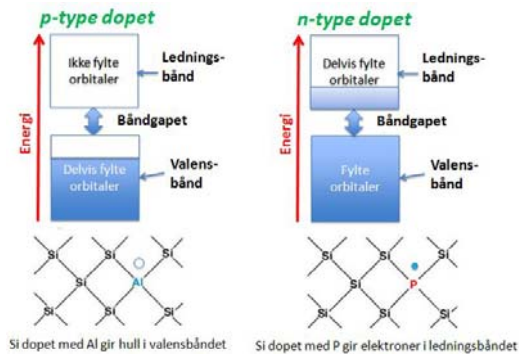
1. Ved å tilsette stoffer som har mer enn 4 elektroner i valensbåndet, f.eks. fosfor (P) som har 5 elektroner. På denne måten får man elektroner som ikke finner sin naturlige plass i silisiumgitteret og på den måten relativt lett lar seg flytte ut i ledningsbåndet. Slike stoffer kalles derfor *donorer*, og er stoffer som lett gir fra seg elektroner. På denne måten får også det dopede materialet som





helhet, en økning av frie elektroner og dermed økt ledningsevne. Vi sier at materialet har negativ-ladningsmobilitet og at det er *n-dopet*. I et n-dopet materiale er elektroner *majoritetsbærere* (de som hovedsakelig frakter ladning).

2. Ved å tilsett stoffer som har færre en 4 elektroner i valensbåndet, f.eks. bor (B) som har 3 elektroner, får man ikke fylt opp alle elektronposisjonene i silisiumgitteret, og man får ledige posisjoner som kan flytte seg dersom elektroner fra et naboatom fyller hullet. På den måten kan *hull* bevege seg fra atom til atom. Slike stoffer kalles derfor *akseptorer*; det vil si at det har en affinitet til elektroner. På denne måten får det dopede materialet en økning av hull som kan bevege seg, og dermed økt ledningsevne. Vi sier at materialet har *positiv-ladningsmobilitet* og at det er *p-dopet*, dvs. at hull er *majoritetsbærere*.

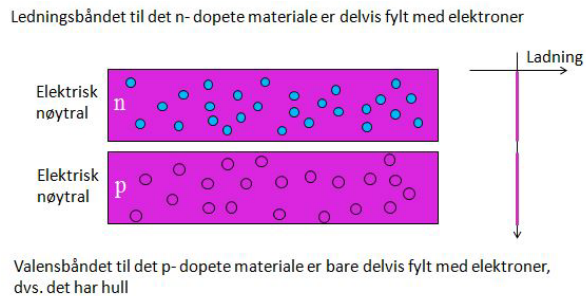


Figur 8.7 p- og n-doping av silisium.

Figur 8.7 viser hvordan doping med fosfor gir flere elektroner i ledningsbåndet, mens doping med bor gir flere hull i valensbåndet. Begge deler gir økt ladningsmobilitet, eller ledningsevne.

PN-overgangen

Normalt vil n-området være langt kraftigere dopet enn p-området. Hva skjer når vi fører n-dopet silisium sammen med p-dopet silisium? På figuren til høyre ser vi situasjonen rett før de to lagene føres sammen. Selv om det n-dopede laget har et “overskudd” av frie negative ladningsbærere, så er materialet *elektrisk nøytralt*, dvs. det er like mange elektroner som protoner i materialet. På samme måte er det i det p-dopede materialet et overskudd av positive ladningsbærere, men materialet er likevel *elektrisk nøytralt*.



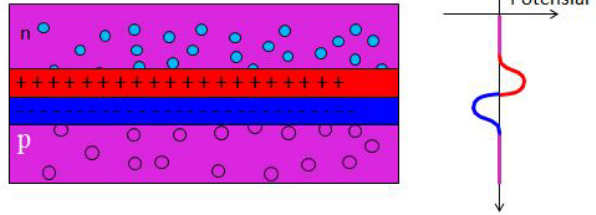
Figur 8.8 Både det n-dopede og det p-dopede materialet er elektrisk nøytrale før de føres sammen.

Vi husker at det n-dopede materialet omtales som donor og det p-dopede materialet som akseptor, dvs. at donor-materialet gir lett fra seg elektroner, mens akseptor-materialet lett tar til seg elektroner. *Evnen til å avgi og oppta elektroner bestemmes dels av stoffenes elektronegativitet, men også av graden av doping.*

30. Silisium har en motstandsverdi (resistans) lik 640 Ohm pr. meter, mens kobber til sammenligning har en motstandsverdi lik $1,72 \times 10^{-8}$ Ohm pr. meter.



Når de to materialene føres sammen vil det skje en diffusjon av elektroner fra den n-dopede siden til den p-dopede siden, hovedsakelig drevet av forskjell i konsentrasjon av ladningsbærere, men også av materialeegenskapene.³¹



Figur 8.9 Når vi fører de to materialene sammen vil det skje en utveksling av elektroner fra den n-dopede siden til den p-dopede siden.

Etter som flere og flere frie elektroner beveger seg over til det p-dopende området, vil det oppstå en potensialforskjell. Når pn-overgangen vil det n-dopede området bli positivt (mangel på elektroner) og det p-dopede området bli negativt (overskudd av elektroner). Samtidig vil pn-overgangen bli omtrent tømt for frie ladningsbærere (elektroner og hull). Etter som potensialforskjellen blir større og større vil strømmen av ladninger komme i balanse og potensialforskjellen stabiliseres. For silisium dopet med fosfor og bor vil potensialforskjellen være mellom 0,6 – 0,7 V. Dersom vi bruker andre tilsetningsstoffer, vil potensialforskjellen ha andre verdier. Egenskapene hos tilsetningststoffene og graden av doping bestemmer både potensialforskjellen i pn-overgangen (terskelspenningen) og båndgapet (fargen hos lysdioder).

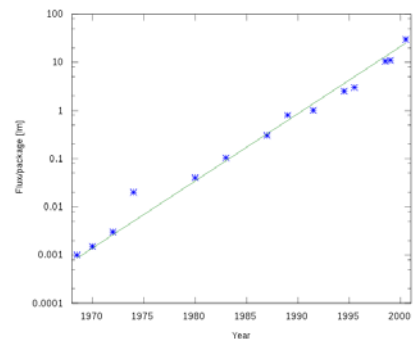
Vi skal nå anvende denne kunnskapen til å forklare LED og solceller i kapittel 9.

8.2 LED (Light emitting diode)

I de seneste årene er det blitt mer og mer vanlig å benytte lysdioder til belysning. Fra den første lysdioden så dagens lys i 1961 har det skjedd en enorm utvikling mht. virkningsgrad hos lysdioder, dvs. lysstyrke pr. tilført elektrisk effekt (lm/W).

Figur 8.10 viser hvordan lysstyrken fra en lysdiode har økt med årene. Vi legger merke til at den vertikale skalaen er logaritmisk. Nå er det ikke nødvendigvis slik at høy lysstyrke er det samme som høy virkningsgrad.

Selv om det er oppnådd høye virkningsgrader i laboratorier, kan vi i dag regne med at maksimalverdien ligger omkring 120 lm/W for hvitt LED-lys, med en levetid på mellom 50 – 100 000 timer. Til sammen-



Figur 8.10 Utviklingen av virkningsgraden hos lysdioder.

31. I praksis er det ikke et p- og et n-dopet materiale som føres sammen. Normalt gjøres dette ved at man har et svakt p-dopet materiale som varmes opp samtidig som en varm fosforforbindelse føres i dampform over det oppvarmede silisiumet. Etter som tiden går vil fosfor trenge inn i (diffundere) overflaten av silisiumet. Et lett dopet silisium kan inneholde 1 fosforatom for hvert 100 000 000 silisiumatom, mens et tungt dopet silisium kan inneholde 1 fosforatom for hvert 10 000 silisiumatom.

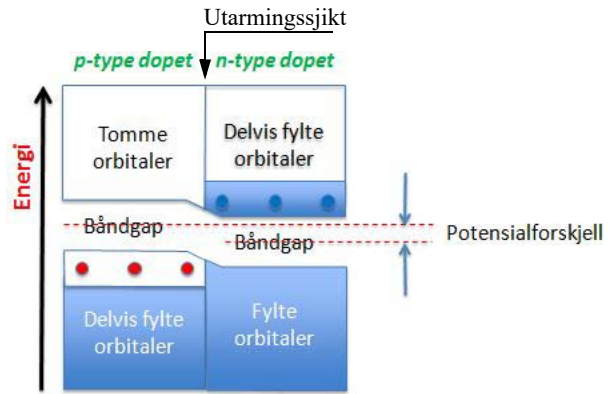


ligning har en tradisjonell glødelampe en effektivitet på ca. 15 lm/W og en levetid på ca. 2500 timer, mens et lysstoffrør har en maksimal virkningsgrad på typisk 100 lm/W og en typisk levetid på 10 000 timer.

8.2.1 Lysdioden (LED) - virkemåte

Figur 8.11 viser en skisse av energiforholdene i et tverrsnitt av pn-overgangen. Vi ser at det er oppstått en potensialforskjell mellom det p- og det n-dopede området slik vi beskrev. Som omtalt foran så bestemmes denne potensialforskjellen av hvilke stoffer vi har brukt i framstillingen av halvleder-materialene. Tilsetningstoffene bestemmer også båndgapene

Siden det har flytt elektroner fra n- til p-området så vil det være få frie ladningsbærere i dette området som av den grunn kalles *utarmingssjiktet*.



Figur 8.11 PN-overgangen etter at potensialforskjellen har oppstått.

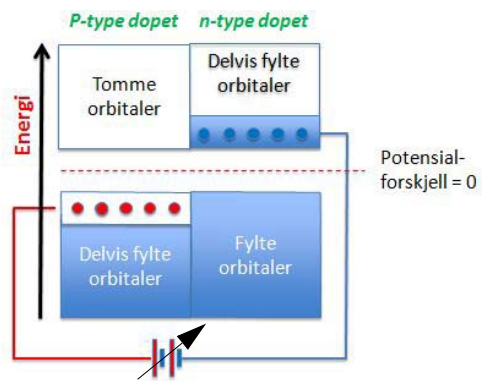
For at vi skal få avgitt lys, må elektronene avgi energi, det kan de gjøre ved å bevege seg fra n-siden til p-siden for så å falle ned i de ledige hullene på p-siden. Siden vi har en potensialforskjell mellom n- og p-siden så skjer ikke dette uten videre.

Ved å sette en spenning over lysdioden i lederetning, vil vi pumpe elektroner inn i n-området og trekke elektroner ut av p-området. På den måten oppheves potensialforskjellen og vi oppnår en situasjon som vist i figur 8.12. Nå kan elektronene på n-siden igjen flyte over til p-siden.

Idet de kommer over på p-siden, vil de falle ned i de ledige hullene i valensbåndet samtidig som de gir fra seg energi (til venstre på figur 8.13). Størrelsen på båndgapet vil bestemme hvor mye energi som avgis som lys. Energien som avgis vil også bestemme fargen på lyset.

Størrelsen på den tilførte spenningen før dioden begynner å avgi lys, kaller vi *terskelspenningen*.

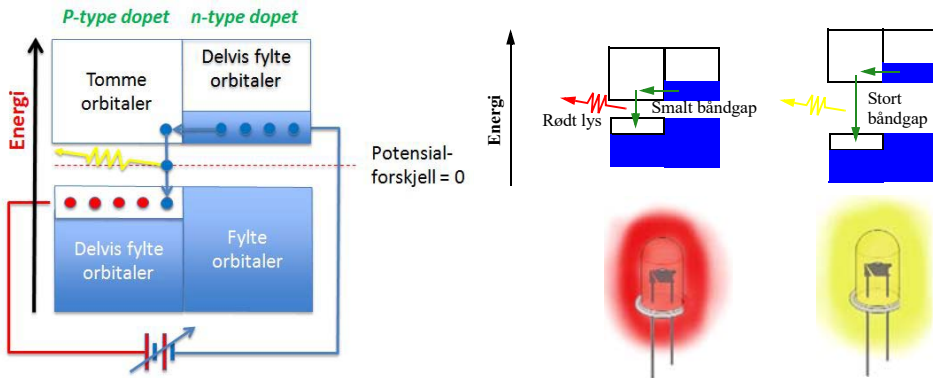
Jo større båndgap jo større energi avgis i fallet og jo mer er fargen flyttet mot kortere bølgelengder, dvs. mot blått eller ultrafiolett (UV). Et interessant spørsmål er nå om det er en sammenheng



Figur 8.12 Potensialforskjellen mellom p- og n-siden oppheves av en ytre spenningskilde.



mellom terskelspenningen og båndgapet. Dvs. om vi kan se en sammenheng mellom spenningen vi må påtrykke lysdioden for at den skal begynne å lyse, og energien i lyset den sender ut?.



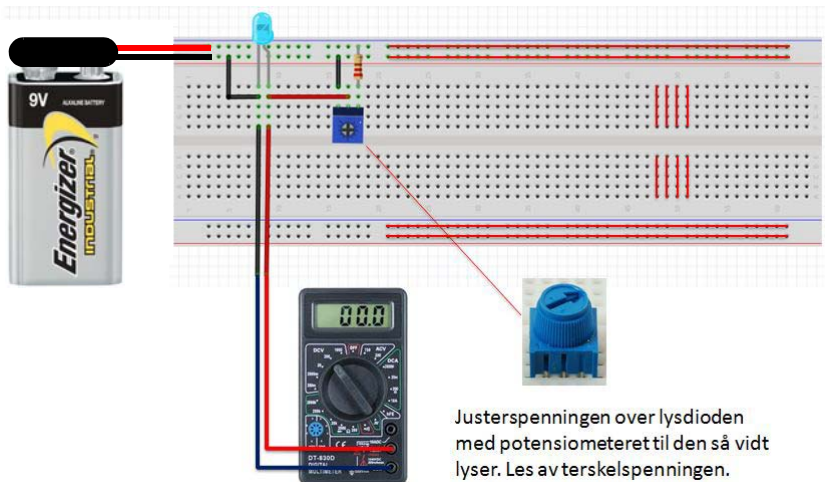
Figur 8.13 Jo større båndgap jo mer energirikt lys avgis, dvs. lys med kortere bølgelengde.

Til høyre i figur 8.13 ser vi hvordan økt båndgap gir kortere bølgelengde på det utsendte lyset.

Eksperiment: 30 Måling av terskelspenning som funksjon av bølgelengde

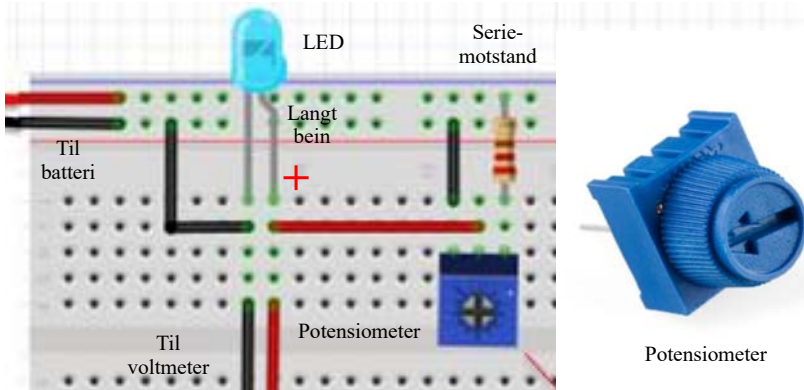
I dette eksperimentet skal vi undersøke om vi kan observere en overensstemmelse mellom terskelspenningen for lysdioder og bølgelengden til den fargen de sender ut. Til forsøket trenger vi dioder med ulike farge, kjennskap til diodens bølgelengde, en spenningskilde og et voltmeter. Dessuten er det praktisk med ledninger og et koblingsbrett.

Spenningskilden består av et 4,5 eller 9 Volts batteri, en seriemotstand på 220 Ohm og et potensiometer.

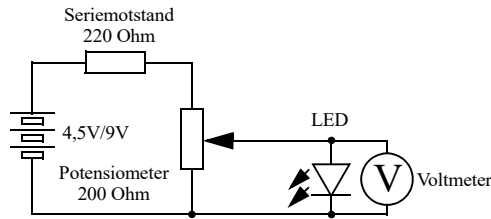


Justerspenningen over lysdioden med potensiometeret til den så vidt lyser. Les av terskelspenningen.

Figur 8.14 Måleoppstilling for måling av terskelspenning for lysdioder.

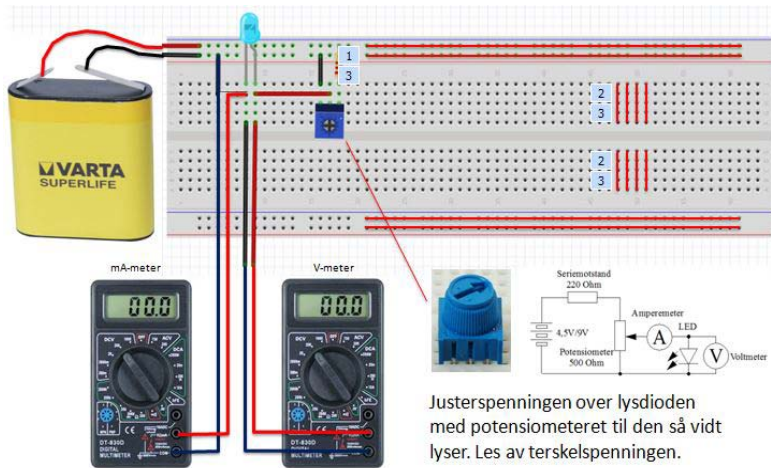


Figur 8.15 Nærbilde av oppkobling av lysdiode, potensiometer og seriemotstand



Figur 8.16 Koblingskjema for måleoppstillingen.

Vi kan også gjøre målingene ved en bestemt strømstyrke, f.eks. 5 mA. I så fall må vi koble inn et amperemeter i kretsen.



Figur 8.17 Måleoppstilling for måling av foroverspenning for lysdioder ved f.eks. 5 mA.

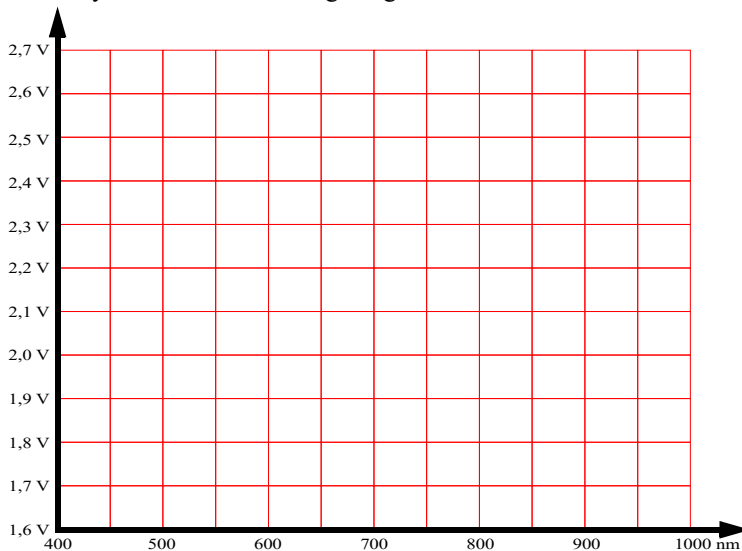


Start med en terskelspenning på 0 V og øk den langsomt mens du holder øye med lysdioden. Det vil være en fordel om lyset i rommet er dempet slik at det er lettere å se når lysdioden tenner. Noter spenningen i tabellen under akkurat når du kan ser et “glimt” av lys.

Tabell 5: Terskelspenning som funksjon av bølgelengde

Farge	Bølgelengde	Terskelspenning idet den begynner å lyse	Foroverspenning @ 5mA	Kommentar

Gjenta forsøket for lysdioder med ulike bølgelengder.



Figur 8.18 Terskelspenning som funksjon av bølgelengde.

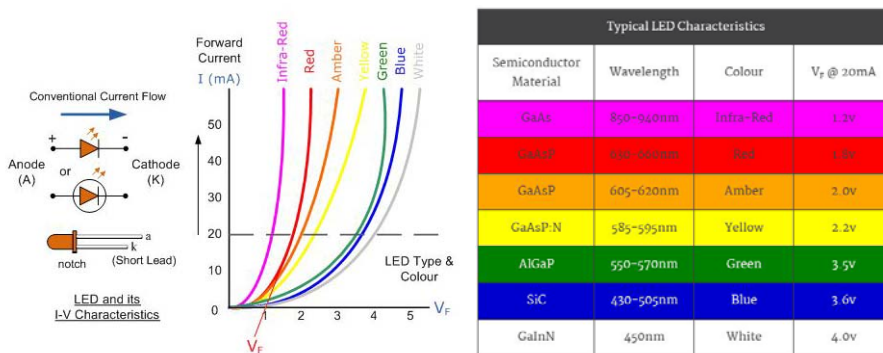


Figur 8.19 viser vanlige materialer benyttet for å påvirke båndgap og dermed bølgelengden.

Color	Wavelength [nm]	Voltage drop [ΔV]	Semiconductor material
<u>Infrared</u>	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.63$	<u>Gallium arsenide (GaAs)</u> , <u>Aluminium gallium arsenide (AlGaAs)</u>
<u>Red</u>	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	<u>Aluminium gallium arsenide (AlGaAs)</u> , <u>Gallium arsenide phosphide (GaAsP)</u> <u>Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP)</u> , <u>Gallium(III) phosphide (GaP)</u>
<u>Orange</u>	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	<u>Gallium arsenide phosphide (GaAsP)</u> , <u>Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP)</u> <u>Gallium(III) phosphide (GaP)</u>
<u>Yellow</u>	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$	<u>Gallium arsenide phosphide (GaAsP)</u> , <u>Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP)</u> , <u>Gallium(III) phosphide (GaP)</u>
<u>Green</u>	$500 < \lambda < 570$	$1.9^{[68]} < \Delta V < 4.0$	Traditional green: <u>Gallium(III) phosphide (GaP)</u> , <u>Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP)</u> <u>Aluminium gallium phosphide (AlGaP)</u> Pure green: <u>Indium gallium nitride (InGaN)</u> / <u>Gallium(III) nitride (GaN)</u>
<u>Blue</u>	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$	<u>Zinc selenide (ZnSe)</u> , <u>Indium gallium nitride (InGaN)</u> <u>Silicon carbide (SiC)</u> as substrate, <u>Silicon (Si)</u> as substrate—under development
<u>Violet</u> <u>Purple</u>	Multiple types	$2.76 < \Delta V < 4.0$ $2.48 < \Delta V < 3.7$	<u>Indium gallium nitride (InGaN)</u> Dual blue/red LEDs, blue with red phosphor, or white with purple plastic
<u>Ultraviolet</u>	$\lambda < 400$	$3.1 < \Delta V < 4.4$	<u>Diamond (235 nm)^[69]</u> , <u>Boron nitride (215 nm)^{[70][71]}</u> <u>Aluminium nitride (AlN) (210 nm)^[72]</u> , <u>Aluminium gallium nitride (AlGaN)</u> <u>Aluminium gallium indium nitride (AlGaInN)</u> —down to 210 nm ^[73]

Figur 8.19 Oversikt over materialer brukt i lysdioder med ulik farge (bølgelengde).

Figur 8.20 viser diodekarakteristikkene for lysdioder med ulik farge.



Figur 8.20 Typiske diodekarakteristikker for lysdioder med ulik farge³².

8.3 Lysstoffrør (Fluoriserende lys)

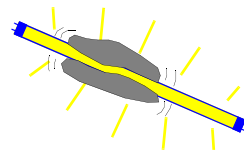
Men det finnes jo andre m ter å framstille lys på. La oss se hvordan et lysstoffrør fungerer. Kanskje det er visse likhetstrekk med LED. La oss innledningsvis gjøre et enkelt forsøk:

32. http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_8.html

**Eksperiment: 31 Lysstoffrør som gløder uten elektrisk strøm**

Til dette forsøket trengs et gammelt (eller nytt) lysstoffrør og en ullsokk eller noe annet av ull. En plastpose kan også brukes.

Gå inn i et helt mørkt rom. Legg ullsokken (eller plastposen) rundt røret og dra den fort fram og tilbake. Da vil du se at røret gir fra seg et svakt lys som forsvinner så snart du slutter å gni.



For å forstå hva som skjer, må vi først vite hvordan et lysstoffrør fungerer.

Et lysstoffrør har to glødetråder, en i hver ende av røret. Når disse blir varme, vil elektroner løsnes fra glødetråden og sveve rundt den. Selve røret er fylt med en gass, for eksempel argon. Inne i røret er det også litt kvikksølv som

fordamper når røret tennes. Mellom de to glødetrådene er det høy elektrisk spenning, slik at de frie elektronene som svever rundt glødetråden, akselereres i spenningsfeltet og farer gjennom røret mot glødetråden i den andre enden. På veien gjennom røret støter de imot kvikksølvdamperatomer. I kollisjonen får disse tilført energi (eksiteres) som de kort tid etter gir fra seg som ultrafiolett stråling. Dette er usynlig lys som synet vårt har lite nytte av. For å gjøre den ultrafiolette strålingen synlig, er det lagt et tynt lag med fosfor på innsiden av røret. Det er dette belegget som ser hvitt ut.

Når den ultrafiolette strålingen treffer fosforatomene, vil disse oppta energien i strålingen, for rett etterpå å gi den fra seg som synlig lys. Siden det hvite fosforlyset har lavere energi enn det ultrafiolette lyset, vil noe av energien også gå over til varme. Det kjenner vi når vi tar på et lysstoffrør som har vært påslått en stund.

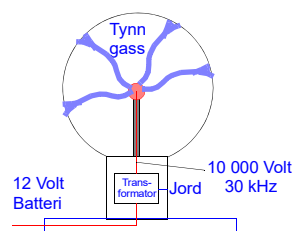
Når vi gnir et lysstoffrør med ull, vil fosforatomene i det hvite belegget på innsiden av røret, ta opp energi fra den statiske elektrisiteten som den så sender ut som synlig lys.

8.3.1 Utladningskuler

Et lignende fenomen finner vi i såkalte *utladningskuler*.

Utladningskuler er som oftest fylt med en blanding av gassene *neon* og *xenon* eller *argon* (edelgasser). Gassene består av atomer som ofte er ladet (*ionisert*).

Gassen er tynn, det vil si at det er ganske langt mellom hvert atom. Trykket til gassen inne i kula er omtrent en tiendedel av vanlig lufttrykk.



“Pingpongballen” i midten av kula er koblet til en spenningskilde på ca. 10 000 Volt, det vil si mer enn 40 ganger høyere spenning enn i stikkkontakten (230 V). En *transformator* hever batteri-



spenningen fra 12 Volt til ca. 10 000 Volt. I tillegg skifter spenningen retning ca. 60 000 ganger i sekundet (30 kHz).

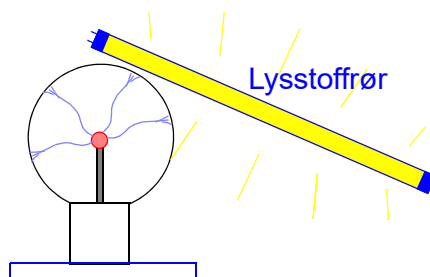
Den raskt varierende høyspenningen gjør at gassatomene i kula settes i bevegelse. På grunn av at avstanden mellom gassatomene er relativt stor, får de god fart før de kolliderer med et annet atom. Disse “høyhastighets”-kollisjonene gjør at noen elektroner i gassatomene får et “energi-kick” (eksiteres) og flytter seg litt lenger bort fra atomkjernene sine. Når de etter kort tid igjen faller tilbake på sin gamle plass, avgir de sin ekstra energi i form av lys.

Gassatomene inne i kula tiltrekkes av ei hånd eller en finger som legges på kula og gjør at elektronene i gassen får ekstra god fart og dermed avgir mer lys.

Et lysstoffrør ligner på ei slik utladningskule. Det går faktisk an å tenne et lysstoffrør bare ved å holde det i nærheten av utladningskula!

Et tilsvarende fenomen i naturen finner vi i *ionosfæren*, som er et lag i atmosfæren fra ca. 85 – 600 km over jordoverflata. Ionosfæren består av elektrisk ladede gassatomer som settes i rask bevegelse av *partikkelstråling* fra sola. Det hender da at ionosfæren begynner å lyse, på samme måte som strålene inne i utladningskula. Da får vi nordlys.

På denne måten kan vi si at lysstoffrør er en måte å utnytte fenomenet som også foregår i nordlyset til praktiske formål.





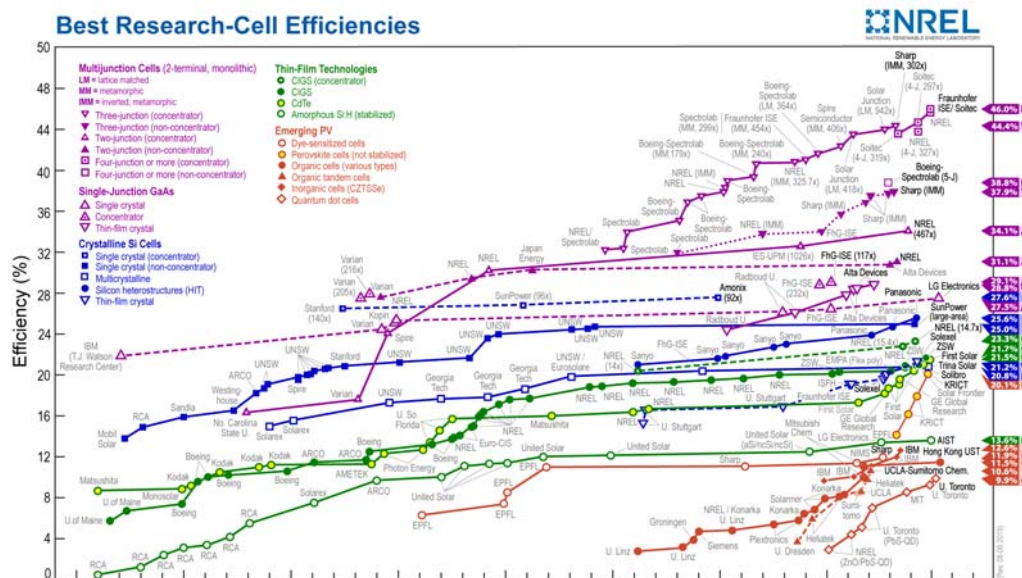


9 Fra lys til elektrisk energi (solceller)

I dette kapittelet skal vi se hvordan pn-overgangen som ble beskrevet i avsnitt 8.1 på side 139, også kan brukes til å forklare hvordan solceller fungerer. Her vil vi oppdage at solceller oppfører seg omtrent motsatt av hva LED gjør.

9.1 Virkningsgrad og pris

I de seneste årene har det også skjedd en rivende utvikling innen solcelleteknologien. Det er spesielt prisen pr. produsert effekt som har sunket dramatisk. Virkningsgraden for solceller i salg har imidlertid stort sett holdt seg konstant (15 – 20 %) til tross for at man i laboratoriene stadig har presset opp virkningsgraden. Som vi ser av figur 9.1 så lå rekorden i august 2015 på 46 %. Dette er kompliserte celler som består av mange ulike lag som hver for seg henter ut ulike deler av energispekteret og som er meget kostbare å framstille. Slike høyeffektive solceller brukes gjerne i situasjoner der effektivitet er viktigere enn pris som f.eks. innen romvirksomhet. Det var da også innen romteknologi at man første gang tok i bruk solceller.

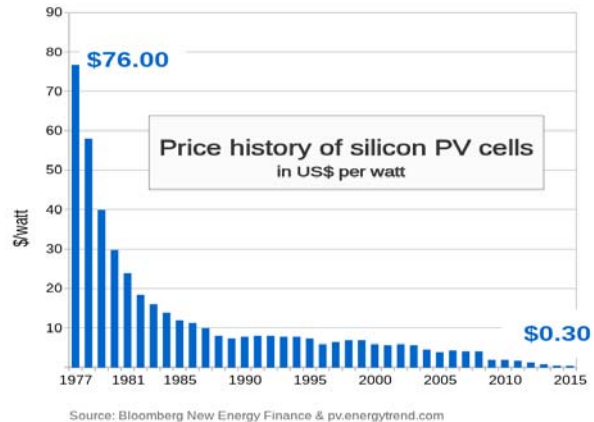


Figur 9.1 Utvikling av virkningsgraden til solceller fra 1975 - aug. 2015³³.

33. <http://cleantechnica.com/2014/02/02/which-solar-panels-most-efficient/>

Figur 9.2 viser hvordan prisutviklingen pr. Watt har vært fra 1977 fram til i dag. Kostnaden gjelder ved anskaffelse av anlegg som produserer mer enn 100 kW. Uansett lover dette godt for en framtid med solceller.

Det er imidlertid en utfordring at produksjonen på natta faller til null. Det er derfor ikke mulig basere seg på solceller som eneste energikilde. Man mener at en realistisk øvre grense ligger på mellom 20 – 25 %, mens andre mener at man kan gå høyere i strøk med betydelig behov for luftkondisjoneringsanlegg siden det ofte er sammenfall mellom maksimal produksjon og maksimalt behov³⁴.



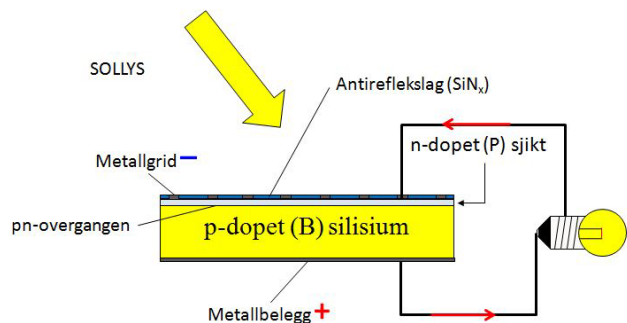
Figur 9.2 Kostnadsutviklingen for solceller pr. Watt ved anskaffelse av et solcelleanlegg av en viss størrelse¹.

9.2 En første tilnærming til solcellens virkemåte

En solcelle består av tynne flak av silisium, ett av de vanligste grunnstoffene i verden. I utgangspunktet er rent silisium en dårlig elektrisk leder, ja nesten en isolator. For at silisium skal fungere som en solcelle, må den forurenses av andre grunnstoffer, f.eks. fosfor og bor. Oversiden av solcellen forurenses med fosfor som gjør at overflaten får frie elektroner. Vi sier at overflaten er n-dopet. Resten av silisiumflaket er dopet med bor som gjør at denne delen av silisiumet får ledige elektronposisjoner (hull). Vi sier at denne delen av silisiumet er p-dopet.

Der de to ulikt dopede silisium sjiktene møtes (pn-overgangen) vil det skje en utveksling av elektroner slik at det oppstår en spenningsforskjell (en potensialbarriere), som hindrer ytterligere flyt av elektroner før solcellen belyses.

Når solcellen belyses vil elektroner i overgangen mellom de to områdene tilføres energi slik at elektroner sparkes over potensialbarrieren og samler seg på overflaten av solcellen hvor de kan fanges opp av metallgitteret som da blir negativt ladet. Tilsvarende vil de ledige posisjonene der elektronene er sparket løs (såkalte hull), bevege seg mot baksiden av solcellen som er dekket av metall som blir positivt ladd.



34. <http://www.aftenposten.no/okonomi/En-solskinshistorie-8364701.html>



Når for- og bakside kobles sammen vil det flyte en strøm som forsøker å jevne ut potensialforskjellen og som kan anvendes til et nyttig formål, f.eks. til å få en lyspære eller LED til å lyse.

For at mest mulig av lyset som treffer overflaten av solcellen skal omdannes til elektrisk energi, så må vi hindre at lyset reflekteres fra overflaten, derfor dekkes overflata med et lag med et anti-refleksmateriale. Det er dette laget som gir solcellene den karakteristiske blåfargen.

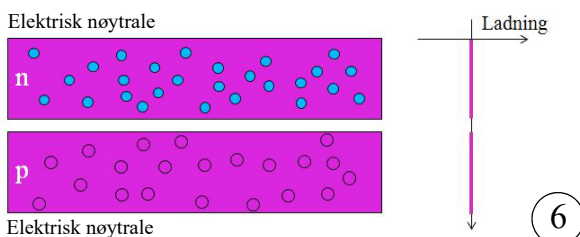
9.3 En dypere forklaring av solcellens virkemåte

I dette avsnittet skal vi gå et skritt videre i å forklare solcellens virkemåte.

Vi tar da utgangspunkt i p-dopet og n-dopet materiale som beskrevet i avsnitt 8.1 på side 139. Vi antar at det p-dopede materialet er tilsatt litt bor (B) slik at ladningsbærerne er hull. Mens det n-dopede materialet er tilsatt fosfor (P) slik at ladningsbærerne blir elektroner.

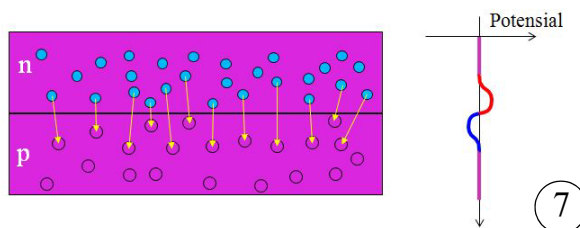
1. PN-overgangen

Om vi tar en n-type halvleder (n-området) og legger inntil en p-type halvleder (p-området), får vi det som kalles en *pn-overgang*. Figuren til høyre viser situasjonen rett før de to materialene smelter sammen. Det er viktig å merke seg at begge materialene er elektrisk nøytrale.



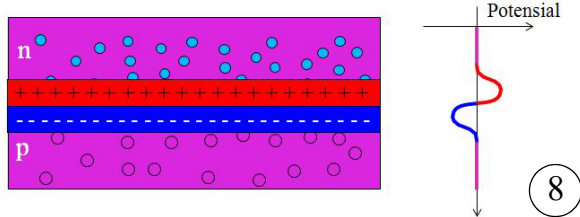
2. Ladningsforflytning

Siden n-området har frie elektroner, og p-området har frie elektronhull, vil elektronene i n-området diffundere over til p-området og fylle en del av hullene i et smalt sjikt. Drivkraften til denne utvekslingen av elektroner er diffusjon.



3. Elektrisk felt (potensialbarriere)

Etter hvert som elektronene diffunderer over til p-området og finner seg en plass i hullene, vil p-området bli *negativt ladet*. Mens n-området, som mister mange av sine elektroner, vil bli *positivt ladet*. På denne måten oppstår et *elektrisk felt* over pn-overgangen. Etter



hvert blir det imidlertid stadig vanskeligere for elektronene å komme seg over til p-området og det oppstår til slutt en likevekt hvor antallet elektroner som beveger seg over til p-området er likt med det antallet som beveger seg tilbake til n-området. Potensialforskjellen ved likevekt er bestemt av stoffenes affinitet til elektroner, eller forskjellen i elektronegativitet.

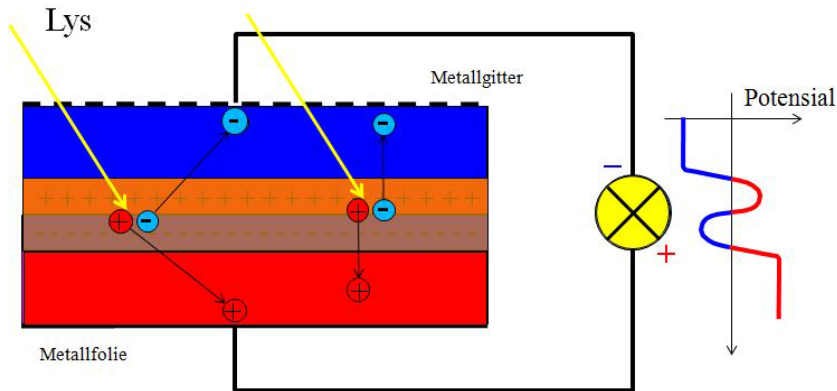


P- og n-området tappes etter hvert for ladningsbærere, og det oppstår et *utarmingssjikt* nær pn-overgangen. Skulle det imidlertid finnes frie elektroner i p-området vil det elektriske feltet sende disse over til n-området. Tilsvarende vil frie hull i n-området bli sendt over til p-området av det nevnte elektriske feltet.

4. Metallbelegg

Vi legger metall på utsida av n- og p-området. Metallet som dekker n-området er utformet som et nett av tynne metallstriper slik at lyset skal slippe inn i materialet samtidig som nettet skal fange opp frie elektroner fra n-området.

La oss se hva som skjer når pn-overgangen belyses.



5. Lyset tilfører elektronene energi

Når lys med tilstrekkelig energi treffer pn-overgangen, vil elektroner slås løs fra krystallgitteret (tilføres energi slik at de eksiteres og blir frie ladningsbærere). Elektronene som frigjøres i pn-overgangen vil umiddelbart føres over til n-området av det elektriske feltet (siden de er negative vil de bevege seg *mot* feltretningen), mens hullet som oppstår etter elektronet vil raskt bevege seg *med* feltet. For å gjenopprette balansen, må elektronene komme seg tilbake til p-området. Dette er ikke så lett på grunn av det elektriske feltet langs pn-overgangen. Det finnes imidlertid en vei rundt gjennom ledningen på utsida.

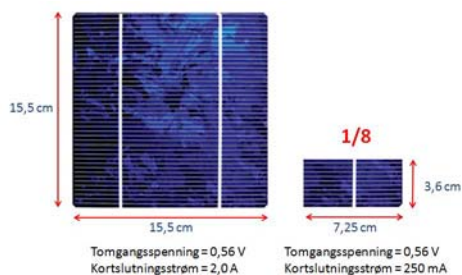
Strømmen i ledningen kan vi bruke til å gjøre et arbeid, f.eks. i en lyspære eller en LED.



9.4 Serie- og parallellkobling av solceller

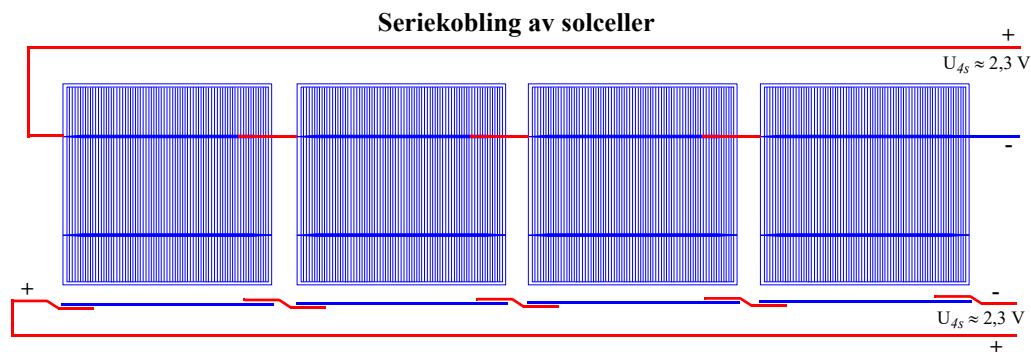
Serie- og parallellkobling av solceller kan gjøres på samme måte som batterier. En celle gir en *tomgangsspenning* (spenningen målt uten last, eng. "open circuit voltage" - U_{oc}) på ca. 0,56 V. De heldekkende metallbelegget på baksiden er den positive polen, mens stripene på forsiden er den negative polen.

En solcelle som er delt opp i biter vil beholde spenningen, men kortslutningsstrømmen og effekten vil synke tilsvarende reduksjonen i arealet. En forutsetning er at hele arealet har forbindelse med en samleskinne gjennom et ubrutt metallgitter.



9.4.1 Seriekobling av celler

Når vi seriekobler solceller så kobles forsiden (-) på det ene til baksiden (+) på det neste. På denne måten oppnår vi en økning i spenningen, men ingen økning av *kortslutningsstrømmen*. Kortslutningsstrømmen er den strømmen vi måler når solcellen belastes med en kortslutning.



Figur 9.3 Seriekobling av fire solceller (nederst sett fra siden).

$$U_{ns} \approx n \cdot U_{oc} \tag{9.1}$$

U_{ns} er spenningen vi oppnår ved seriekobling av n celler, og U_{oc} er spenningen vi måler over en celle uten belastning (open circuit (oc)). U_{oc} kalles også *tomgangsspenningen*.



Kortslutningsstrømmen (I_{ns}) for seriekoblingen vil endre seg lite, men sannsynligvis gå noe ned i forhold til for en celle (I_{sc}). Årsaken er at cellenes indre motstand øker relativt mer enn økningen i spenning. Dette vil spesielt være tilfelle når cellene kun kobles sammen ved å legge koblingsbåndene inntil metallkontaktene på solcellene.

$$I_{ns} \approx I_{sc} \quad (9.2)$$

Den leverte effekten vil være ca. n ganger så høy siden spenningen er økt n ganger:

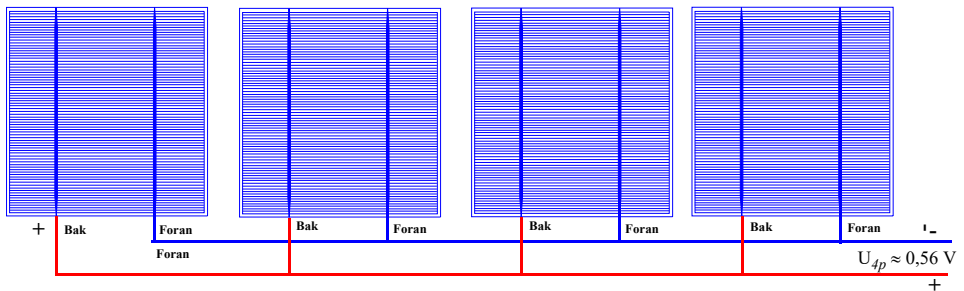
$$P_{ns} \approx n \cdot P_{max} \quad (9.3)$$



Hvor P_{ns} er maksimal effekt levert fra de seriekoblede solcellene og P_{max} er maksimalt levert effekt fra en av cellene. Vær oppmerksom på at den optimale belastningsmotstanden for seriekoblingen kan være forskjellig, fra tilsvarende for en enkelt celle.

9.4.2 Parallellkobling av celler

Prallellkobling av solceller



Figur 9.4 Parallellkobling av solceller.



Når vi parallellkobler solceller så kobles samtlige forsider (–) sammen, på samme måte som samtlige baksider (+) kobles sammen. På denne måten oppnår vi en *økning i kortslutningsstrømmen* tilsvarende antallet celler vi har koblet sammen, men ingen økning av tomgangsspenning.

$$I_{np} \approx n \cdot I_{sc} \quad (9.4)$$

I_{np} er strømmen vi oppnår ved parallellkobling av n celler, og I_{sc} er kortslutningsstrømmen vi måler for én celle (short circuit (sc)).



Foto: Mona

Tomgangsspenningen (U_{np}) for parallellkoblingen vil endre seg lite i forhold til tomgangsspenningen for hver enkelt celle (U_{oc}).

$$U_{np} \approx U_{oc} \quad (9.5)$$

Den leverte effekten vil være ca. n ganger så høy siden strømmen er økt ca. n ganger:

$$P_{np} \approx n \cdot P_{max} \quad (9.6)$$

Hvor P_{np} er maksimal effekt levert fra de n parallellkoblede solcellene og P_{max} er maksimalt levert effekt fra én av cellene. *Vær oppmerksom på at den optimale last for parallellkoblingen kan være forskjellig fra tilsvarende for en enkelt celle.*

Virkningsgraden

Virkningsgraden til en solcelle defineres som v :

$$v = \frac{P_{el}}{P_{lys}} \quad (9.7)$$

hvor

P_{el} er elektrisk energi til en optimal belastningsmotstand

P_{lys} er lysintensiteten i Watt som treffer det aktuelle solcellearealet.



9.5 Framstilling av solcellepaneler

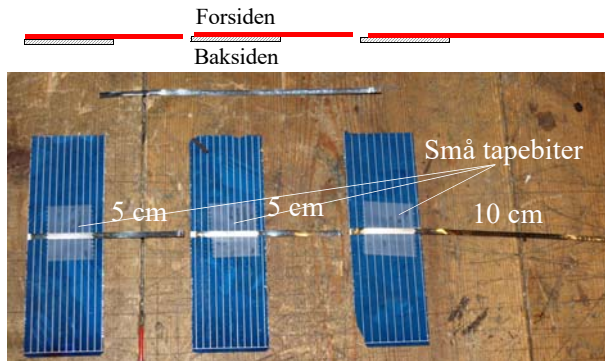
I dette avsnittet skal vi se hvordan vi kan lage enkle solcellepaneler og deretter måle virkningsgraden til solcellene.

Ekspiriment: 32 Framstilling av solcellepaneler

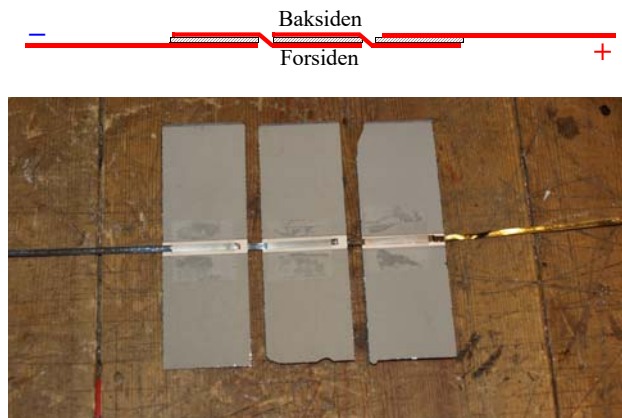
Til dette forsøket trenger vi solceller eller solcellebrekkasje, en solcellesag, koblingsbånd, tape, lamineringsplast og en billig lamineringsmaskin³⁵.

Lag et solcellepanel bestående av tre solceller a 2,5 x 7,7 cm.

1. Skjær tre solcellebitar 2,5 x 7,7 cm
2. Kutt opp koblingsbånd:
2 stk. 5 cm
2 stk. 10 cm
3. Bruk litt tape og fest koblingsbåndene til forsiden av solcellene som vist på bildet til høyre.



4. Snu cellene slik at baksiden kommer opp. Seriekoble cellene som vist øverst på tegningen til høyre. Merk hvordan koblingsbåndene fra *forsiden* på én celle kobles til *undersiden* av den neste.



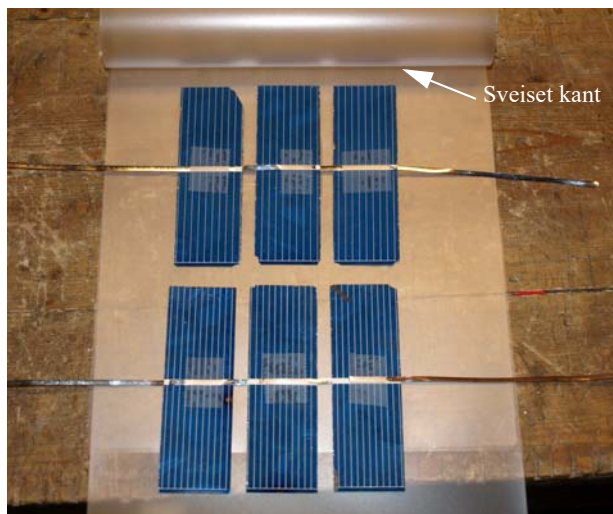
35. Solcelle brekkasje, solcellesag og koblingsbånd kan kjøpes fra www.skolesolceller.dk



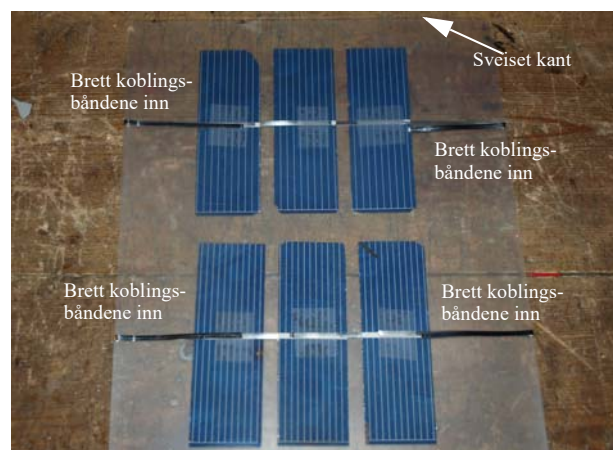
5. Legg solcellene inn mellom plastlaminatet som vist på figuren til høyre. Gå gjerne sammen andre slik at dere laminerer to paneler sammen for å spare lamineringsplast. Sørg for avstand mellom panelene blir tilstrekkelig stor slik de senere kan klippes fra hverandre.

La koblingsbåndene stikke ut over plasten som vist på bildet til høyre.

Brett plasten over solcellene.



6. Brett koblingsbåndene inn over laminatet slik at de ikke kommer i veien under lamineringsprosessen.



7. Kjør laminatet med solcellene i lamineringsmaskinen.





8. Klipp de to panelene fra hverandre og brett ut koblingsbåndene, og solcellepanelene er klare for bruk.



Etter at panelene er ferdig produsert er det nærliggende på prøve dem. Det neste eksperimentet går ut på å få en radio til å "spille".

Eksperiment: 33 Solcelledrevet radio

Til dette eksperimentet trengs flere solcellepaneler av den typen som ble framstilt i eksperiment 32, en enkel FM-radio med ledning for tilkobling av batterieliminatort, krokodilleklemmer, en kraftig lyskilde³⁶.

Opgaven går ut på å koble sammen et nødvendig antall solcellepaneler på rett måte slik radioen begynner å virke som den skal. Radioen er en enkel FM-radio som krever mellom 5 og 6 V for å gi lyd.

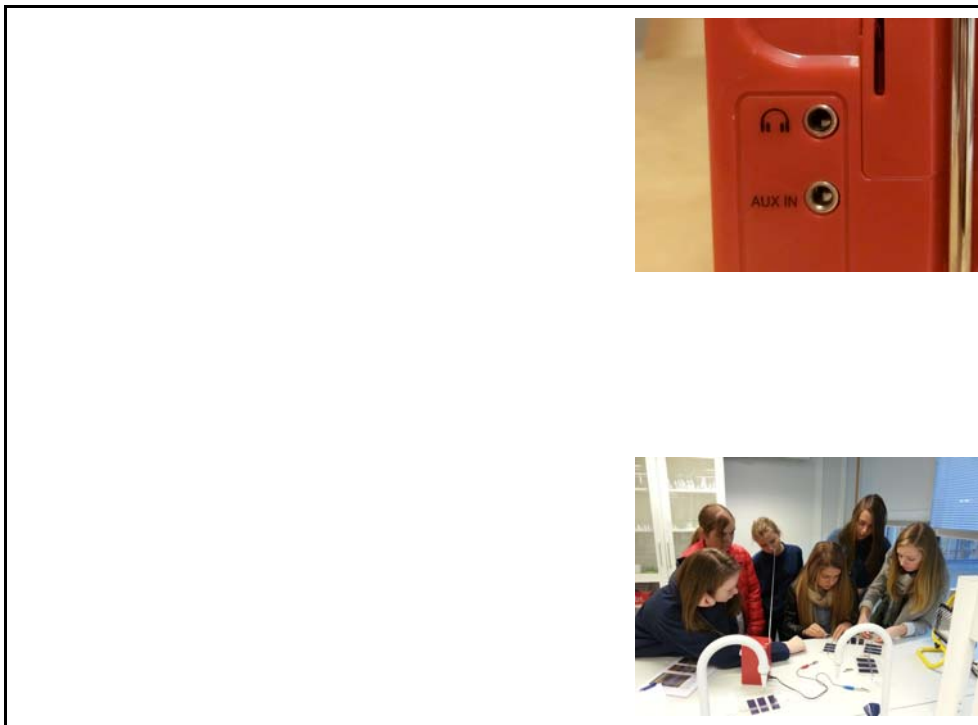


1. Gå sammen flere slik at dere får tilstrekkelig antall solcellepaneler. Koble sammen panelene slik at radioen begynner å gi fra seg lyd.
2. Bruk lampa til å belyse panelene.

³⁶Lyskilden bør være en 150 - 300 Watt tradisjonell glødelampe. LED-lamper har for lite effekt. Biltema har vanligvis solgt passende radioer (kr. 100,-).



3. Lag en tegning som viser hvordan panelene ble koblet sammen.



I oppgaven foran så trengs normalt minst 3 paneler som hver leverer ca. 1,5 V. Selv om det står at radioen krever 6 V så fungerer den på lavere spenningen. Panelene må seriekobles for å få tilstrekkelig høy spenning.

Når vi har funnet ut at panelene fungerer som de skal så er det på tide å måle virkningsgraden.

Eksperiment: 34 Måling av solcellepanelenes virkningsgrad

I dette eksperimentet skal vi måle virkningsgraden til solcellepanelet. Til det trenger vi solcellepanelet, en lyskilde på 150 W, en lysintensitetsmåler, et voltmeter, et amperemeter, en belastningsmotstand og en linjal eller tommestokk.

Selv om det ikke er nødvendig så har vi laget oss en målerigg som holder lysintensitetsmåleren og solcellepanelet.

1. Monter solcellepanelet med de to klipsene og koble de to krokodilleklemmene til koblingsbåndene. Det er ikke så viktig hvilken vei panelet kobles.



2. Slå på lyskilden som er på ca. 150 Watt. Pass på å gjøre målingen så raskt som mulig. Bli målingen for langvarig vil panelet bli for varmt og ytelsen går ned.

Lyskilden

Mål tomgangsspenning:

Tomgangsspenningen er den spenningen solcelle leverer når den ikke belastes. Det vil si ingen motstand er tilkoblet:

3. Sett bryter 1 i posisjon Av
Sett bryter 2 i posisjon Av
Les av spenningen på Volt-metret: _____ Volt

Mål kortslutningsstrøm:

Kortslutningsstrømmen er den strømmen som solcellepanelet kan levere når det er kortsluttet.

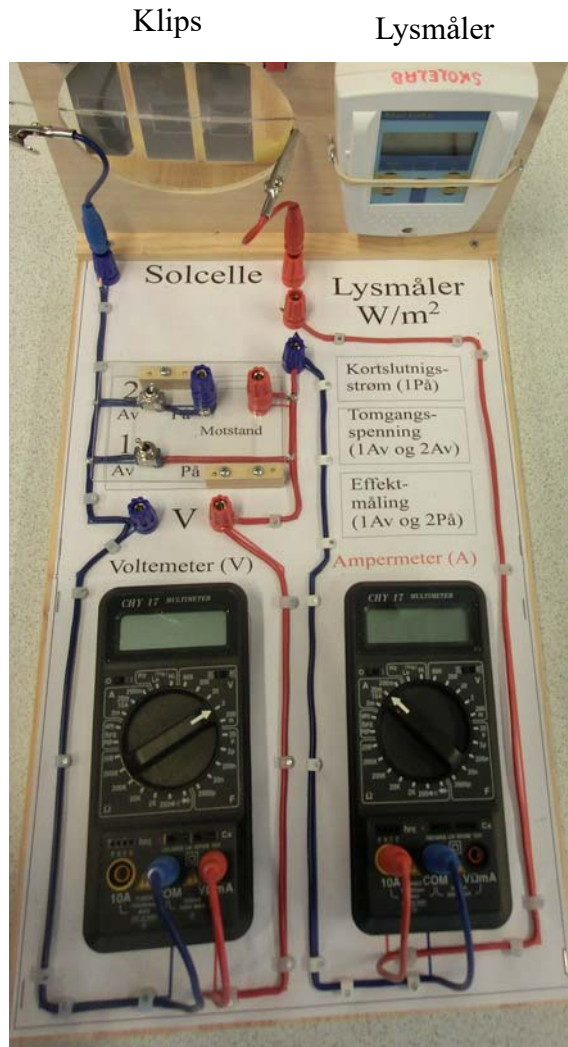
4. Sett amperemeteret i posisjon 10 A og koble det over solcellepanelet. Ev. Sett bryter 1 i posisjon På
Sett bryter 2 i posisjon Av
Les av kortslutningsstrømmen på Amperemeteret: _____ Ampere

Mål effekt levert til lastmotstand:

Lvert effekt er den effekten solcellepanelet leverer til lastmotstanden. Effekt er strømmen som går i motstanden x spenningen målt over motstanden.

5. Koble inn belastningsmotstanden og mål strøm gjennom - og spenning over motstanden. Ev.
Sett bryter 1 i posisjon Av
Sett bryter 2 i posisjon På
Les av strømmen på Amperemeteret: _____ Ampere
Les av spenningen på Voltmetret: _____ Volt

6. Beregn levert *Elektrisk effekt* som strømmen x spenningen = _____ V x _____ A = _____ Watt





Mål lyseffekt levert til solcellepanelet:

Lysintensiteten ved solcellepanelet leses av på lysintensitetsmåleren. Avlesningen gjøres i Watt pr. kvadratmeter.

7. Avlest lysintensitet : _____ W/m²

Lysmåleren gir effekt pr. kvadratmeter. Siden panelet ikke har et areal på en kvadratmeter må vi måle den faktiske størrelsen i m² og korrigere for denne.

8. **Mål og beregn arealet** av de tre solcellebitene (husk og oppgi lengde og bredde i meter (m)).

Vi antar at alle bitene er like store slik at vi kan skrive:

$$3 \times \text{Bredde} \times \text{Lengde} = 3 \times \text{___ m} \times \text{___ m} = \text{___ m}^2$$

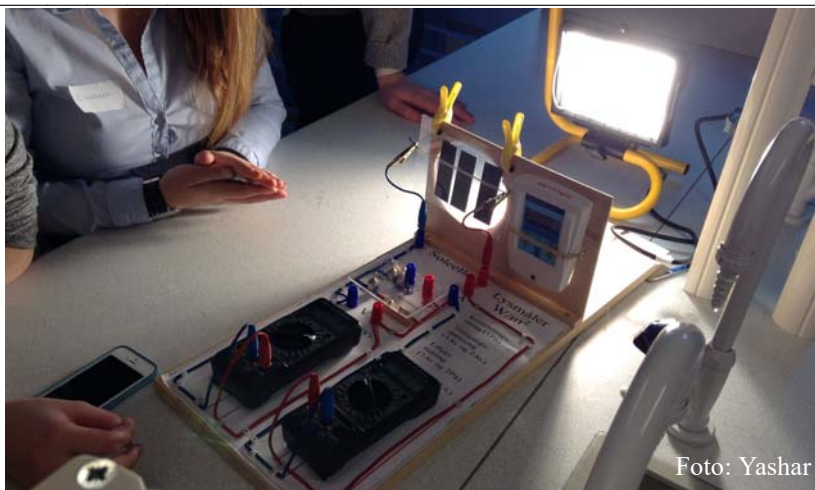
9. **Beregn Lyseffekt** som treffer solcellebitene = lysintensitet x solcelleareal = _____ Watt

Beregn virkningsgraden for solcellepanelet:

Virkningsgraden er levert elektrisk effekt til lastmotstanden (P_e) / levert lyseffekt til solcellepanelet (P_l).

10. **Beregn virkningsgraden** = Elektrisk effekt / Lyseffekt = _____ W / _____ W = _____

Beskriv med egne ord hva tallet for virkningsgraden betyr:







DEL III

Fra vekselspanning til likespenning





10 Likeretting - fra vekselspanning til likespenning

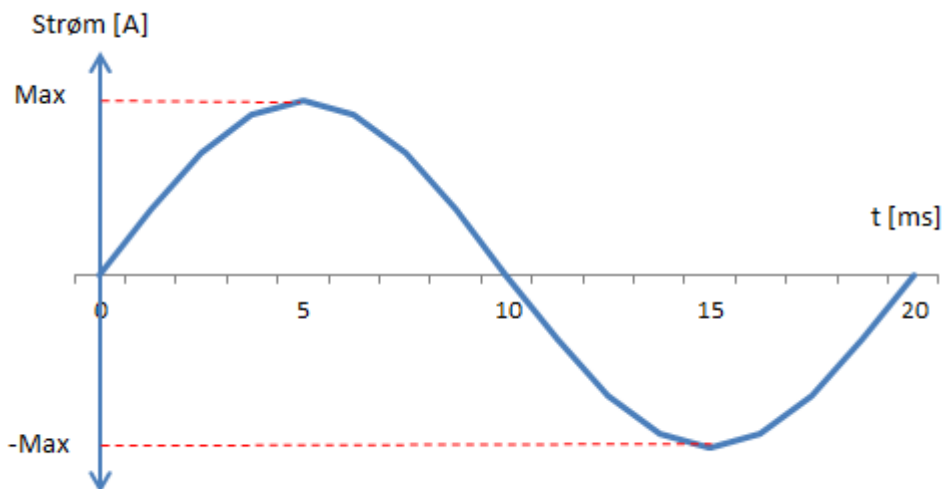
Før vi kobler opp likeretteren for steppmotoren, la oss se på virkemåten til en dobbelt likeretter, også kalt *brolikeretter*, og vise en liten laboratorieøvelse som illustrerer virkemåten.

10.1 Utforsking av brolikeretter ved hjelp av lysdioder (LED)³⁷

I denne oppgaven skal dere bygge en *brolikeretter* ved hjelp av lysdioder (LED). En brolikeretter er en mye brukt likeretter, men det finnes også andre typer likerettere. Lysdioder benyttes ikke i likerettere, men i denne oppgaven har vi valgt å benytte lysdioder for at dere skal kunne observere hvilke dioder som leder strøm til en hver tid.

10.1.1 Hva er en likeretter?

Det elektriske kraftsystemet er i hovedsak basert på vekselstrøm med form som et sinussignal. Dette innebærer at strømmen skifter retning hele tiden. I strømmettet gjennomløper strøm og spenning et forløp som vist på figur 10.1, 50 ganger pr. sekund. Vi sier at strømmen har en *frekvens* på 50 Hertz [Hz].



Figur 10.1 Strøm med frekvens 50 Hz (periodetid 20 ms).

Mange elektriske apparater drives av likestrøm, som betyr at strømmen er konstant og hele tiden har samme retning. Slike apparater er avhengig av en likeretter (som regel innebygget) for å kunne kobles til strømmettet. Likeretteren omformer elektrisiteten fra vekselstrøm til likestrøm. Motsatt til en likeretter er en *veksleretter* som omformer likestrøm til vekselstrøm. Disse er litt mer kompliserte å bygge, og vi skal derfor holde oss til likeretter i denne oppgaven.

37. Dette avsnittet er skrevet av Halsten Åstebøl ved Institutt for el-kraft NTNU og er utarbeidet i forbindelse med en studentoppgave.

**Eksempler på bruk av likerettere og vekselrettere (fellesbetegnelse: Omformere):**

- All forbrukerelektronikk som PC-er, mobiltelefoner, stereoanlegg etc. drives med likestrøm. De må derfor ha en likeretter, enten innebygget, eller som et ladeadapter slik laptop og mobiltelefoner har.
- Batterier som skal lades, for eksempel i en El-bil, må lades med likestrøm.
- Solceller og batterier produserer likestrøm. Hvis de skal levere elektrisk energi til kraftnettet, må det skje via en vekselretter.
- Lange høyspenningskabler (i bakken eller sjøen) får alt for store energitap hvis de lages som vekselstrømskabler. Derfor må det benyttes likestrømskabler til dette formålet. Hver ende av kabelen kobles til kraftnettet gjennom et «Omformeranlegg» som både kan likerette og vekselrette, slik at effekten kan flyte begge veier gjennom kabelen.
- Ved bruk av omformerteknologi kan turbinen i vind- eller vannkraftverk gå med variabelt turtall for å bedre virkningsgraden.

Som dere skjønner av denne listen er omformerteknologi høyaktuelt i energisammenheng. Når disse omformerne skal takle høyspenning og store effektmengder stiller det store krav til materialer og design av omformerne.

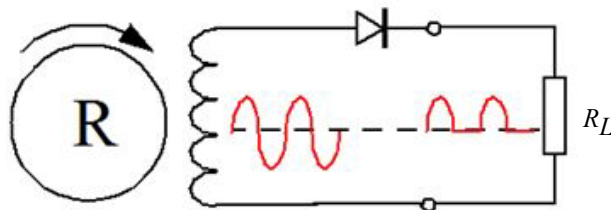
10.1.2 Hvordan virker en enkel diodelikeretter?

Dioder har den egenskap at de kun kan lede strøm i den ene retningen (fra pluss til minus), mens de sperrer for strøm i den andre (fra minus til pluss). Kretssymbolet indikerer dette ved at det er formet som en pil i lederetningen (dvs. strømretningen), og med en sperrelinje for strøm i motsatt retning.



Figur 10.2 Kretssymbol for diode.

Figur 10.3 viser en enkel likeretter med en diode.



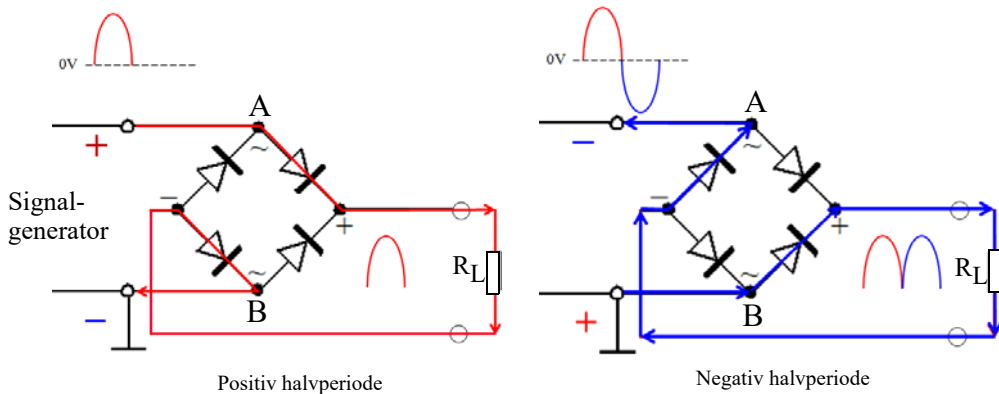
Figur 10.3 Enkel diodelikeretter



Som forventet vil dioden slippe gjennom den positive halvperioden, men sperre for den negative halvperioden. Likespenningen vil da bli lik middelverdien av de positive pulsene som forlater dioden og når lastmotstanden R_L . Dette er en særdeles lite effektiv likeretter siden den negative halvperioden går tapt. Dette kan vi imidlertid gjøre noe med

10.1.3 Hvordan virker en brolikeretter?

Dette kan vi utnytte til å lage en såkalt brolikeretter. Denne består av fire dioder koblet i en bro som vist i figur 10.4:

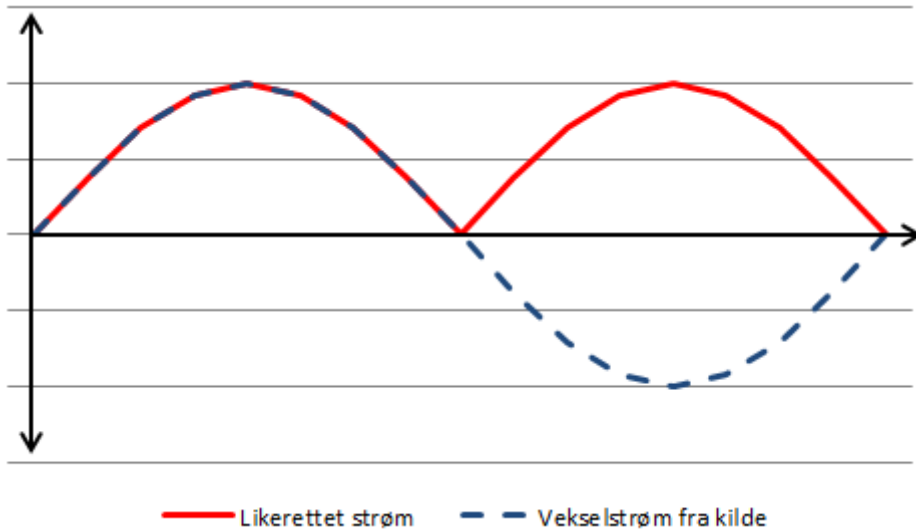


Figur 10.4 Virkemåten til en dobbelt likeretter (brolikeretter)

I den positive halvperioden, vil spenningen være høyere i punkt A enn i punkt B, og strømveien blir som vist til venstre på figur 10.4. I den negative halvperioden, vil spenningen være høyere i punkt B enn i punkt A, og strømveien blir som vist til høyre på figur 10.4. I begge tilfeller går strømmen samme vei gjennom motstanden R_L . Strømmen er altså likerettet, men vil fortsatt ikke være konstant.



Figur 10.5 viser både vekselstrømmen fra kilden (stiplet blå kurve) og den likerettede strømmen (heltrukket rød kurve).

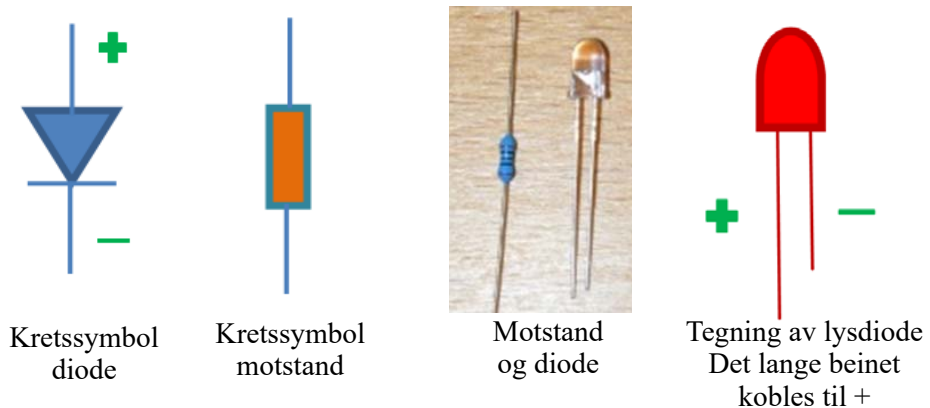


Figur 10.5 Viser vekselstrømmen og likerettete "likestrømmen".

For å få en konstant strøm gjennom R_L , må det settes inn en kondensator i parallell med motstanden.

10.2 Oppkobling av brolikeretter

I dette avsnittet skal vi koble opp en brolikeretter med lysdioder slik at det er mulig å se hvilke dioder som leder og hvilke som sperrer for strømmen



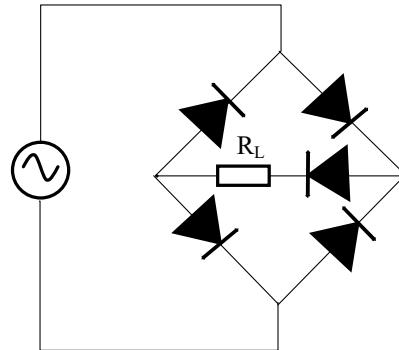
Figur 10.6 Viser kretssymboler for motstand, diode og lysdiode



Dioder har den egenskapen at de bare kan lede strøm en vei, dette gjelder også lysdioder. Til forskjell fra dioder avgir lysdioder lys når de leder strøm. Vi benytter derfor lysdioder for å kunne observere når de forskjellige diodene leder strøm, og når de ikke leder. I en virkelig likeretter benyttes ikke lysdioder. En elektrisk motstand leder strøm like godt eller like dårlig i begge retninger.

Dere skal koble opp en brolikeretter som vist i figur 10.7 ved hjelp av lysdioder (LED).

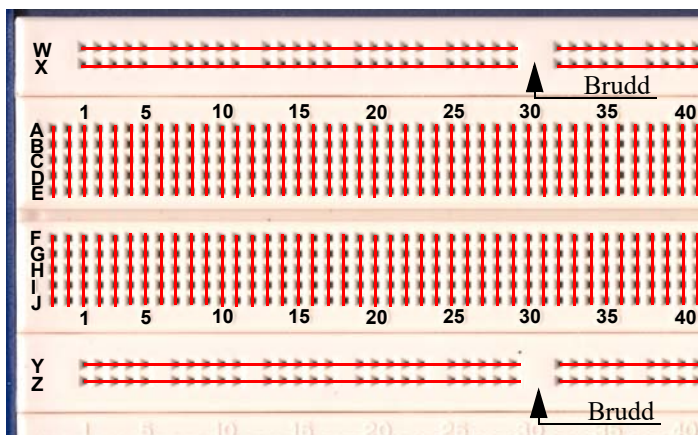
Hver oppmerksom på at en vanlig dioder begynner å lede strøm når spenningen over den er ca. 0,6 – 0,7 volt, mens en lysdiode krever fra 1,8 (rød) til 3,7 Volt (blå) før den begynner å lede.



Figur 10.7 Koblingsskjema for brolikeretteren

Oppgave 1A: Oppkobling av likeretterbroa

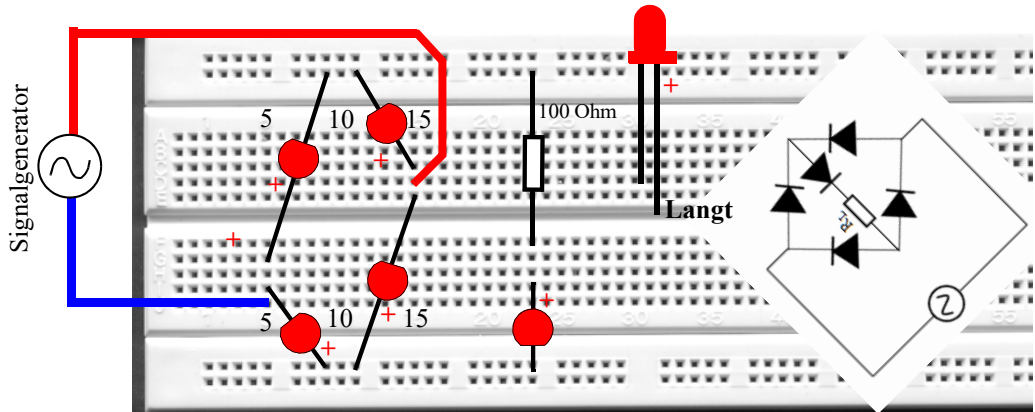
Nedenfor følger en oppskrift for oppkoblingen. De røde linjene viser hvilke kontaktpunkter som er koblet sammen i koblingsbrettet.





1. Koble opp de fem diodene som vist i figur 10.8.
2. Sett inn en motstand på 100 ohm som vist.
3. Koble ledninger med bananstikker mellom koblingsbrettet og signalgeneratoren.

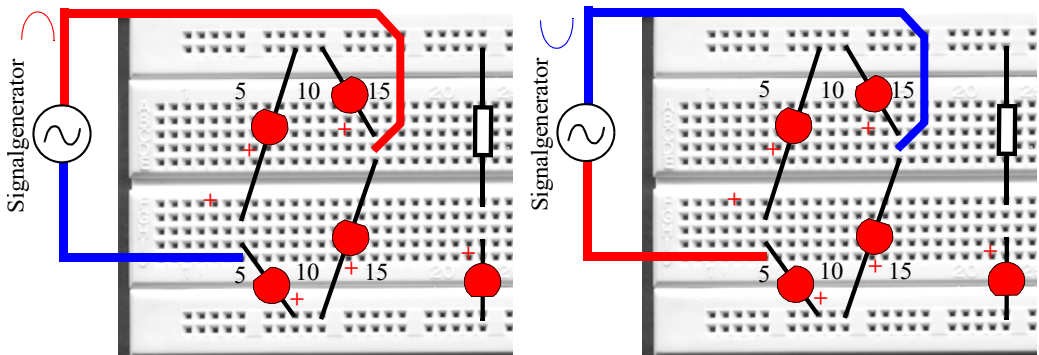
Langt bein på lysdioden kobles til pluss. Det er også en flat kant på flensen nederst på plashuset til dioden som indikerer den negative tilkoblingen.



Figur 10.8 Oppkobling av likeretterbroa.

Oppgave 1B: Beskriv likeretterbroas virkemåte

Tegn inn strømretningen for den positive og den negative halvperioden på figur 10.9.



Figur 10.9 Oppkobling av likeretterbro. Fargene på ledningene fra signalgeneratoren indikerer positiv og negativ halvperiode.



Oppgave 2A: Innstilling av vekselstrømmens frekvens og spenningsnivå:

Tilkobling av signalgenerator



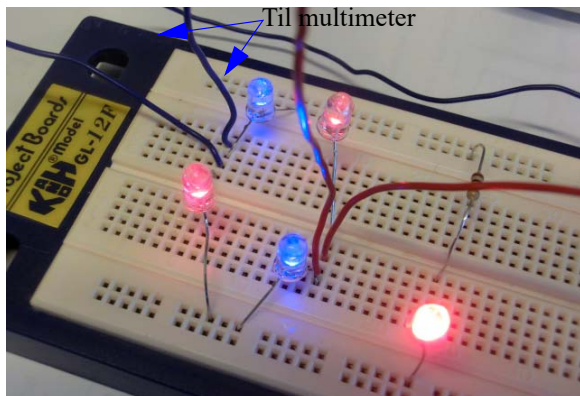
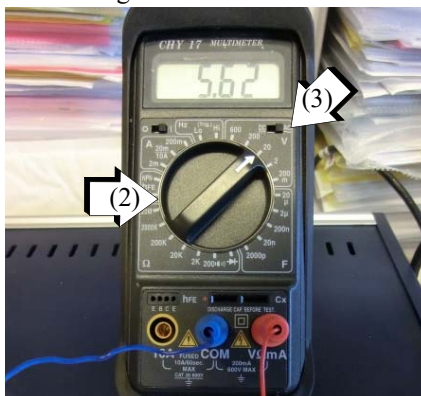
1. Velg frekvensområde 1 Hz
2. Velg bølgeform lik Sinus
3. Juster frekvensen til 1 Hz
4. Velg Internt signal til signal forsterkeren
5. Sett Amplituden til maks.
6. Slå på On/Off-bryteren

Har du koblet opp riktig skal du nå se at diodene blinker i en sekvens. Kontroller at diodene blinker slik du forutså i oppgave 1B.

Oppgave 2B: Mål spenninger

Mål vekselspenningen på inngangen av brolikeretteren:

1. Koble til multimeteret som vist på figur 10.10
2. Sett velgeren til 20 V



Figur 10.10 Tilkobling av multimeter



3. Sett AC/DC bryteren til AC
4. Still frekvensen til signalgeneratoren til ca. 500 Hz
5. Les av spenningen

Vekselspanningen på inngangen er: _____ Volt AC

6. Flytt målepinnene til utgangen av brolikeretteren, dvs. over seriekoblingen av motstanden og lysdioden
7. La velgeren stå på 20 V, men sett AC/DC bryteren til DC og les av spenningen

Den ufiltrerte likespenningen på utgangen er _____ Volt DC

Kan du forklare resultatene: _____

8. Endre bølgeform til trekant og firkantform. Hva ser du nå? Hvordan kan dette hjelpe deg til å tolke resultatene foran?
9. Velg frekvensområde 10 Hz på signalgeneratoren, og juster deretter frekvensen oppover mot 100 Hz. Ved hvilken frekvens (ca.) klarer dere ikke lenger å se at dioden blinker? Denne frekvensen kalles øyets kritiske funksjonsfrekvens, og er individuell.

Oppgave 5 Filtrering av vekselspanningen

1. Still frekvensen tilbake til 1 Hz.
2. Koble kondensatoren over utgangen av brolikeretteren, dvs. over lysdioden og motstanden. Pass på at polariteten på kondensatoren blir riktig
3. Observer hva som skjer med lyset i dioden.

Ved å koble inn en kondensator i parallell med motstanden og dioden, oppnår vi at strømmen ikke bare blir likerettet, men også blir ganske konstant. Dioden på utgangen skal da lyse konstant.



Figur 10.11 Kondensator 3300µF
Det lange beinet er +

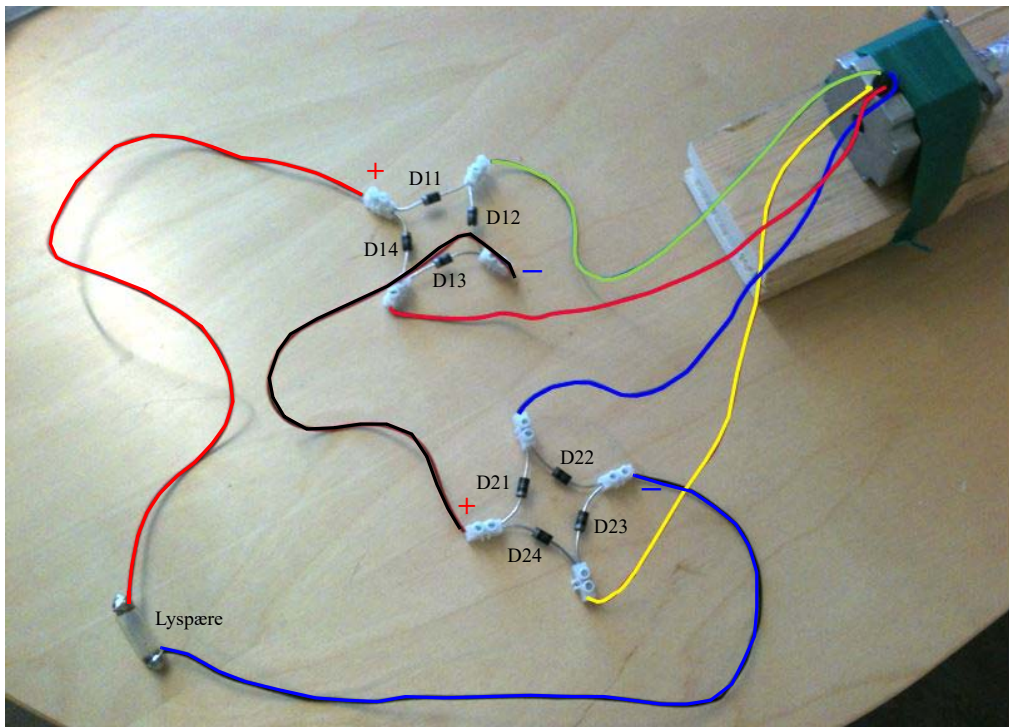


Oppsummering:

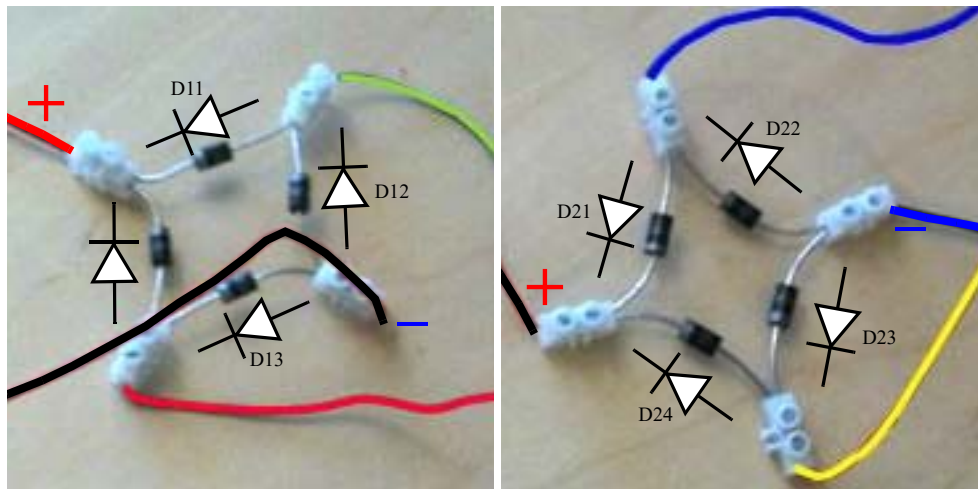
Dere har nå observert hvordan lysdiodene blinker i takt med om de leder strøm eller ikke. De fire diodene som utgjør likeretteren vil lyse i annenhver halvperiode, mens dioden på utgangen (som ikke er nødvendig for likerettingen) vil lyse i hver halvperiode fordi strømmen gjennom denne er likerettet.

10.3 Oppkobling av dobbelt brolikeretter for vindturbinprosjekt

I dette avsnittet skal vi beskrive oppkoblingen av den dobbelte brolikeretteren for steppmotoren (brukt som generator) slik at vi kan addere de to spenningene ut fra spolene A og B, se avsnitt 6.8 på side 106. Dette kan gjøres på flere ulike måter. Her vil vi demonstrere to måter, den ene pedagogisk oversiktlig, mens den andre er lettere å bruke i praksis.

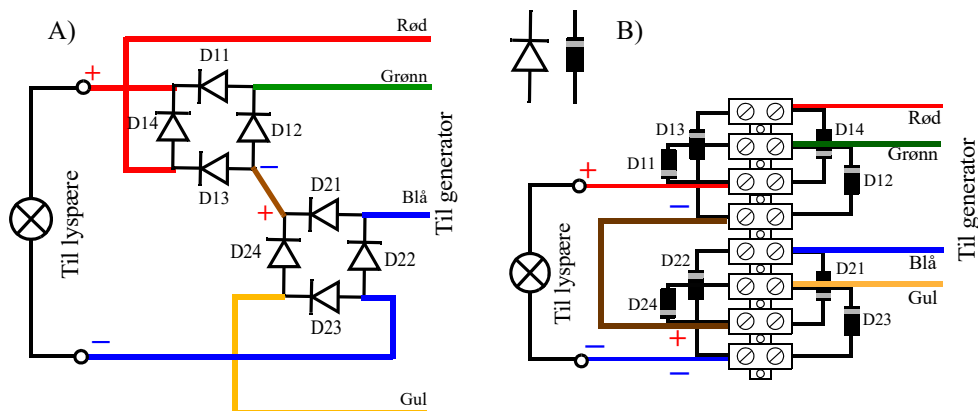


Figur 10.12 Praktisk oppkobling som gir et oversiktlig bilde av den dobbelte brolikeretteren.



Figur 10.13 Nærbilde av oppkoblingen av likeretterdiodene

På figur 10.14 har vi valgt å beholde rekkeklemmene (sukkerbitene samlet), dermed får vi en langt mer praktisk og håndterbar oppkobling, men “geometrien” i likeretterne forsvinner.



Figur 10.14 Alternativ oppkobling langs rekkeklemme. A) Koblingskjema B) Fysisk oppkobling



11 Referanseliste

- [1] Angell, C., Bungum, B., Henriksen, E. K., Kolstø, S. D., Persson, J. & Renstrøm, R. (2019), *Fysikkdidaktikk*, (2. utg). Cappelen Damm
- [2] Engelhardt P.V., Beichner R.J. (2003), *Students' understanding of direct current resistive electrical circuits*, Am. J. Phys. 72 (1), January 2004
- [3] Foss, B.(2018), *Elevers forståelse av elektrisitet*, Masteroppgave i naturfagdidaktikk, Institutt for lærerutdanning, NTNU
- [4] Grimenes, A.A., Jerstad, P. og Sletbak B. (2011), *Grunnleggende fysikk for universitet og høyskole*, Cappelen Damm
- [5] Knain, E., Kolstø S.D. (red.) (2011), *Elever som forskere i naturfag*, Universitetsforlaget
- [6] Marion, P.v., Hov H., Thyraug T. Trongmo Ø. (2009), *Senit – Naturfag Vg1*, Gyldendal undervisning
- [7] Mazur, E. (1996), *Peer Instruksjon: A User's manual* (Pearson Educational Innovation: Instructors for Physics), Pearson
- [8] Olsen, M.A (2017), *Elektriske kretser, hva er nå det? En enkeltcasestudie som undersøker elevers forståelse for elektriske kretser*, Masteroppgave i naturfagdidaktikk, Institutt for lærerutdanning, NTNU
- [9] Rossing, N.K. (2017), *Idehefte for bruk av laserkutter*, Vitensenteret i Trondheim, Rev. 1.2 september 2016, ISBN 978-82-92088-57-9
<https://www.ntnu.no/skolelab/bla-hefteserie>
- [10] Rossing, N.K. (2008), *Fysikkeksperimenter – for bruk i skolen*, Tapir akademisk forlag, ISBN 978-82-51922869
- [11] Sjøberg, S. (1986), *Elever og lærere sier sin mening*, Oslo: Universitetsforlaget
- [12] Veel, R. (1997), *Learning how to mean – scientifically speaking: apprenticeship into scientific discourse in secondary school*. I F. Christie og J.R. Martin (red.), *Genre and institutions: Social processes in the workplace and school* (s. 161 – 195). London: Cassel
- [13] **Magnetitt:**
a) <http://www.ig.uit.no/geostudiesamling/magnetitt.htm>
b) <http://no.wikipedia.org/wiki/Magnetitt>



Vedlegg A Laboratorieoppgaver

A.1 Eksempel på laboratorieoppgave med vannkraftverk

Dette kapittelet beskriver hvordan vannenergistasjonen til Energiløypa ved NTNU kan utformes. Løypa er i første omgang beregnet på elever som har naturfag på VG1. Løypa ble første gang kjørt i november 2014 og vil, om mulig bli gjennomført årlig på høsten, trolig i november.

- **Omfang:** 55 min (i en klassesituasjon bør tidsomfanget økes)
- **Målgruppe:** Elever på Vg1
- **Opplegget skal gi elevene forståelse av:**
 - Oppbygningen av et enkelt vannenergiverk
 - Forståelse av begrepene elektrisk effekt og energi
 - Vite at elektrisk effekt avgitt til en last kan måles ved å måle strøm og spenning over lasten
 - Måling av ytelse og virkningsgrad
- **Opplegget skal dessuten:**
 - ... være mulig å følge opp i klasserommet, gjennom refleksjon

A.1.1 Kortfattet beskrivelse av opplegget

1. Introduksjon

Elevene får en meget kort introduksjon om hvordan et vannenergiverk er bygget opp og de ulike delene verket består av, ved å vise til den modellen de skal bruke.

- Reservoar
- Tilførselsledning
- Turbin
- Generator
- "Forbruker"

2. Litt teori om ...

- ... strøm og spenning
- ... effekt og energi
- ... oppbygningen av turbinen
- ... oppbygningen av generatoren
- ... induksjon

3. Oppdraget

De skal velge parametere slik at de får maksimalt levert energi fra en gitt mengde vann.

Følgende parametere kan endres:

- Dyseåpning (Liten og stor)
- Belasningsmotstand (3,9 Ohm og 8,2 Ohm)
- Plassering av strålen som treffer turbinen

4. Måling av virkningsgrad

- Elevene skal beregne virkningsgraden når de har funnet optimale betingelser



A.1.2 Elevark 1 – Energiløypa – Vannenergiverk

Utstyr:

- *Pelton turbin med generator i plasthus*
- *Et plastkar for å samle opp vann*
- *Et plastkar som fungerer som reservoar*
- *Slange med ventil*
- *Strøm-spenningsmåler (effektmåler) Pasco*
- *SPARK datalogger, Pasco*
- *2 belastningsmotstander (3,9 Ohm og 8,2 Ohm)*
- *2 dyser (liten og stor)*
- *Lab. kabler*
- *Målebånd*

Forslag til arbeidsdeling:

Den som ...

- *... leder oppdraget*
- *... passer målestasjonen*
- *... sørger for at strålen treffer turbinen*
- *... måler reservoarets høyde*
- *... fører resultatene inn i loggen*

Oppdraget:





Dere skal nå velge dysestørrelse, optimal plassering av strålen i forhold til Pelton-turbinen og optimal belastningsmotstand, slik at vannet dere har til rådighet gir mest mulig energi til belastningsmotstanden.

Framgangsmåte:

Måling av energi fra tilmålt vannmengde (gjøres under ledelse av gruppeleder)

1. Karet har en nedre og en øvre målestrek.
Bruk bøtta til å fyll vann i reservoaret opp til øvre målestrek
2. Velg den belastningsmotstanden (3,9 eller 8,2 Ohm) dere tror gir mest levert energi
3. Velg den dysa (liten eller stor) dere tror gir mest levert energi
4. Sett SPARK stasjonen i **måleark 2** - Effektkurve



5. Start målingen på SPARK (trykk ) og registrer effekt som funksjon av tiden (effektkurven)
6. Åpne ventilen
7. Tilpass vertikal skala ved å trykke på  og deretter .
8. Lukk ventilen når vannstanden er nådd ned til nedre målestrek
9. Stopp målingen på SPARK
10. Finn levert energi til belastningsmotstanden som arealet under kurven
Trykk  - Velg deretter AREAL, trykk OK, les av areal
11. Skriv resultatene inn i tabellen under
12. Gjenta målingen for andre dyser og belastningsmotstand

Måling	Dyse Liten/Stor	Belastning 3,9 / 8,2 Ohm	Lvert energi (Ws)	Kommentar
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

Beregn virkningsgraden:

Virkningsgraden viser hvor stor del av vannets stillingsenergi som blir til elektrisk energi i belastningsmotstanden.

Vannets stillingsenergi:

Vannets masse: _____ kg x Reservoarets høyde: _____ [m] x Tyngdeakselerasjon 9,81 [m/s²]
= _____ [Joule]

Lvert elektrisk energi til belastningen:

Maksimalt levert energi til belastningen: _____ [Joule] (1 Watt sek. = 1 Joule)

Virkningsgrad:

Virkningsgrad = Lvert energi til belastning/ Vannets stillingsenergi dvs.





Elektrisitetslære

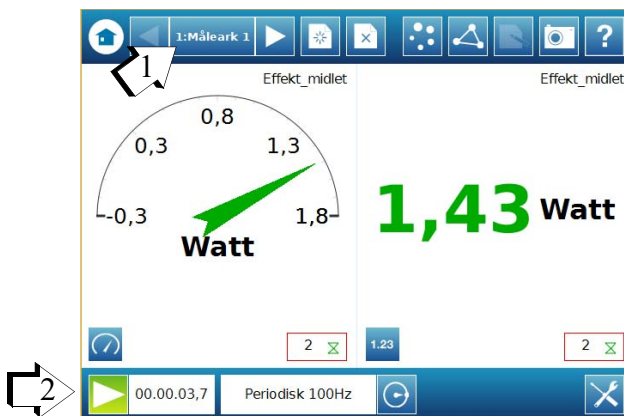
Virkningsgraden = Elektrisk energi _____ [Joule] / Stillingsenergi energi _____ [Joule] = _____

Diskuter resultatet _____



A.1.3 Elevarke 2 – Energiløypa – Bruk av SPARK datalogger

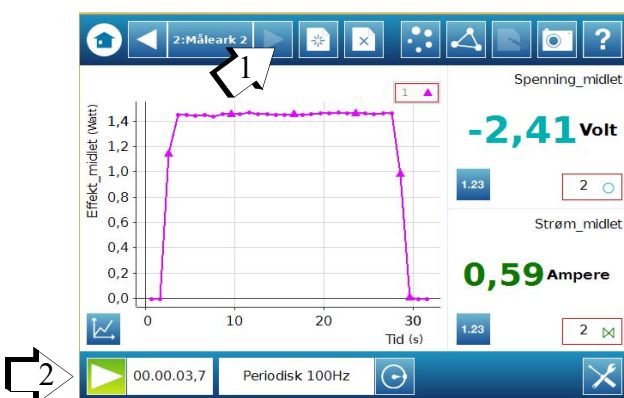
Måling av effekt

1. Velg Måleark 1 - *Effektmåling*
2. Målingen startes og stoppes ved å trykke på pila i nederste venstre hjørne.
Startes:  Stoppes: 






Måling av effektkurve og energi

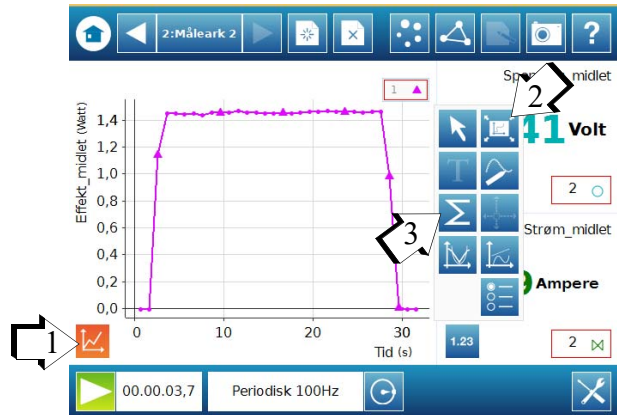
1. Velg måleark 2 - *Energimåling*
2. Målingen startes og stoppes ved å trykke på pila i nederste venstre hjørne.
Startes:  Stoppes: 





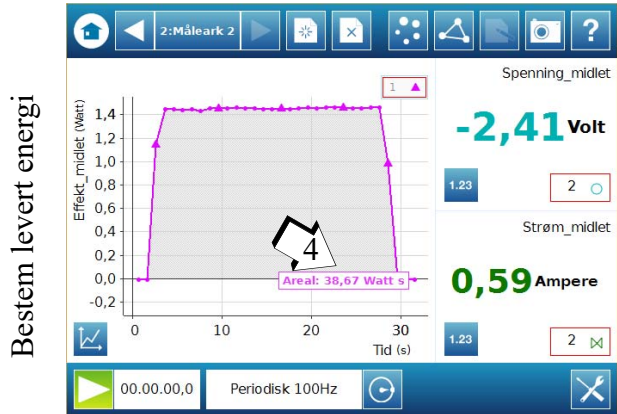
Skaler og beregn areal (energi)

1. Trykk på symbolet .
2. Trykk  for å skalere opp grafen.
3. Trykk  - Velg deretter AREAL
4. Trykk OK
5. Les av areal (figur under til høyre)



Fjern gamle målinger

1. Trykk på symbolet 
6. Velg ADMINISTRERE KJØRINGER
7. Velg SLETT ALLE KJØRINGER
8. Trykk Ja
9. Trykk OK





A.2 Måling av terskelspenning for lysdioder

Tabellen under viser en samling lysdioder som kan egne seg for å bestemme sammenhengen mellom terskelspenning og bølgelengde:

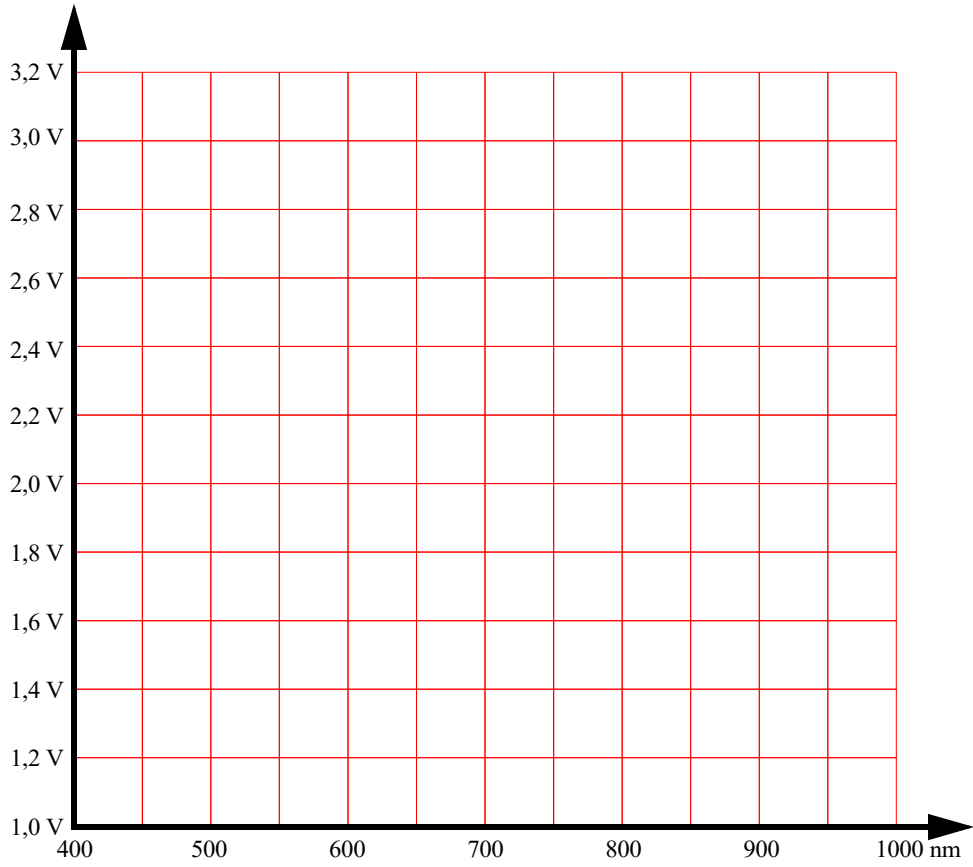
Tabell 6: Typebetegnelser og typiske verdier for bølgelengde

ELFA-kode	Farge	Bølgelengde	Kommentar
75-004-40	Hvit		334-15/T2C2-1SUB (InGaN)
75-069-80	Blå	464 nm	HLMP-CB3A-UV0DD
75-037-41	Grønn	505 nm	383-2UBGC/LED
75-03-636	Grønn	525 nm	L5-G81N-GUV
75-01-469	Grønn	568 nm	L-7113MGC
75-007-13	Grønn (Rød)	573 nm (624 nm)	339-1SURSYGW/S530-A3
75-038-40	Gul (II)	585 nm	GL5HY43
75-015-96	Gul (I)	589 nm	333-2UYC/S400
75-034-10	Oransje	615 nm	333-2USOC/S400-A7
75-007-13	Rød(grønn)	624 nm (573 nm)	339-1SURSYGW/S530-A3
75-014-89	Rød (I)	624 nm	333-2 SURC/S530-A3
75-067-47	Rød (II)	626 nm	HLMP-EG15-UX000
75-281-52	Infrarød	950 nm	AN304 IR-LED



Tabell 7: Terskelspenning som funksjon av bølgelengde

ELFA-kode	Farge	Bølgelengde	Terskelspenning	Terskelspenning 5mA
75-004-40	Hvit		2,38 V	2,85 V
75-069-80	Blå	464 nm	2,30 V	2,78 V
75-037-41	Grønn	505 nm	2,01 V	2,86 V
75-03-636	Grønn	525 nm	2,31 V	2,92 V
75-01-469	Grønn	568 nm	1,77 V	1,97 V
75-007-13	Grønn (Rød)	573 nm (624 nm)	1,82 V	1,93 V
75-038-40	Gul (II)	585 nm	1,66 V	1,82V
75-015-96	Gul (I)	589 nm	1,69 V	1,91V
75-034-10	Oransje	615 nm	1,55 V	1,84 V
75-007-13	Rød (grønn)	624 nm (573 nm)	1,60 V	1,85 V
75-014-89	Rød (I)	624 nm	1,55 V	1,78V
75-067-47	Rød (II)	626 nm	1,51 V	1,78 V
75-281-52	Infrarød	950 nm	1,08 V	1,11V

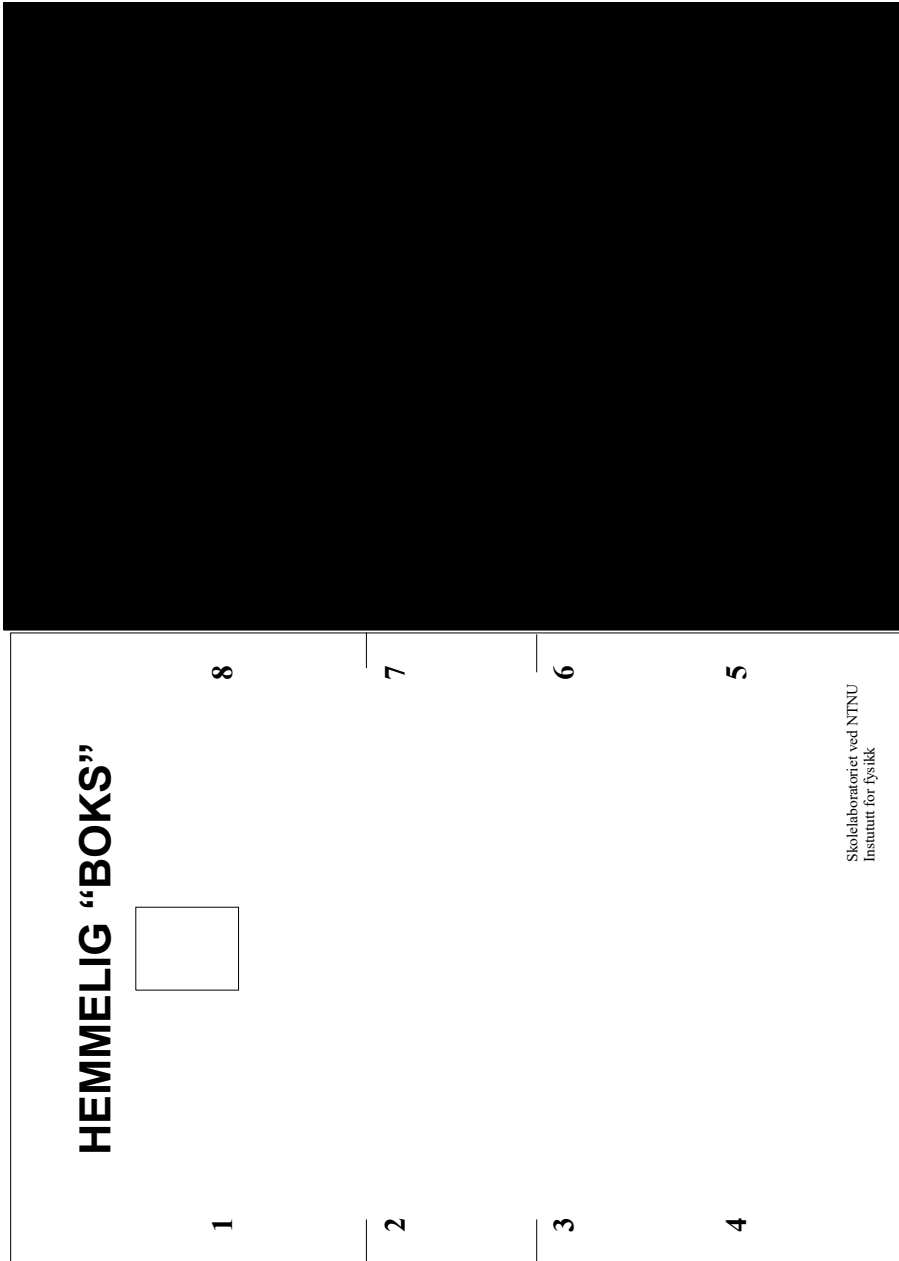




Vedlegg B Kopioriginaler hemmelige bokser

B.1 Kopi original hemmelig “boks”

Forstørr opp malen slik at den akkurat dekker ett A4 ark.





Ark for tegning av koblingsskjema.

HEMMELIG "BOKS"

Ikke forbindelse

Forbindelse

1 2 3 4

8 7 6 5

HEMMELIG "BOKS"

Ikke forbindelse

Forbindelse

1 2 3 4

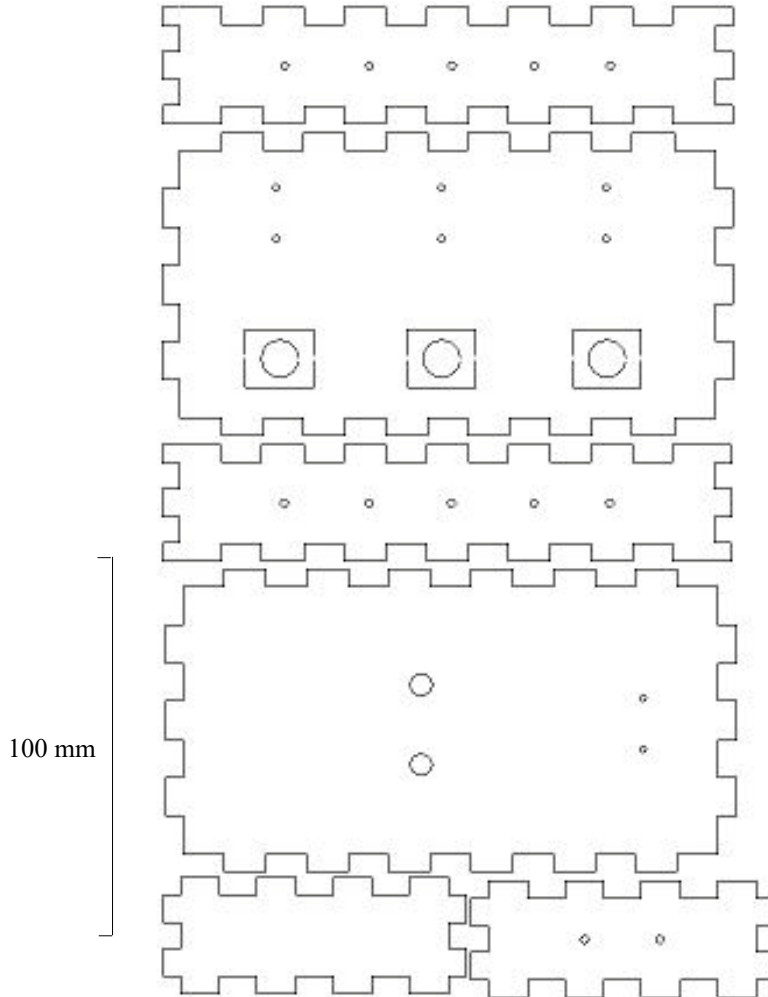
8 7 6 5



B.2 Hemmelig boks avansert

B.2.1 Skjæremal

Mal for skjæring av hemmelig boks med innvendige mål 100 x 150 x 15 mm. Målestokken er noe usikker pga. justeringer under trykkingen av heftet:





B.2.2 Kopioriginal for hjelpearke for tegning av koblingskjema

Kopioriginal for hjelpearke for tegning av koblingsskjema for hemmelig boks II og III.

HEMMELIG "BOKS"

Forbindelse

Ikke forbindelse

○ 1 ○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5

○ 10 ○ 9 ○ 8 ○ 7 ○ 6

HEMMELIG "BOKS"

Forbindelse

Ikke forbindelse

○ 1 ○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5

○ 10 ○ 9 ○ 8 ○ 7 ○ 6



B.2.3 Komponentliste hemmelig boks, avansert

Boks	3,3 mm MDF - Laserkuttet
Lyspære	2,5 V, 0,2 A, ELFA nr. 133-46-624 Stk. pris 10 stk.: 6,74 NOK + MVA
Lyspære	2,5 V, 0,3 A, ELFA nr. 133-46-625 Stk. pris 10 stk.: 6,74 NOK + MVA
Bryter	Enpolt, trykkbryter, 0,5 A, ELFA nr. 135-03-765 Stk. pris 10 stk.: 11,00 +MVA
Lampesokkel	E10 m/loddespyd, ELFA nr. 133-80-235 Stk. pris 10 stk.: 8,11 + MVA
Rød ledning	Helukabel, 0,25mm ² , rød tvunnet, ELFA nr. 155-20-424 Meterpris ved kjøp av 25 m: 2,35 NOK + MVA
Blå ledning	Helukabel, 0,25mm ² , blå tvunnet, ELFA nr. 155-20-432 Meterpris ved kjøp av 25 m: 2,64 NOK + MVA
Gul ledning	Helukabel, 0,25mm ² , gul tvunnet, ELFA nr. 155-20-440 Meterpris ved kjøp av 25 m: 2,54 NOK + MVA
Binderser	For feste til batteriklemmene
Batteri	4,5 V flatbatteri, standard

Det finnes imidlertid billigere utgaver dersom man søker litt på nettet:

Lampesokkel E10 0,4\$ for 20 stk:

http://www.topledlight.com/e10-bulb-lamp-screw-socket-base-holder-soldering-tag-connection_p1951.html

Lampesokkel E10 8,8\$ for 50 stk:

<https://www.aliexpress.com/item/HGhomeart-50pcs-Mini-E10-Lamp-Socket-Lighting-Accessories-Lamp-Fitting-Pure-Copper-Lampholder-Holder-E10-Holder/32810877022.html>

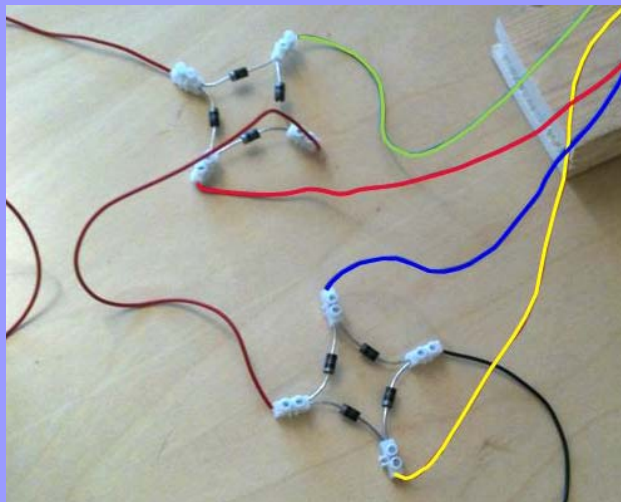
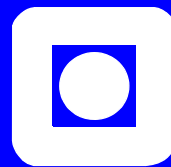


Foto: Nils Kr. Rossing

Heftet er i utgangspunktet skrevet for kurset Teknologi og Forsningslære Modul I og IV. Hensikten har vært å gi en enkel ikke-matematisk beskrivelse av ulike sider ved elektrisitetens læra. Noe av stoffet er hentet fra tidligere utgivelser i SLserien: *Fra elektriske kretser til intelligente hus – Kurshefte* skrevet av Nils Kr. Rossing og *Elektronikk for skolen* av Berit Bungum, Thorarin Stefansson og Nils Kr. Rossing. I tillegg har vi hentet inn stoff som er utarbeidet av Halsten Aastebøl ved Institutt for elkraftteknikk NTNU i forbindelse med studentoppgaver ved studiestart. En oppgave som også er brukt under Energiløypa.

Nils Kr. Rossing
Dosent ved Skolelaboratoriet ved NTNU og
prosjektleder ved Vitensenteret
E-post: nils.rossing@ntnu.no

Halsten Aastebøl
Senioringeniør ved Institutt for elkraftteknikk
E-post: halsten.aastebol@ntnu.no



Skolelaboratoriet
for matematikk, naturfag
og teknologi

<https://www.ntnu.no/skolelab/>