

*Nils Kr. Rossing,
Pål-Tore Storli, Steve Völler, Tore Fagerli*

Fornybar energi



NTNU



Trondheim

Institutt for
fysikk

Skolelaboratoriet
for matematikk, naturfag
og teknologi

Mars 2020

Fornybar energi

Nils Kr. Rossing

Pål-Tore Selbo Solli, Steve Völler, Tore Fagerli

Fornybar energi

Trondheim 2020

Layout og redigering: Nils Kr. Rossing, Skolelaboratoriet ved NTNU

Trykk: NTNU Grafisk senter

Tekst og bilder: Nils Kr. Rossing m.fl., Skolelaboratoriet ved NTNU
Pål-Tore Selbo Storli, Institutt for energi- og prosesseteknikk
Steve Völler, Institutt for Elkraftteknikk

Faglige spørsmål rettes til:

Skolelaboratoriet for matematikk, naturfag og teknologi

Institutt for fysikk

v/Nils Kr. Rossing nils.rossing@ntnu.no

Skolelaboratoriet ved NTNU

Realfagbygget,

Høgskoleringen 5,

7491 Trondheim

Telefon: 73 55 11 43

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

Rev 3.1 – 20.03.20



Forord

Hftet er vel så mye ment som et ressurshefte som en pensumbok. Det inneholder derfor mer enn det som strengt tatt er pensum i faget “Energi og klima” innen for dette teamet. Det er spesielt kapitlene om oppvarming av vann og varmepumpe som ikke er pensum, men som ansees som relevant for undervisningen framover. Begge disse temaene er hentet fra Energiløypa ved NTNU.

Hftet bygger på heftene “Elektrisitetstlære” (Rossing, Aastebøl) [5], “Energiløypa – Veiledningshefte” (Rossing, Storli, Tellebon og Fredagsvik) [6], “Praktisk solcelleteknologi for skolen” (Rossing) [7] og “Varmepumper og solfangere” (Rossing, Fagerli) [8]. Hftet ble satt sammen og supplert til første samling i faget “Energi og klima”, et emne for første års studenter ved masterstudiet i naturfagdidaktikk ved NTNU i 2018. Våren 2019 ble det oppgradert mht. den noe endrede laboratorieøvelsen som hydrodynamiske laboratorier utviklet høsten 2018. I 2020 ble hftet supplert med to laboratorieøvelser knyttet til virkemåten til varmepumper da en i 2020 valgte å legge større vekt på varmepumper enn på vannkraft under samlingen i mars. Vi har også valgt å legge ved det gamle undervisningsopplegget i vannkraft da vi har tro på at dette er lettere å realisere i klasserommet.

Avsnitt 5.9 om turbiner er skrevet av førsteamanuensis Pål-Tore Selbo Storli ved hydrodynamiske laboratorier ved Institutt for energi- og prosessteknikk. Avsnittet ble opprinnelig skrevet til veiledningsheftet til Energiløypa i 2014. Forsker Steve Vøller ved Institutt for Elkraftteknikk har videreutviklet underlagte for karakterisering av solceller og vært med å utviklet motstands Brettet. Tore Fagerli var den som opprinnelige foreslo bruk av kondensasjonsforsøket beskrevet i avsnitt 4.4.1.

Skolelaboratoriet ved NTNU
Mars 2020

Nils Kr. Rossing



Innhold

1 Innledning	9
2 Solceller	10
2.1 Innstråling	10
2.1.1 Solspekteret	12
2.1.2 Spekter fra ulike lyskilder	13
2.2 Framstilling av solceller	14
2.3 Installasjon av solcellepaneler på eget hus	18
2.4 Solcellefysikk	19
2.4.1 En første tilnærming til solcellens virkemåte	19
2.4.2 En dypere forklaring av solcellens virkemåte	20
2.4.3 Serie- og parallellkobling av solceller	23
2.4.4 Virkningsgraden	25
2.4.5 Optimal belastningsmotstand	26
2.4.6 Fyllfaktor	27
2.5 Elevark – Solcellelaboratorium	28
2.5.1 Framstilling av solcellepanel	28
2.5.2 Solcelledrevet radio	30
2.5.3 Måling av virkningsgrad med ferdig måleoppstilling	32
2.5.4 Måling av optimal lastmotstand	34
2.6 Solcelleprosjekter	38
2.6.1 Liten solcellebil	38
2.6.2 Lag en solcellesikke	40
2.6.3 En liten solcelleladet LED-lampe	48
2.6.4 Lag en mobil-lader med solcelle panelene	50
2.6.5 Mendocino-motor	52
2.6.6 Vertikal solcellemotor	57
3 Oppvarming av vann – måling av virkningsgrad	58
3.1 Måling av virkningsgrad – en laboratorieøvelse	58
4 Varmepumpe – Måling av virkningsgrad	62
4.1 Er det mulig å pumpe varme fra et kaldt til et varmt sted	62
4.2 Pedagogisk forklaringsmodeller	66
4.2.1 “Fotball/tennisball-modellen”	67
4.2.2 Sirkulasjonsmodellen	67

4.3	Arbeidsmedier og p-h diagrammer	69
4.3.1	Metningstrykk [3].....	70
4.3.2	p-h diagrammet.....	71
4.4	To laboratorieøvelser knyttet til forståelse av varmpumper	73
4.4.1	Måling av kondensasjonsvarmen til vann	73
4.4.2	Beregning av kondensasjonsvarmen til vanndamp	77
4.4.3	Måling av virkningsgrad (varmefaktor) – En laboratorieøvelse ...	81
4.5	Oppsummering	85
5	Vannkraftverk – Induksjon og måling av virkningsgrad	86
5.1	Mekanisk energi	86
5.2	Fra mekanisk til elektrisk energi	87
5.3	Induksjon	88
5.4	Strøm og magnetfelt	88
5.5	Lenz' lov	89
5.6	Antall viklinger	91
5.7	Generatoren	91
5.8	Byggeprosjekter - generator	93
5.8.1	Bygg en sykkeldynamo	93
5.8.2	Bygg en håndgenerator.....	95
5.9	Turbinen	98
5.10	Måling av virkningsgraden i et enkelt vannkraftverk	101
5.10.1	Bakgrunn	101
5.10.2	Måling av virkningsgrad	107
5.11	Elevark – Vannkraftverk	109
6	Referanser	115
Vedlegg A	Mål virkningsgraden i et vannenergiverk	116
A.1	Oppdraget	116
A.2	Beregn virkningsgraden:	117
A.3	Bruk av SPARK datalogger	118
Vedlegg B	Bruk av Spark datalogger	120
Vedlegg C	Kopioriginaler	122
C.1	Kopi original solcellesikke	122
C.2	Mal for Solcelle LED-lampe	123



1 Innledning

Hovedtemaene i dette heftet er elektrisitet produsert av solceller og generator slik vi finner det i et vannenergiverkt. Fra og med 2020 utgaven har vi også rettet fokus på varmepumper og inkludert to sentrale laboratorieøvelser knyttet til virkemåten til varmepumper og måling av varmefaktor for en slik pumpe. Alle tre temaene har fokus på virkningsgrad som fortsatt er et gjennomgående tema i naturfaget i videregående skole. Siden virkningsgrad er sentralt i heftet har vi tillatt oss å inkludere et undervisningsopplegg som beskriver hvordan vi kan måle virkningsgraden til ulike innretninger for å varme vann, ved hjelp av vannkoker, induksjonsovn eller tradisjonell kokeplate.

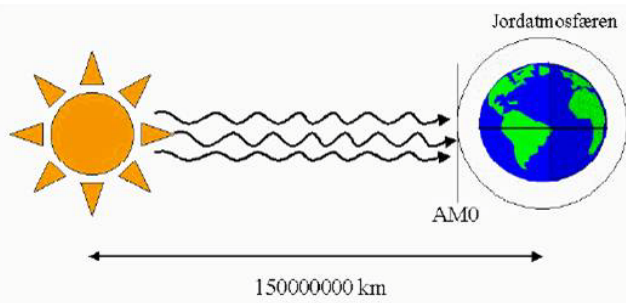
Hefet har hovedsakelig en konseptuell tilnærming til temaene og inkluderer derfor i mindre grad de matematiske modellene som beskriver fenomenene. Det må ikke misforståes dit hen at vi anser matematisk beskrivelse som mindre viktig, men heller at en første tilnærming til temaene bør være konseptuell framfor matematisk. Vi har likevel valgt å avvike noe fra dette prinsippet i forbindelse med måling av kondensasjonsvarmen til vann.

Hefet inneholder flere eksempler på illustrative demonstrasjoner som kan egne seg i klasserommet, i tillegg til modeller som kan lages sammen med elevene. Eksempelvis solcelledrevet bil, solcelle lader for mobiltelefon og solcelleladet lampe. Videre beskrives to ulike generatorer som kan lages sammen med elevene i klasserommet. Flere praktiske forsøk finnes i referanselitteraturen.

2 Solceller

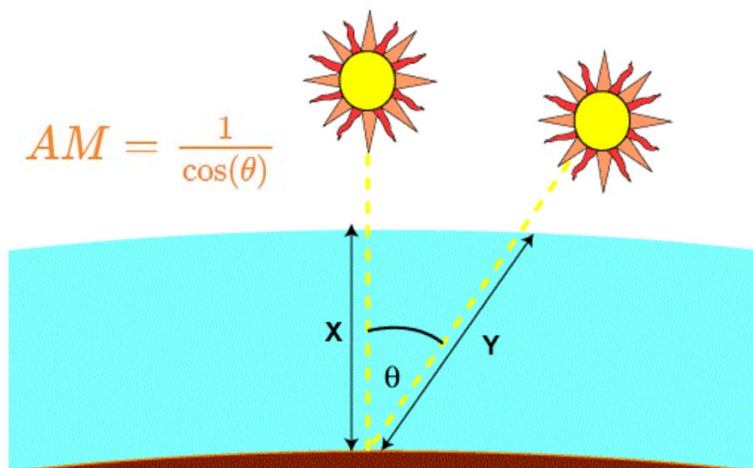
2.1 Innstråling

Solen er uten tvil vår viktigste energikilde. Selv olje og gass har sin opprinnelse i solenergi en gang i tiden. Strålingsenergien som treffer jorda er ca. 15 000 ganger vårt forbruk. Klarer vi å utnytte bare en brøkdel av denne energien skulle vi ha nok energi for all fremtid.



Sola utstråler ca. 63 MW/m². I ytterkant av vår atmosfære har vi en innstrålt effekt på AM0 = 1367 W/m², og gjennomsnittet over jorda er ca. 342 W/m². På en klar sommerdag i Norge kan vi typisk regne en effekt på 800 W/m². Det er derfor mye å ta av også for solcellepaneler her nord.

AM0 er *Air Mass Index* på utsiden av atmosfæren. AM representerer andelen av atmosfæren som lyset må passere gjennom før det treffer jorden relativt til den strekningen det går når sola står i senit (rett over hodet). Figuren under viser hvordan AM er definert¹.



The air mass represents the proportion of atmosphere that the light must pass through before striking the Earth relative to its overhead path length, and is equal to Y/X.

AM1 er da lik AM når sola står i senit og øker etter som den beveger seg ned mot horisonten

1. <https://pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/air-mass>



Innstrålingen avtar med økende solvinkel. Dessuten vil omregningen fra AM til innstrålt effekt resulterer i ulik innstrålingseffekt avhengig av forurensningen i luften.

z	AM	range due to pollution ^[12]	formula (I.1)
degree		W/m ²	W/m ²
-	0	1367 ^[15]	1353
0°	1	840 .. 1130 = 990 ± 15%	1040
23°	1.09	800 .. 1110 = 960 ± 16% ^[17]	1020
30°	1.15	780 .. 1100 = 940 ± 17%	1010
45°	1.41	710 .. 1060 = 880 ± 20% ^[17]	950
48.2°	1.5	680 .. 1050 = 870 ± 21% ^[17]	930
60°	2	560 .. 970 = 770 ± 27%	840
70°	2.9	430 .. 880 = 650 ± 34% ^[17]	710
75°	3.8	330 .. 800 = 560 ± 41% ^[17]	620
80°	5.6	200 .. 660 = 430 ± 53%	470
85°	10	85 .. 480 = 280 ± 70%	270
90°	38		20

Omregning fra AM til strålingsintensitet er gjort i følge empiriske formelen:

$$I = 1.1 \times I_0 \times 0.7^{(AM^{0.678})}$$

Hvor:

I_0 = Er solkonstanten, dvs. den innstrålte effekten på 1353 W/m² i ytterkanten av atmosfæren

0,7 = Skyldes at ca. bare 70% av effekten når ned til bakken

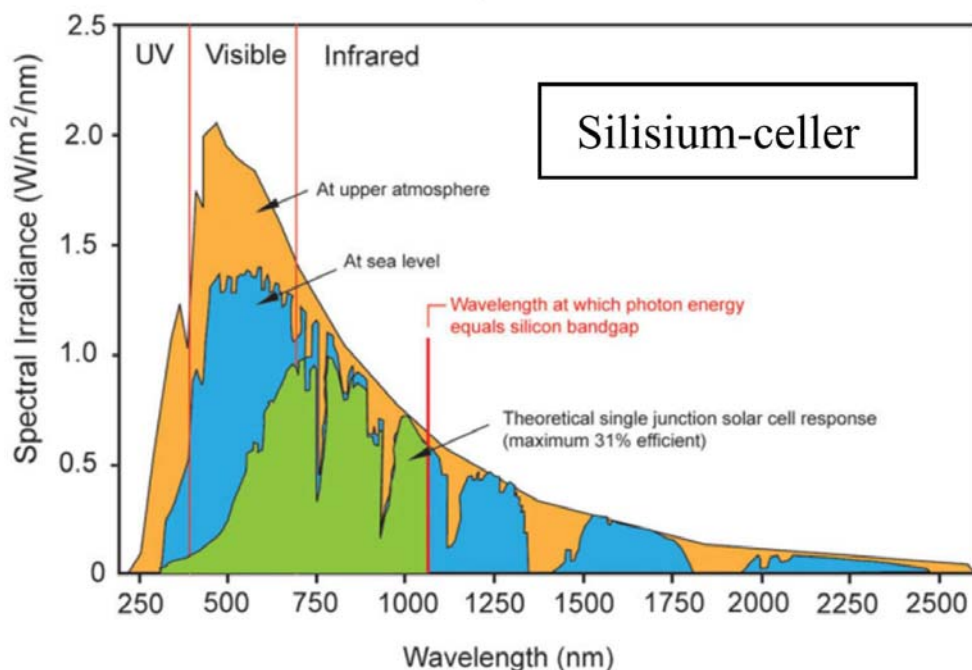
1,1 = Skyldes en økning av intensiteten ved bakken pga. diffus spredning atmosfæren.

0,678 = Er en eksperimentell størrelse for å få verdiene til å stemme med eksperimentelle data

For mer inngående forklaringer se: <https://pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/air-mass>

2.1.1 Solspekteret

Den ytterste kurven på figuren under viser strålingsspekteret på utsiden av atmosfæren (“At upper atmosphere” – oransje). Innenfor denne kurven ser vi en langt mer ujevn kurve (“At sea level” - blå). Vi ser at atmosfæren er et effektivt filter ved enkelte frekvenser.



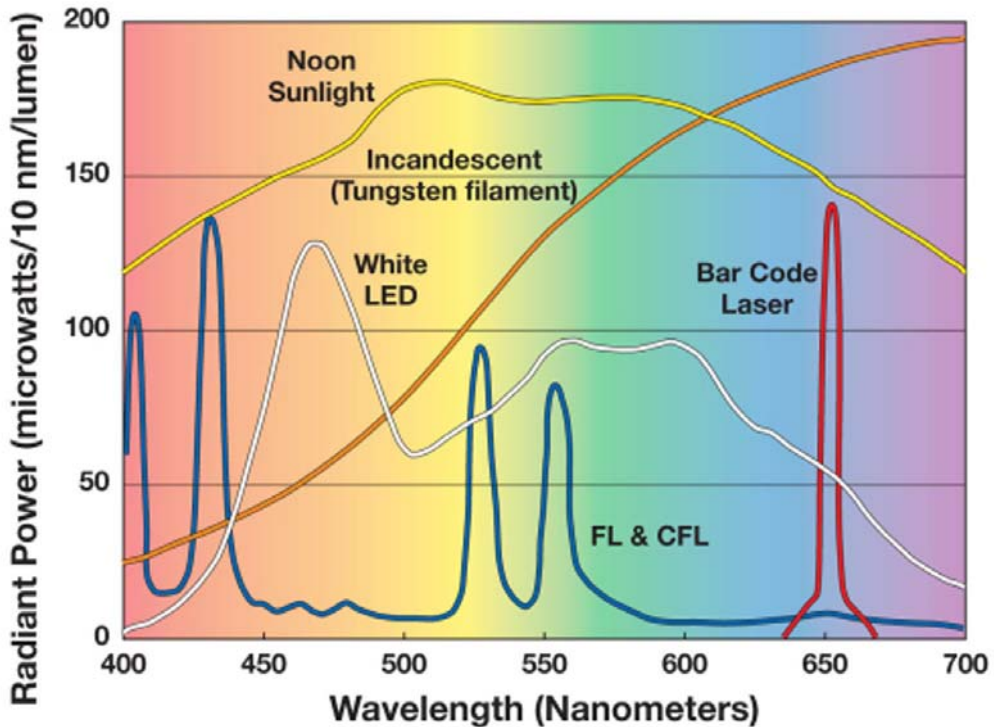
Vi ser at synlig lys kun utgjør en liten del av spekteret. Vi vet også at effekten i fotonene øker med fallende bølgelengde, dvs. økende frekvens. Hvilket betyr at lysets energiinnhold øker mot venstre.

For at en silisium solcelle skal begynne å levere elektrisk energi så må energinivået i fotonene overskride et terskelnivå. Av figuren ser vi at dette nivået inntreffer ved en bølgelengde i underkant av 1100 nm som er et godt stykke inn i det infrarøde området av spekteret, det vi normalt regner som varmestråling. Dernest når følsomhetskurven for en silisiumcelle sitt maksimum rundt 750 nm, dvs. på kanten av den synlige delen av spekteret (rødt). Vi legger også merke til at solcellene i liten grad klarer å utnytte energien i den blå delen av spekteret. Faktum er at denne typen solceller kun klarer å utnytte maksimalt 31% av det innkomne strålingen av solspekteret som slipper gjennom atmosfæren.



2.1.2 Spekter fra ulike lyskilder

I dag går man mer og mer bort fra bruk av glødelamper som f.eks. hallogen pærer og over til LED. Selv om LED lamper lyser sterkt er spekteret ofte temmelig begrenset og lite egnet til å levere lysenergi til solceller, noe som kan være aktuelt i et laboratorieforsøk.

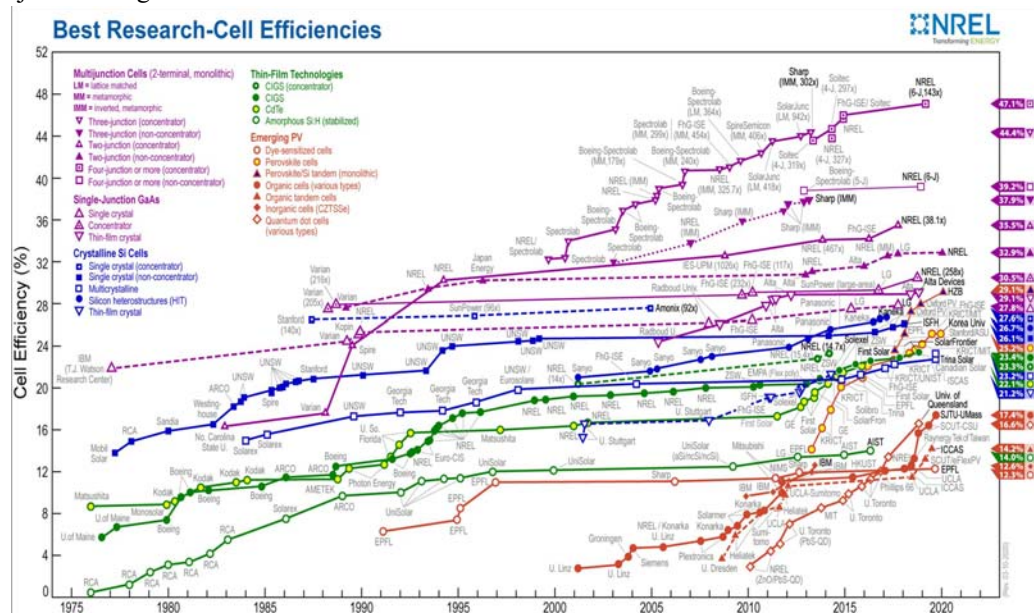


Øverst ser vi solspekteret ved middagstider (“Noon Sunlight”). Videre ser vi spekteret til en tradisjonell glødelampe med wolframtråd (Incandescent). Vi ser også spekteret til en typisk hvit LED (“LED White”) er beskjedent med en topp i det blå området der solcellene av silisium i liten grad klarer å utnytte energien i spekteret. Det samme gjelder lysstoffrør (FL & CFL) som har noen smale spektrallinjer som tilsammen ser ut som noe nær hvitt.

Vi kan altså konkludere med at gode gammeldagse glødelamper eller halogenpærer, er det beste dersom man ikke har tilgang til sollys.

2.2 Framstilling av solceller

De seneste årene har bruken av solceller skutt fart, dette skyldes hovedsakelig at en har klart å senke prisen pr. produsert Watt kraftig. Det arbeides også med å øke virkningsgraden til solceller. Pr. høsten 2019 har en klart å produsere celler med en virkningsgrad på opp til 47,1%. Imidlertid er kostnadene for slike celler så høye at det foreløpig er lite aktuelt å bruke dem til masseproduksjon av energi.



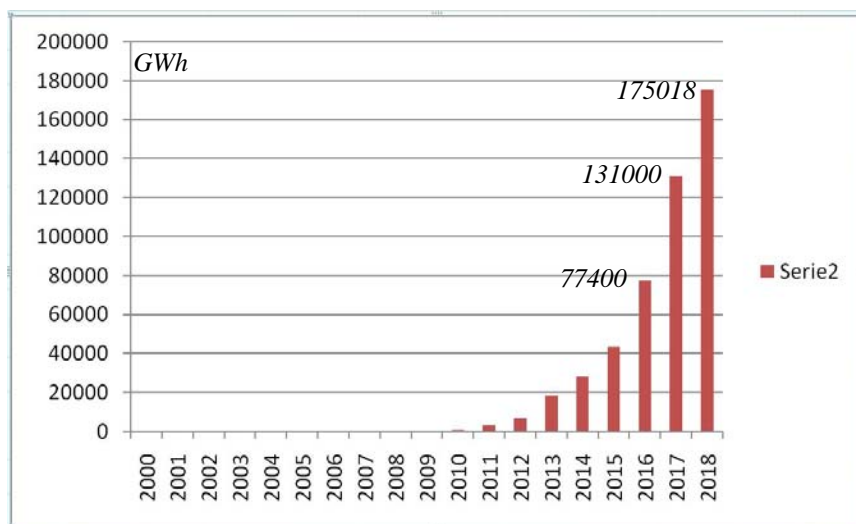
Figur 2.1 Virkningsgraden til ulike teknologier for framstilling av solceller. Pr. høsten 2017 ligger rekorden på 47,1%².

Virkningsgraden for masseproduserte solceller i normal bruk er ca. 20% eller noe lavere.

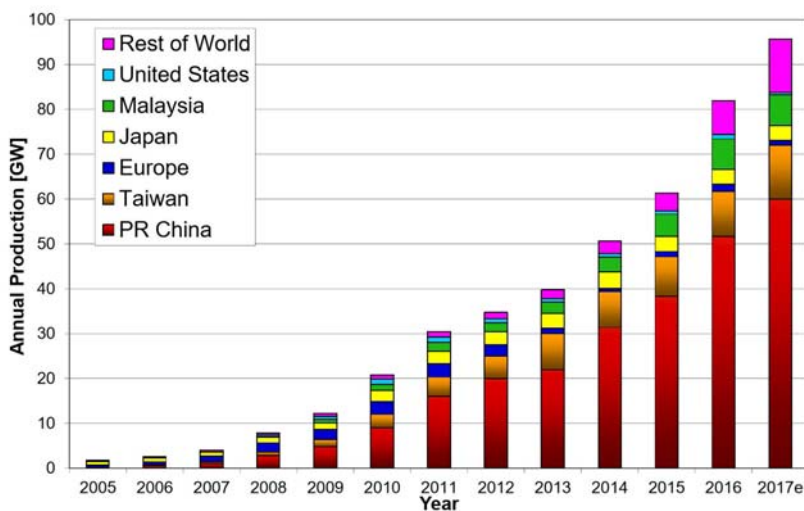
2. http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell



En stor del av produksjonen av solceller skjer i Kina, også det norske firmaet REC måtte flytte produksjonen til Kina. Men Kina er ikke bare store på produksjon de er også stort mht. installasjon av anlegg som et supplement til egen elektrisitetsforsyning. Figuren under viser hvordan produksjonen av elektrisk energi fra solcelleanlegg har utviklet seg i Kina de seneste årene.



Figur 2.2 Elektrisitet produsert av solcelleanlegg i Kina fra 2000 – 2018³



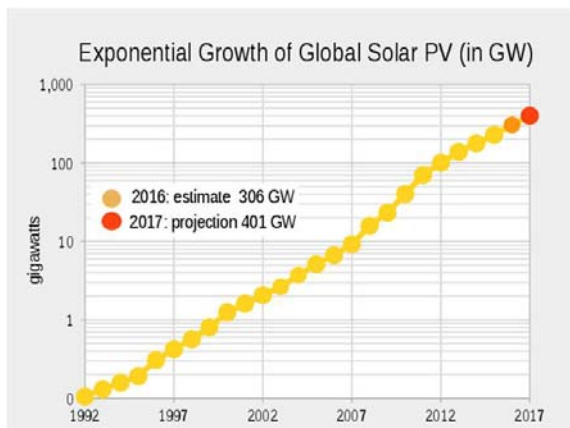
Figur 2.3 Totalproduksjon av solceller på verdensbasis fra 2005 – 2017⁴

3. [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power_by_country#/media/](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power_by_country#/media/File:China_Photovoltaics_Installed_Capacity_2016.png)

File:China_Photovoltaics_Installed_Capacity_2016.png

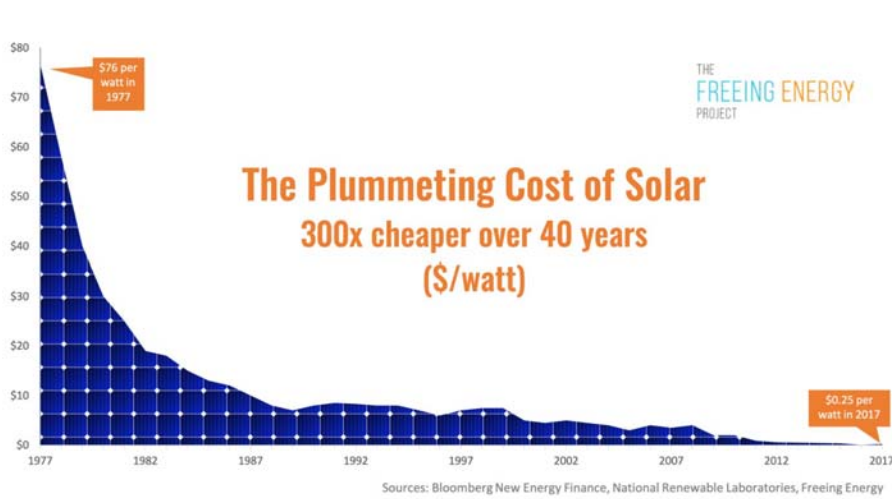
4. <http://www.climatechangenews.com/2015/02/02/china-roars-past-eu-as-solars-largest-market/>

Figur under viser utviklingen av installasjon av solceller i verden fra 1992 – 2016 (2017 angis som en prognose). Legg merke til at veksten er eksponentiell (logaritmisk vertikal akse).



Figur 2.4 Installasjon av solceller fra 1992 – 2016 (prognose 2017).

Figur 2.5 viser prisutvikling for solceller fra 1977 til 2015. Vi ser at prisen gjør et hopp nedover etter at Kina kommer på banen i 2010 – 2012. En kan stille seg spørsmålet hvorfor det er slik at prisen på solceller forsetter å falle jevnt og trutt, men f.eks. prisen på olje, gass og kull går opp og ned. En årsak er at solceller kan masseproduseres, men hovedårsaken er at solceller kan brukes over lang tid (20 – 30 år), mens fossile energikilder kun kan brukes en gang.

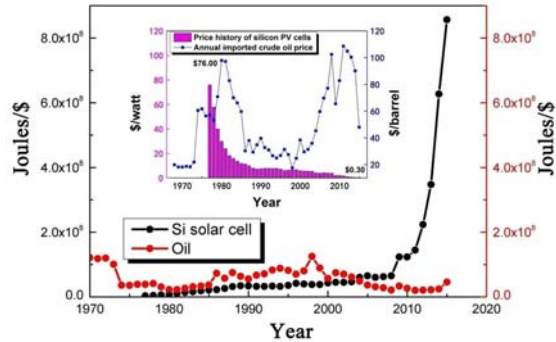


Figur 2.5 Prisutvikling for solceller fra 1977 til 2017 i \$ pr. produsert Watt⁵

5. <https://www.freeingenergy.com/why-does-the-cost-of-renewable-energy-continue-to-get-cheaper-and-cheaper/>

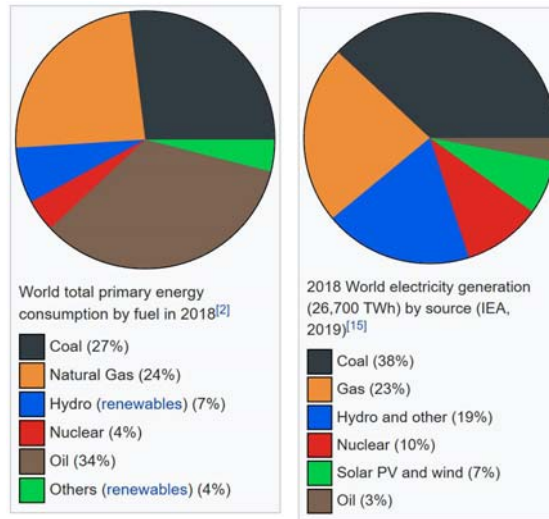


Dette kommer enda tydeligere fram i den neste figuren som viser hvordan pris pr. energienhet (Joule) pr. \$ blir når man ser på kostnaden over livsløpet til de to energi formene⁶. Mens fossilt brensel kun kan brukes en gang, kan solceller brukes over lang tid. Her er det viktig å presisere at mens fossilt brensel er en *energikilde*, så er solceller en *energiomvandler* med sola som kilde.



Figur 2.6 Energimengde pr. dollar for fossilt brensel sammenlignet med energi fra solceller.

La oss til slutt se på andelen fornybar energi i forhold til andre energiformer på verdensbasis. Til venstre på figur 2.7 ser vi andelen fornybar energi av den totale energiproduksjonen på verdensbasis (2018). Diagrammet til høyre viser andelen produksjon av fornybar energi av den totale produksjonen av elektrisitet.

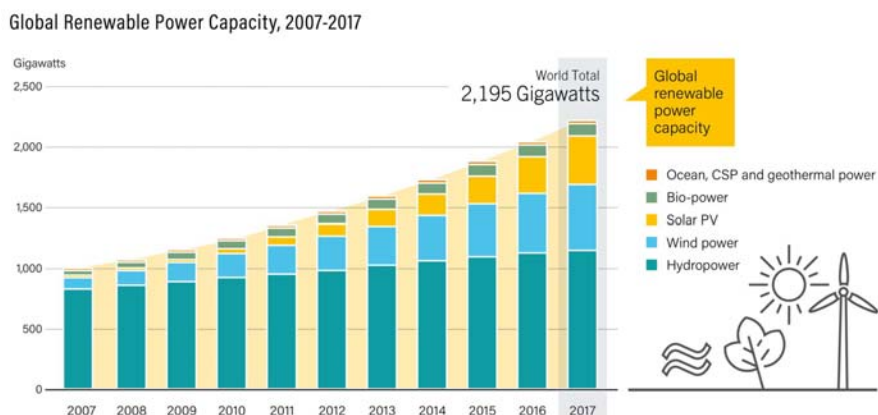


Figur 2.7 Oversikt over total energiproduksjon i verden. Til venstre for alle energibærere, til høyre de som produserer elektrisitet.⁷

Fra figur 2.7 ser vi i 2018 utgjorde solceller ca. 7% av den totale elektrisk produserte energien, mens fossilt brensel utgjorde 64%. Til sammenligning utgjorde den totale produksjonen av elektrisitet fra “vann og vind” o.l. kun 19%.

6. https://www.researchgate.net/publication/310050816_Design_and_fabrication_of_silicon_nanowires_towards_efficient_solar_cells
7. https://en.wikipedia.org/wiki/World_energy_consumption

Figur 2.8 viser hvordan produksjonen fordeler seg mellom de ulike fornybare energikildene.



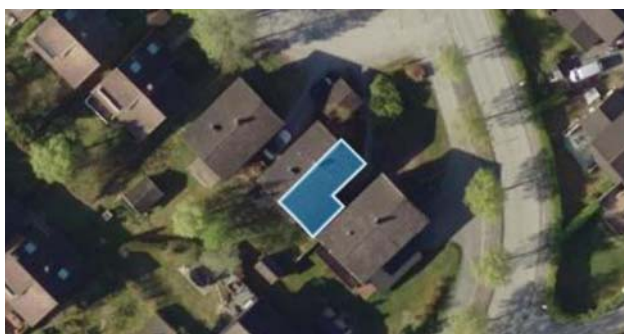
Figur 2.8 Andel produsert energi av fornybare energikilder fra 2007 – 2017.⁸

Vi ser at så langt (pr. 2017) er energi produsert fra vind større enn energi produsert fra solceller, men at energi produsert av solceller er på rask frammars.

2.3 Installasjon av solcellepaneler på eget hus

Flere energiverkt tilbyr i dag å installere solcellepaneler på taket av private bolighus. Med en gunstig plassering av taket kan en dekke opp til 25 – 40% av sitt årlige forbruk. Siden det oftest er slik at produksjonen av elektrisitet fra solceller er høyest når behovet er lavest, tilbyr energiverket å betale for energi levert fra takmonterte solcellepanelene til nettet. Når behovet er større enn produksjonen henter man elektrisk energi fra nettet.

Ved f.eks. å gå inn på nettstedet <https://www.otovo.no/> og skriver inn sin boligadresse, vil man automatisk få et overslag over hva man kan forvente å produsere i løpet av et år med et foreslått solcellepanel som vises som et skravert felt på taket av ens eget hus. Dette gjelder først og fremst eneboliger og ikke blokkleiligheter.



I dette eksempelet estimeres den optimale leverte energimengden til 8667 kWh pr. år. Med en typisk levetid på 30 år så vil anlegget i løpet av denne tiden ha produsert 13 års forbruk, med et typisk forbruk på 20 000 kWh pr. år.

8. <https://www.commercialng.com/ren21-report-soaring-energy-demand-leaves-renewables-playing-catch-up/>



Den foreslåtte installasjonen består av 33 paneler til en samlet pris på 203 323,- kr. Man kan trekke fra offentlig støtte på 21 337,- kr. Slik at den personlige kostnaden for anlegget blir på 181 986,- kr. Inkludert i denne prisen er utstyr for å levere strøm til nettet ved produksjon ut over forbruket. Pr. i dag betaler energiverket kr. 1,0 pr. kWh levert energi.

2.4 Solcellefysikk

La oss innlede med litt enkel solcellefysikk. Vi har valgt å gjøre dette i to trinn. Først beskriver vi virkemåten på den enklest mulig måten slik vi har tid til overfor studentene i Energiløypa. Deretter skal vi gi en mer inngående forklaring for å gi studentassistentene litt bedre bakgrunn.

2.4.1 En første tilnærming til solcellens virkemåte

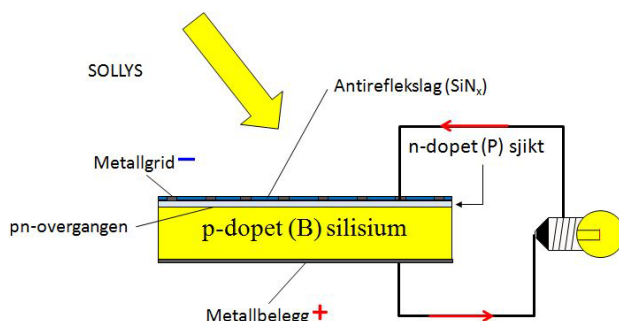
En solcelle består av tynne flak silisium, ett av de vanligste grunnstoffene i verden. I utgangspunktet er rent silisium en dårlig elektrisk leder, ja nesten en isolator. For at silisium skal fungere som en solcelle, må den forurenses av andre grunnstoffer, f.eks. fosfor og bor. Oversiden av solcellen 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). Denne hindrer ytterligere flyt av elektroner for 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 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, bli positivt ladd.

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. å få en lyspære til å lyse.

For at mest mulig av lyset som treffer overflaten av solcellen skal omdannes til elektrisk energi, så må vi forhindre at lyset reflekteres fra overflaten. Derfor dekkes overflata med et lag med et antirefleksmateriale. Det er dette laget som gir solcellene den karakteristiske blåfargen.



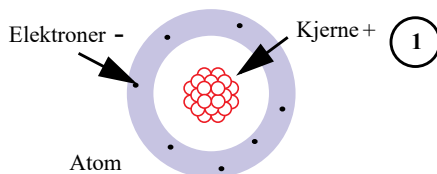
2.4.2 En dypere forklaring av solcellens virkemåte

I dette avsnittet skal vi gå et skritt videre i å forklare solcellens virkemåte i større detalj.

For å forstå hvordan en solcelle virker, må vi gå litt dypere inn i hvordan den er bygd opp. La oss kort repetere atommodellen og forskjellen på en isolator og en leder.

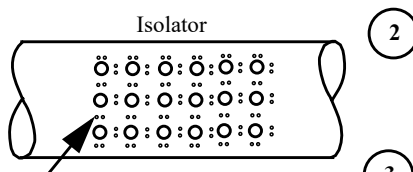
1. **Atomer**

Alle stoffer består av atomer. Et atom har en atomkjerne omkranset av elektroner. Kjernen er positivt ladet, og elektronene er negativt ladet. Hvor fast elektronene er bundet til atomkjernen, varierer fra materiale til materiale.



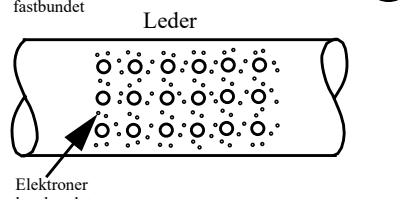
2. **Elektrisk isolator**

Hos en isolator er elektronene **fast** bundet til atomkjernen. Det skal mye energi til for at de skal forlate atomet og bevege seg fritt i materialet.



3. **Elektrisk leder**

Hos en elektrisk leder er elektronene **løst** bundet til atomene og vil lett kunne bevege seg rundt i materialet. De fleste **metaller** har denne egenskapen.



Solceller består av *halvledere*. La oss se hva som skiller halvlederen fra isolatorer og ledere.

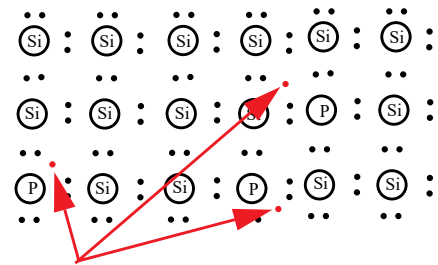


4. Halvleder av n-typen

En halvleder er en isolator som er *forurenset* av et annet stoff slik at det får noen frie elektroner og blir svakt ledende.

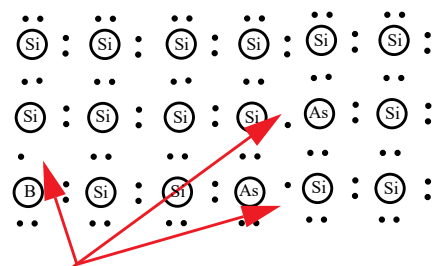
Dersom vi forurenser isolatoren *silisium* (Si) med grunnstoffet *fosfor* (P), vil det forurensete silisiumet bli *litt ledende* med *noen* frie elektroner. Dette skyldes at fosfor-atomene, som erstatter silisium-atomene i krystallgitteret, har fem elektroner i ytterste elektronskall. Dette femte elektronet deltar ikke i sammenbindingen av krystallgitteret og kan derfor, om det tilføres litt energi, bevege seg ganske fritt i materialet. Et slikt materiale kalles en *halvleder av n-typen* (n for negative elektroner).

4



Ekstra elektroner

5



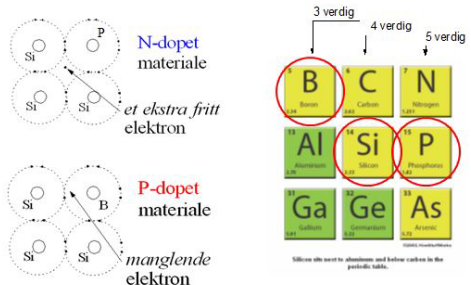
Manglende elektroner

5. Halvleder av p-typen

Dersom vi forurenser silisium med grunnstoffet *bor* (B), får vi en halvleder med “for få” elektroner. Bor har nemlig bare tre elektroner i ytterste skall. Det oppstår derfor *elektronhull* i krystallgitteret. Et slikt stoff har en tendens til å trekke til seg elektroner. Vi kaller dette stoffet for *en halvleder av p-typen* (p for positive hull).

Selv om n-type materialet har noen ekstra frie elektroner, og p-type materialet “ønsker” seg elektroner, så er begge materialene elektrisk nøytralt.

N-dopet og P-dopet materiale



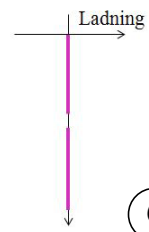
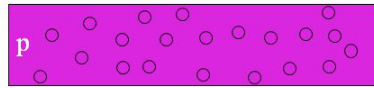
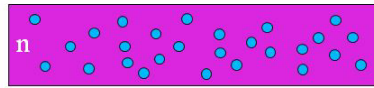
Figuren til venstre viser hvor bor og fosfor befinner seg i forhold til silisium i det periodiske systemet. Bor har 3 elektroner i ytterste skall, ett mindre enn silisium. Silisium dopet med bor vil derfor gi frie “hull”. Fosfor har 5 elektroner i ytterste skall, ett mer enn silisium. Silisium dopet med fosfor vil derfor gi frie elektroner. Også hull kan være frie og bevege seg i materialet. Dette skjer ved at elektroner fra naboatomer fyller hullet. Dermed vil naboatomet få et hull. Slik kan hullene bevege seg fra atom til atom.

6. 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

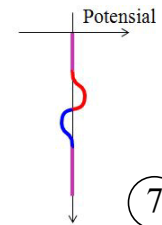
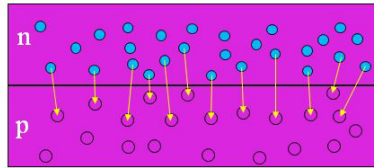
Elektrisk nøytrale



6

7. Ladningsforflytning

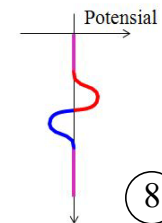
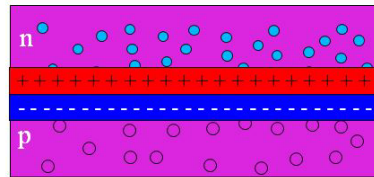
Siden n-området har frie elektroner, og p-området har frie elektronhull, vil elektronene i n-området diffundere over til p-området og vil fylle en del av hullene i et smalt sjikt.



7

8. Elektrisk felt (potensialbarriere)

Etterhvert 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 p-n-overgangen.



8

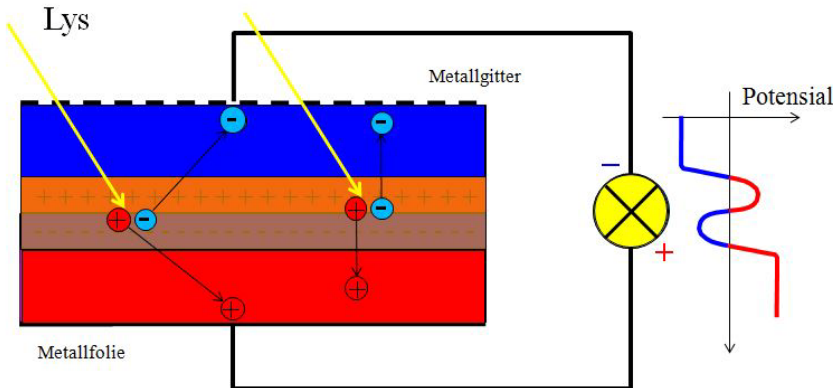
Etter hvert blir derfor stadig vanskeligere for elektronene å komme seg over til p-området og det oppstår til slutt en likevekt. Dessuten tappes både p- og n-området for ladningsbærere, og det oppstår et *utarmingssjikt* nær p-n-overgangen. Skulle det imidlertid finnes *frie elektroner* i p-området vil 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.

9. 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 p-n-overgangen belyses.



10. Lyset tilfører elektronene energi

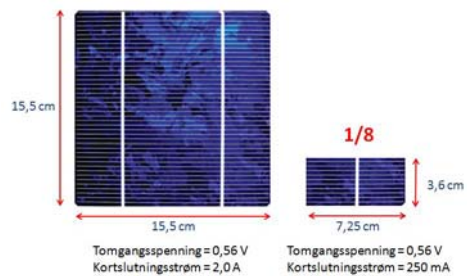
Når lys med tilstrekkelig energi treffer p-n-overgangen, vil elektroner slås løs fra krystallgitteret (tilføres energi slik at de eksiteres og blir fri ladningsbærere). Elektronene som frigjøres i pn-overgangen vil umiddelbart føres over til n-området av det elektriske feltet (siden de er negative vil 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.

2.4.3 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.

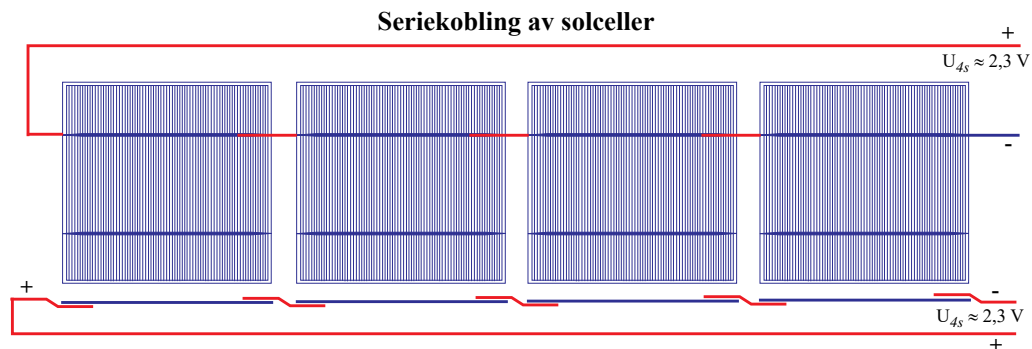
Kortslutningsstrømmen er definert som strømmen som går i kretsen når for- og baksiden av solcella kortsluttes. Kortslutningsstrømmen kan måles med et Amper-meter (i posisjon 10 A) som kobles rett over polene til solcella.



En solcelle som er delt opp i mindre 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.

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 2.9 Seriekobling av fire solceller (nederst sett fra siden).

$$U_{ns} \approx n \cdot U_{oc} \quad (2.1)$$

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*. n er antall celler vi kobler i serie.

Kortslutningsstrømmen (I_{sc}) for seriekoblingen vil endre seg lite, men sannsynligvis gå noe ned i forhold til for en celle. Årsaken er at cellenes indre motstand øker relativt mer enn økningen i spenning. At cellene kun kobles sammen ved å legge koblingsbåndene inntil metallkontaktene på solcellene gjør ikke saken bedre.

$$I_{ns} \approx I_{sc} \quad (2.2)$$

Den leverte effekten vil være ca. n ganger så høy siden spenningen øker n ganger:

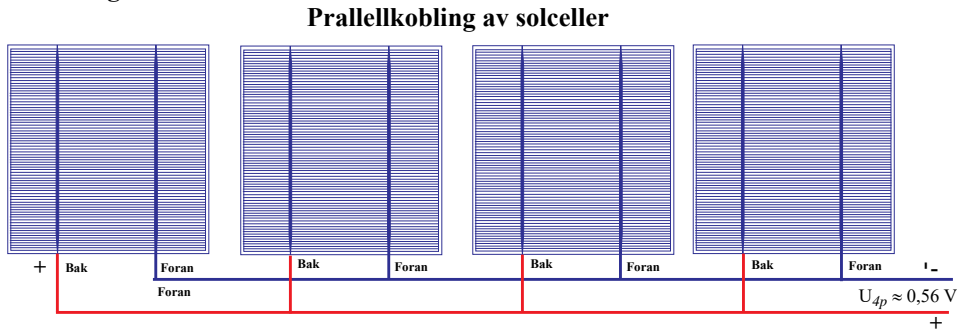
$$P_{ns} \approx n \cdot P_{max} \quad (2.3)$$

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.





Parallellkobling av celler

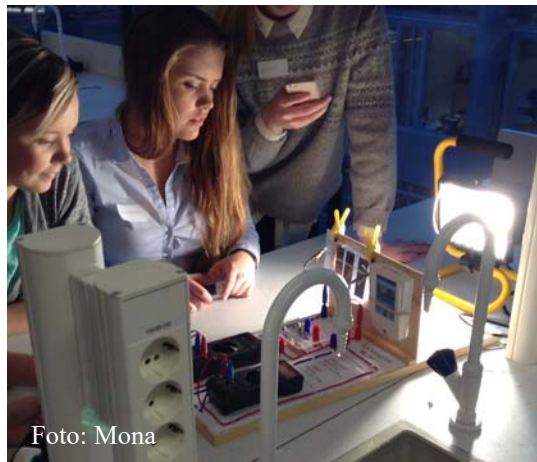


Figur 2.10 Parallellkobling av solceller.

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.

$$I_{np} \approx n \cdot I_{sc} \quad (2.4)$$

I_{np} er strømmen vi oppnår ved parallellkobling av n celler, og I_{sc} er kortslutningsstrømmen vi måler for én celle (*short circuit* (sc)).



Tomgangsspenningen (U_{oc}) for seriekoblingen vil endre seg lite.

$$U_{np} \approx U_{oc} \quad (2.5)$$

Den leverte effekten vil være ca. n ganger så høy siden strømmen er økt n ganger:

$$P_{np} \approx n \cdot P_{max} \quad (2.6)$$

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.

2.4.4 Virkningsgraden

Virkningsgraden til en solcelle defineres som v :

$$v = \frac{P_{el}}{P_{lys}} \quad (2.7)$$

hvor

P_{el} er elektrisk energi til en *optimal belastningsmotstand*.

P_{lys} er lyseffekten i W som treffer det aktuelle solcellearealet.

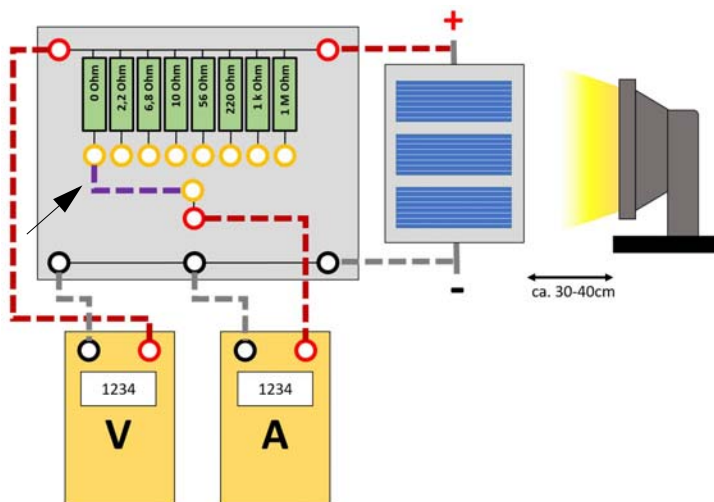
Med lysintensitetsmåleren måler man lysintensiteten i W/m^2 . For å finne lyseffekten som treffer solcellene, må man måle og beregne arealet til cellene. Effekten finner man ved å multiplisere lysintensiteten med arealet i m^2 .

2.4.5 Optimal belastningsmotstand

Belastningsmotstanden eller bare *lastmotstanden* er den komponenten hvor den innsamlede effekten skal leveres og gjøre nytte for seg. Selv om vi i våre eksperimenter bruker en motstand, vil den i en virkelig situasjon kunne være et batteri, en motor eller noe annet man ønsker å bruke elektrisiteten til.

Normalt vil man at mest mulig av den innsamlede effekten fra panelet skal komme til nytte. Det skjer når solcellen belastes med den optimale lasten, dvs. en motstand med akkurat riktig verdi. For å finne denne måler man strøm og spenning i ulike motstander og beregner effekten for hver av motstandsverdiene.

Figuren til høyre viser en oppkobling med et *motstands Brett* hvor man kan endre verdien til lastmotstanden samtidig som man måler strøm- og spenning.



Som vi ser så belyses solcellepanelet (tre celler) av en lampe.



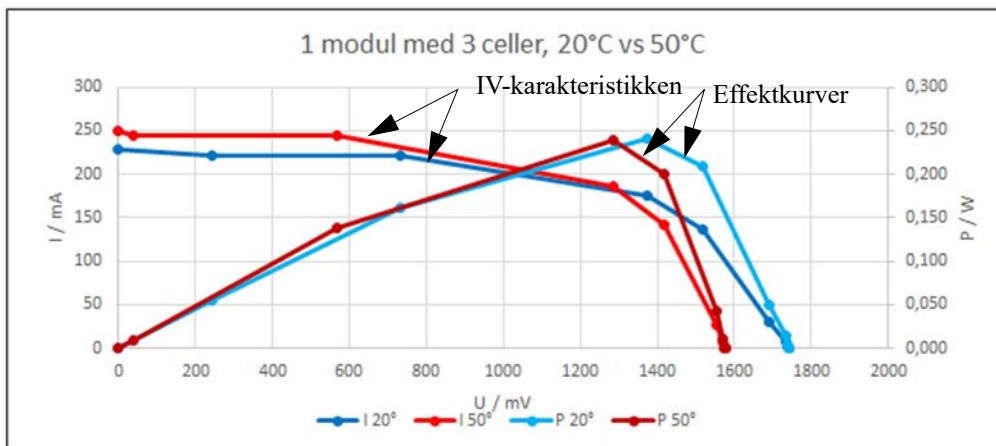
Tabellen under viser to eksempler på en slike måleserier med målt strøm og spenning for ulike motstandsverdier og for to overflatetemperaturer hos solcellen. Effekten, $P = U \cdot I$, er beregnet i hvert tilfelle.

Seriell 3 celler (20°C)										
R / Ohm	SC	0	2,2	6,8	10	56	220	1000	1000000	OC
V / mV	0	244	733	1375	1520	1690	1735	1737	1744	1744
I / mA	228	222	221	175	137	29,4	7,9	1,72	0	0
P / W	0,000	0,054	0,162	0,241	0,208	0,050	0,014	0,003	0,000	0,000

Seriell 3 celler (50°C)										
R / Ohm	SC	0	2,2	6,8	10	56	220	1000	1000000	OC
V / mV	0	37	567	1287	1420	1553	1570	1574	1575	1580
I / mA	250	245	245	186	141	27,5	7,2	1,58	0,01	0
P / W	0,000	0,009	0,139	0,239	0,200	0,043	0,011	0,002	0,000	0,000

SC (Short Circuit) er målt rett over solcellepanelet. At det er forskjell på denne målingen og 0 Ohm skyldes at det er litt motstand i tilførsledningene på motstands Brettet.

Tegner vi opp disse resultatene i et I/U-diagram vil det se ut som på figuren under:



Først har vi tegnet opp I/U-karakteristikken for de to temperaturene for hver av målingene (hver prikk tilsvarer en motstandverdi). Deretter er effektkurvene tegnet. Av tabellene over ser vi at solcellene leverer maks effekt ved en motstand på ca. **6,8 Ohm som da er den optimale lastmotstanden.**

2.4.6 Fyllfaktor

Fyllfaktoren for en solcelle forteller noe om kvaliteten av cella.

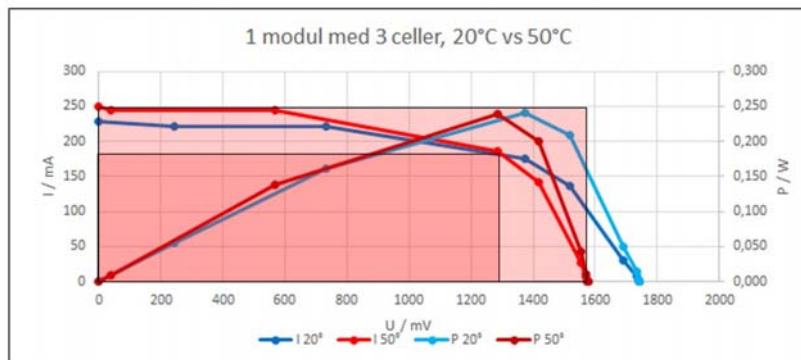
For å bestemme fyllfaktoren tegner vi rektangelet med arealet uttrykt med:

$$\text{Kortslutningsstrømmen} \times \text{Tomgangsspenning} = I_{sc} \cdot U_{oc}$$

Deretter tegnes rektangelet med arealet uttrykt med

$$\text{Strømmen med maks. levert effekt} \times \text{Spenningen ved maks. levert effekt} = I_{Pmax} \cdot U_{Pmax}$$

Fyllfaktoren, FF, er definert som forholdet mellom disse to arealene.



$$FF = \frac{I_{pmax} \cdot U_{pmax}}{I_{sc} \cdot U_{oc}}$$

Jo nærmere FF er lik 1 jo bedre kvalitet har solcella.

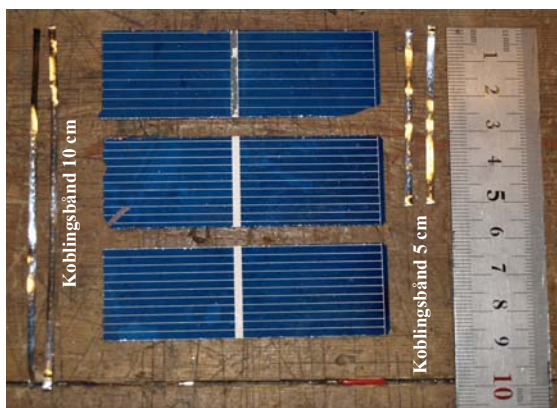
I det neste avsnittet skal vi gå gjennom den praktiske øvelsen.

2.5 Elevark – Solcellelaboratorium

2.5.1 Framstilling av solcellepanel

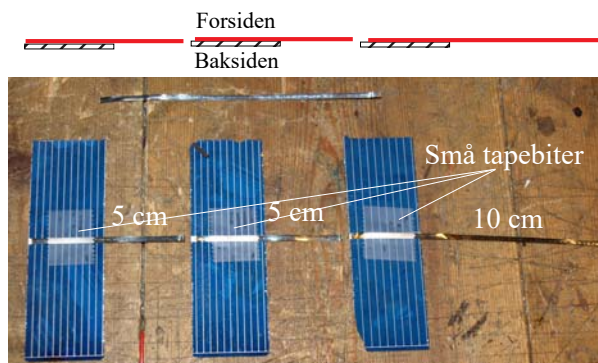
Lag et solcellepanel bestående av tre solceller a 2,5 x 7,7 cm.

1. Hent ev. skjær tre solcellebiter
2,5 x 7,7 cm
2. Kutt opp koblingsbånd:
2 stk. 5 cm
2 stk. 10 cm

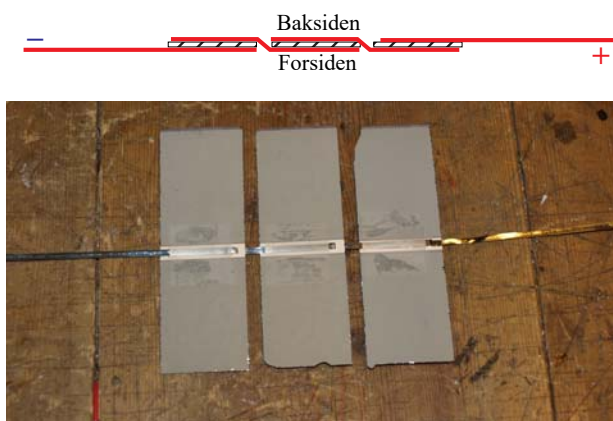




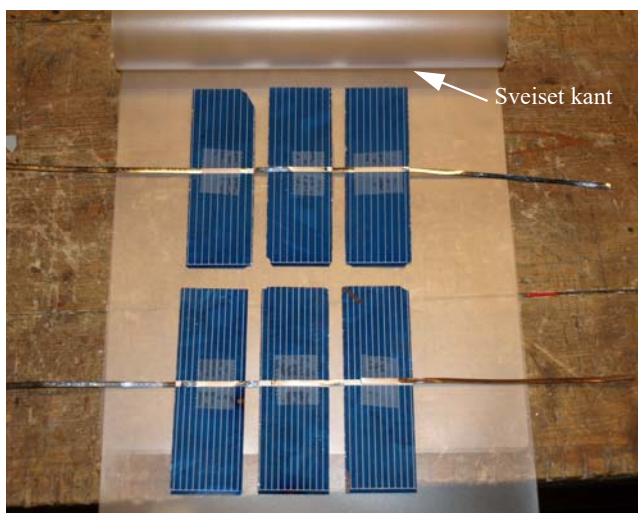
3. Bruk litt tape og fest koblingsbåndene til forsiden av solcellene som vist på bildet til høyre.



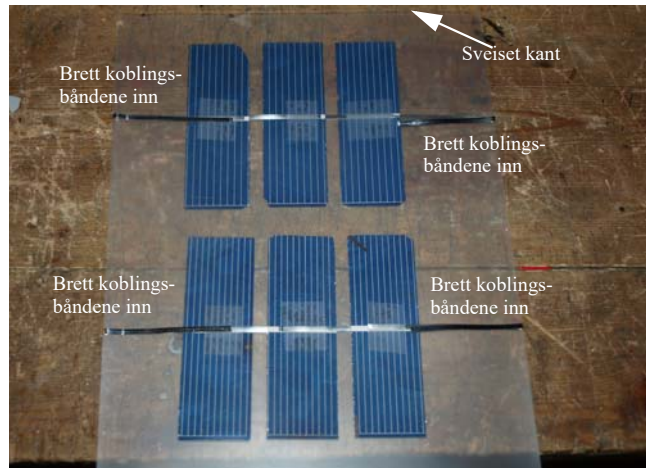
4. Snu cellene slik at baksiden kommer opp. Seriekoble cellene som vist øverst på tegningen til høyre. Merk hvordan koblingsbåndene fra *forsiden* på én celle kobles til *undersiden* av den neste.



5. Legg solcellene inn mellom plastlaminatet som vist på figuren til høyre. Gå gjerne sammen resten av gruppen slik at dere laminerer to paneler sammen. Sørg for avstand mellom dem slik panelene senere kan klippes fra hverandre.



6. Brett koblingsbåndene inn over laminatet slik at de ikke kommer i veien under lamineringsprosessen.



7. Kjør laminatet med solcellene i lamineringsmaskinen.
8. Solcellepanelet er klart til bruk.



2.5.2 Solcelledrevet radio

I denne oppgaven skal studentene koble sammen solcellepaneler for å drive radioen. Radioen er en enkel FM-radio som krever mellom 5 og 6 V for å gi lyd.

1. Gå sammen hele gruppen og bruk de to solcellepanelene dere har laget, ev. supplert av noen av de panelene som er laget tidligere, og få radioen til å spille.
2. Bruk lampa til å belyse panelene.





3. Lag en tegning som viser hvordan dere koblet sammen panelene.

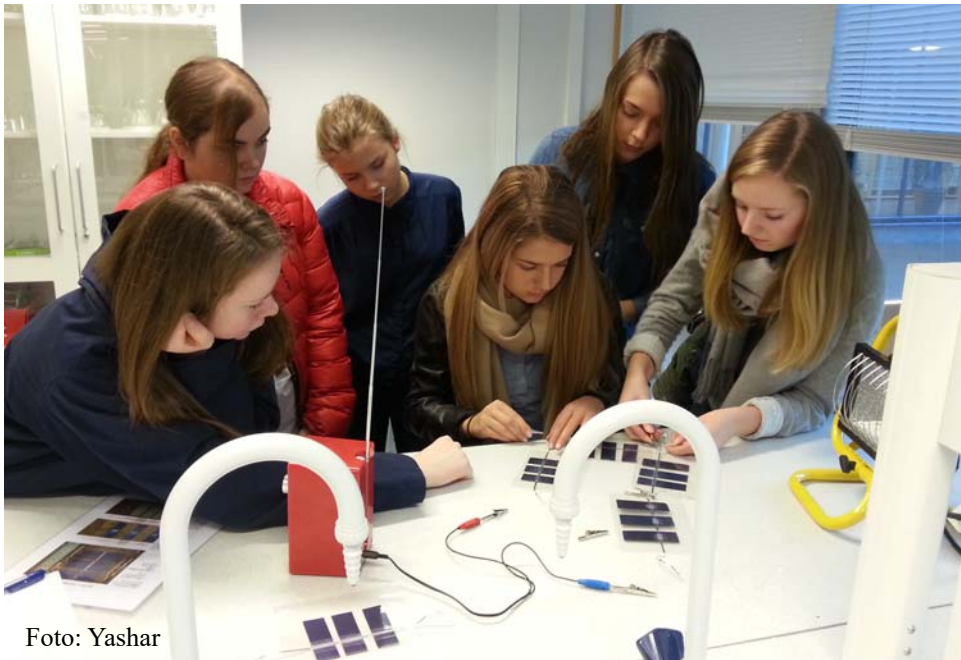
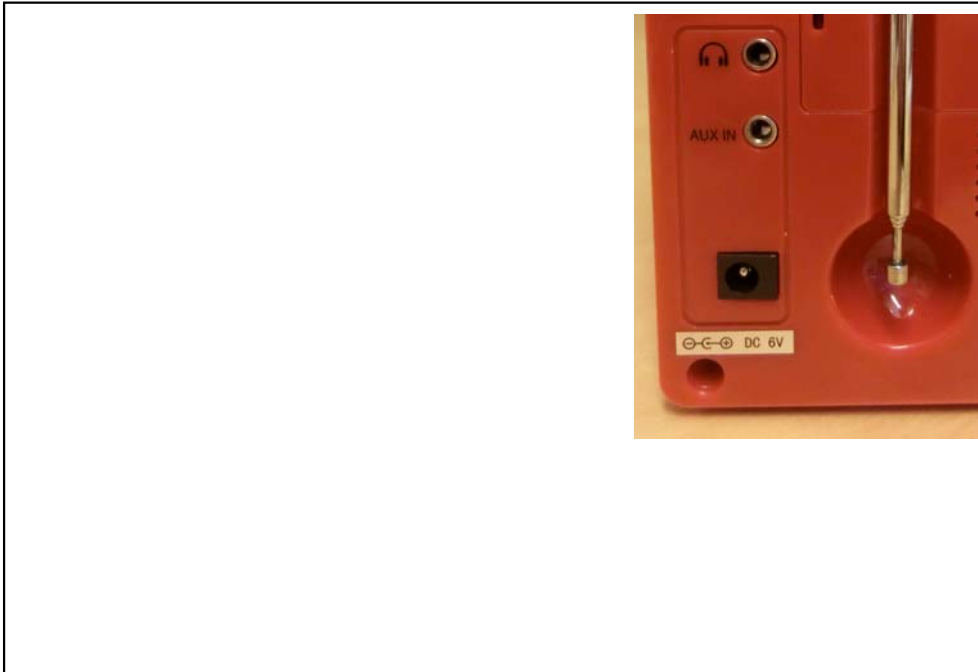


Foto: Yashar

2.5.3 Måling av virkningsgrad med ferdig måleoppstilling

Dere kan nå måle virkningsgraden til solcellepanelet med en ferdig måle oppstilling som vist på bildet til høyre.

Monter solcellepanelet med de to klipsene og koble de to krokodilleklemmene til koblingsbåndene. For å få størst mulig overensstemmelse mellom måling av lys-effekt og den effekten som treffer solcelle panelet, kan man plassere solcellepanelet foran lysmåleren så tett inntil denne som mulig. Det er ikke så viktig hvilken vei panelet kobles.

1. **Slå på** lyskilden som er på ca. 150 Watt. Pass på å gjøre målingen så raskt som mulig. Blir målingen for langvarig vil panelet bli varmt og ytelsen går ned.

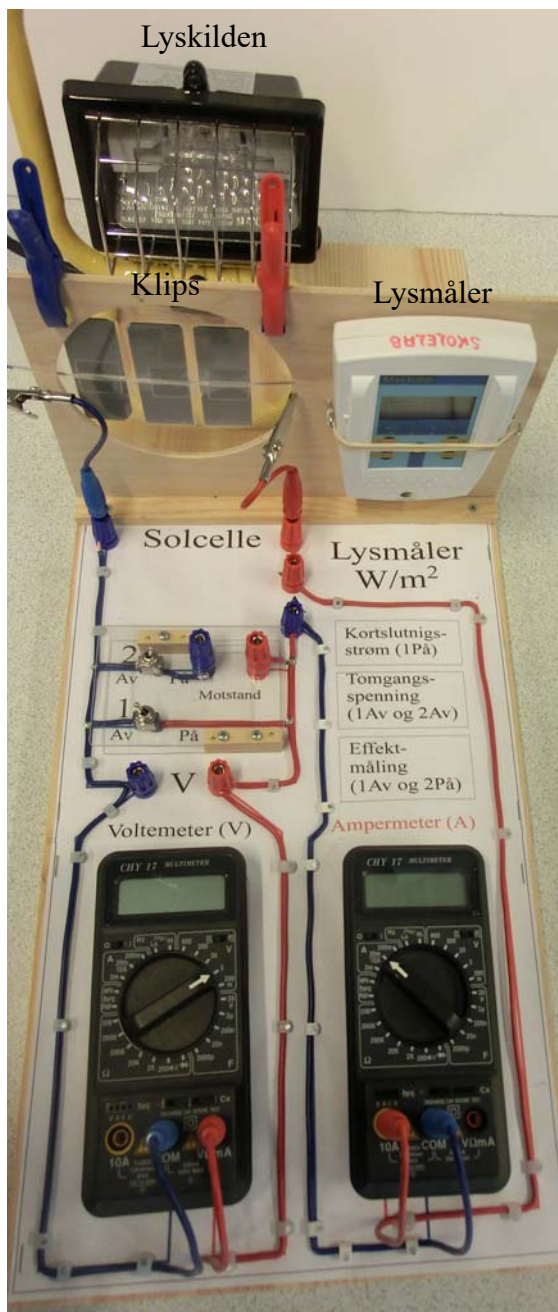
Mål tomgangsspenning:

Tomgangsspenningen er den spenningen solcelle leverer når den ikke belastes. Det vil si ingen motstand er tilkoblet. Det kan være lurt å måle tomgangsspenningen for å sjekke at solcellene er koblet opp riktig. Spenningen skal vær ca, 1,65 V:

2. **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. Det kan være lurt å måle denne strømmen da den indikerer om det er god kontakt mellom koblingsbåndene og solcellene. Strømmen bør være mellom 150 – 250 mA avhengig av hvor kraftig lyskilden er.





3. **Sett bryter 1** i posisjon **På**
Sett bryter 2 i posisjon **Av**
Les av strømmen på
Ampere-metret: _____ Ampere

Mål effekt levert til lastmotstand:

Levert effekt er den effekten solcellepanelet leverer til lastmotstanden. Effekt er strømmen som går i motstanden \times spenningen målt over motstanden.

4. **Sett bryter 1** i posisjon **Av**
Sett bryter 2 i posisjon **På**
Les av strømmen på Ampere-metret: _____ Ampere
Les av spenningen på Volt-metret: _____ Volt
5. **Beregn levert Elektrisk effekt** som *strømmen \times spenningen* = _____ V \times _____ A = _____ Watt

Mål lyseffekt levert til solcellepanelet:

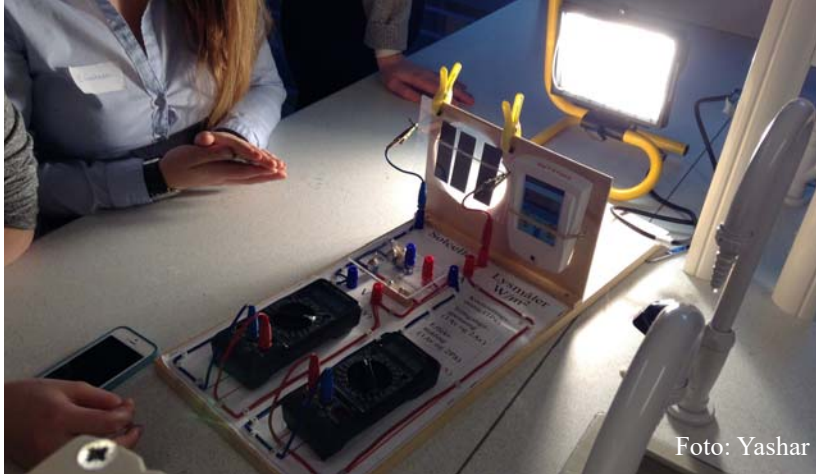
Lysintensiteten ved solcellepanelet leses av på Lysmåleren. Avlesningen gjøres i Watt pr. kvadratmeter.

6. **Avlest lysintensitet:** _____ W/m²
7. 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 Bredde \times Lengde: = 3 \times _____ m \times _____ m = _____ m²
9. **Beregn Lyseffekt** som treffer solcellebitene = *lysintensitet \times 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 = _____
11. Beskriv med egne ord hva tallet for virkningsgraden betyr:

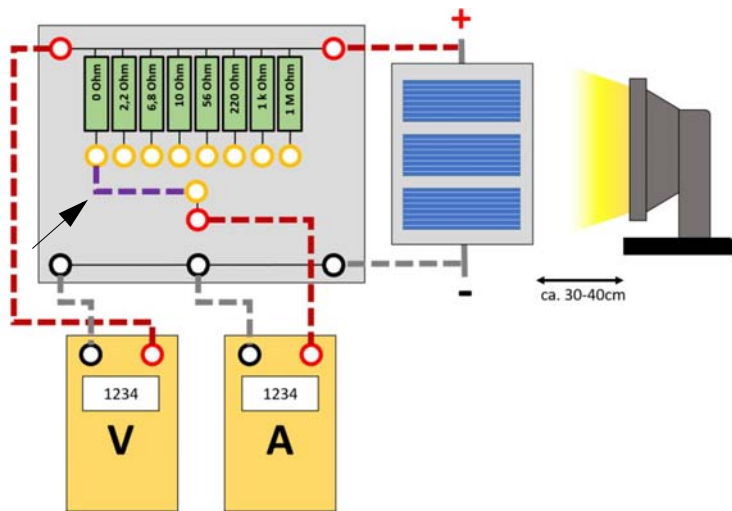


2.5.4 Måling av optimal lastmotstand

I forrige avsnitt brukte vi en belastningsmotstand som var valgt av den som satte opp forsøket. I dette avsnittet skal vi forsøke å finne den belastningsmotstanden som gjør at solcellepanelet leverer størst mulig effekt til motstanden.

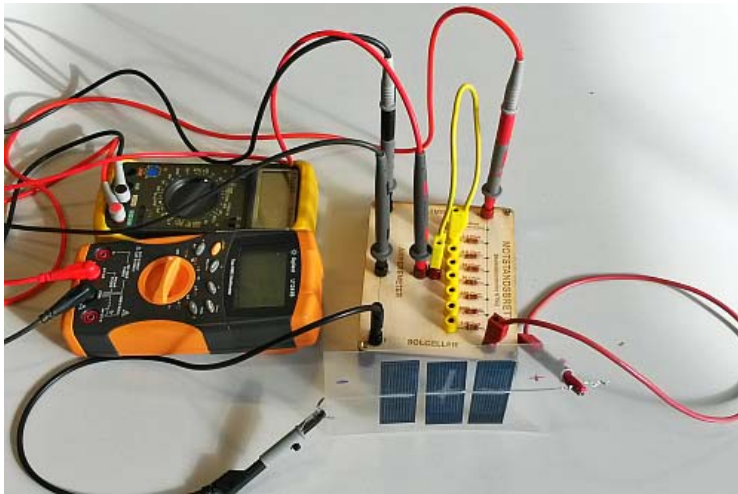
Til dette skal vi bruke et *motstands Brett* og måle strøm og spenning for ulike lastmotstander. Deretter skal vi tegne I/U-karakteristikken for solcellepanelet.

Koble opp solcellepanelet, Volt- og Ampermetret og motstands-brettet som vist på figuren til høyre. Bytt motstandsverdi ved å flytte kabelen (merket med pil på figuren) til de forskjellige kontaktene. Solcellene belyses med en halogenlampe. Dersom man bruker en 500 Ws lampe kan man plassere den i en avstand på ca. 40 cm, mens en 150Ws lampe kan plasseres nærmere.





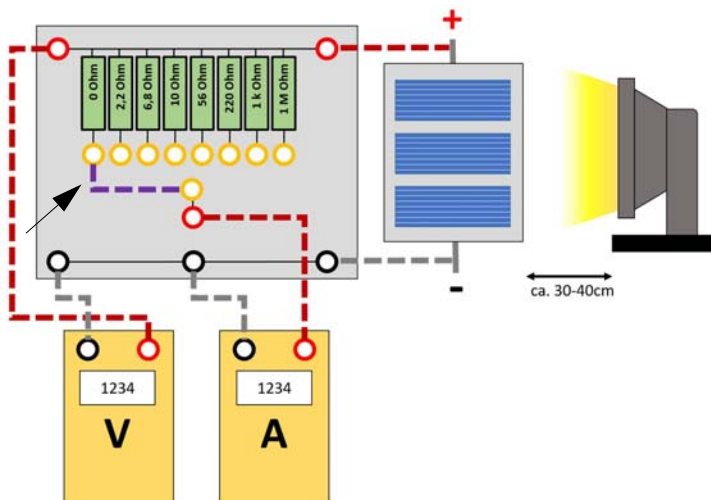
Oppkoblingen kan bli seende ut omtrent som på bildet under:



OBS: La lampen være påslått under hele måleserien, slik at temperaturen i solcella blir omtrent konstant under forsøket.

Måling av I/U-karakteristikken for panelet med 3 celler

Sett måleområdet til Volt-metret til "2V" og Ampere-metret til "10A", og start med å måle kortslutningsstrømmen (I_{SC}). Mål gjerne først direkte over solcelleklemmene (SC) for deretter å måle over "motstanden" merket 0 Ohm. Legg merke til at dette kan gi forskjellig spenning. Hva tror dere det skyldes?



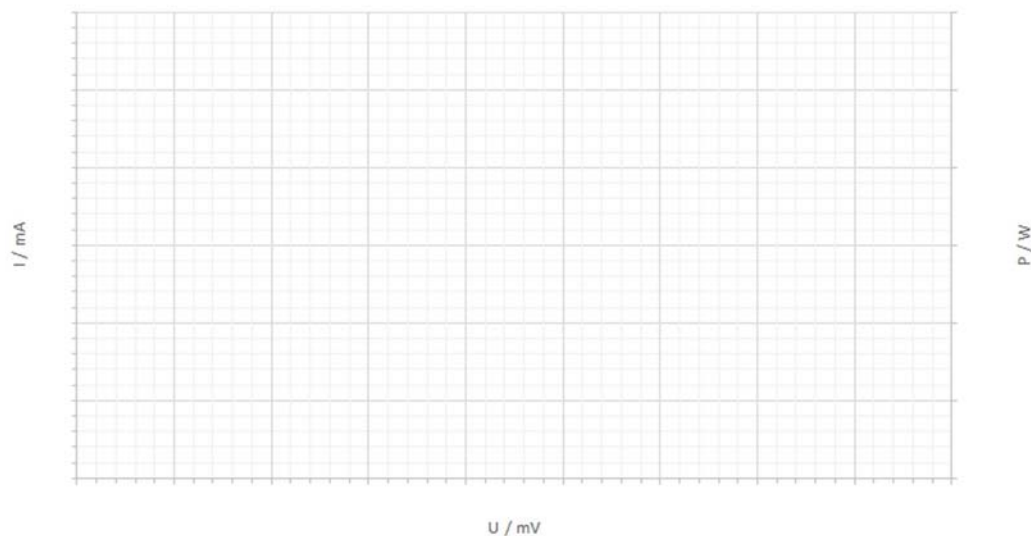
Utfør målingene med forskjellige motstandsverdier ved å flytte ledningen mellom kontakten og motstanden (merket med pil). Mål i tillegg tomgangsspenning U_{OC} med åpne klemme.

Juster måleområdet til instrumentene hvis verdiene blir for store eller for små. **Pass på** at instrumentet står i posisjon 10A når dere måler kortslutningsstrømmen.

Seriell		1 modul, 3 celler uten skygge								
R / Ohm	SC	0	2,2	6,8	10	56	220	1000	1000000	OC
V / mV	0									
I / mA										0
P / W										

Noter strøm og spenning i tabellen over og beregn levert effekt ($P = U \cdot I$).

Skisser strøm-spenningskarakteristikken i I/U-diagrammet under.



Bestem fyllfaktoren (FF) ved å beregne forholdet:

$$FF = I_{pmax} \times U_{pmax} / I_{SC} \times U_{OC} = \text{_____} \quad (2.8)$$

hvor:

I_{SC} = Kortslutningsstrømmen ("short circuit")

U_{OC} = Tomgangsspenningen ("open circuit")

I_{pmax} = Strøm ved maks effekt

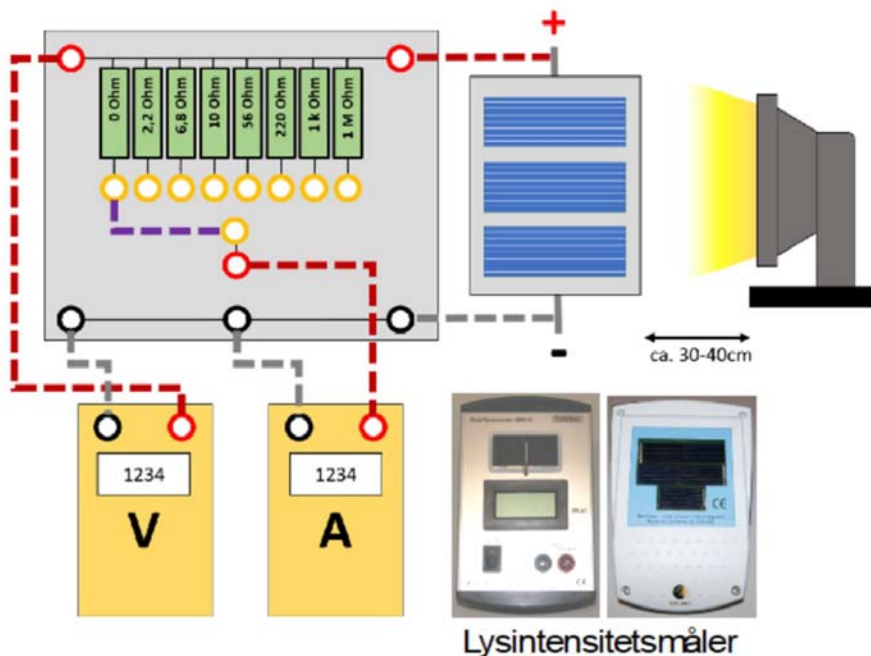
U_{pmax} = Spenningen ved maks effekt



Fyllfaktoren sier noe om kvaliteten til solcellepanelet. Jo nærmere 1,0, jo bedre.

Måling av panelets virkningsgrad

Sett opp forsøket som vist på figur under. La solcellepanelet stå mest mulig vertikalt og i ro under målingene. Halogenlampa plasseres ca. 40 cm foran panelet. Sett måleområdet til Volt-metret til "2V" og Ampere-metret til "200mA". Juster etter behov. **Dersom strømmen blir over 200mA vil det gå en sikring i instrumentet, så forsøk å unngå det.**



Mål lysintensiteten (W/m^2) i en avstand på 40 cm fra lyskilden

Lysintensitet: _____ W/m^2

Plasser solcellepanelet slik at det belyses med den *samme* lysintensiteten – Viktig!

Velg den motstandsverdien på brettet som er nærmest verdien til den optimale belastningsmotstanden!

Valgte følgende motstand: _____ Ohm

Mål strøm og spenning for denne belastningen

Målt strøm: _____ mA

Målt spenning: _____ V

Beregnet *levert effekt* ($P = U \cdot I$): _____ W

Mål og beregn det totale arealet av solcellene

Målt og beregn det totale arealet av solcellene: _____ m²

Beregn total *innstrålt lyseffekt* som treffer solcellene: _____ W

Beregn virkningsgraden som:

Levert effekt / Innstrålt lyseffekt = _____

Sammenlign ev. med målingen gjort med det ferdige oppsettet på side 32.

2.6 Solcelleprosjekter

2.6.1 Liten solcellebil

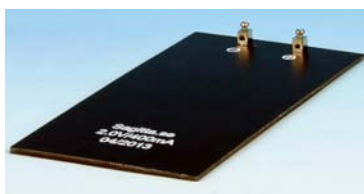
Det finnes en rekke firma som leverer byggesett for små biler med motor. Noen av disse kan også utstyres med solceller dersom man velger en passende laveffektsmotor.

Et par av disse firmaene er:

www.skolesolceller.dk – er et dansk firma som bl.a. leverer solcelleflak og annet tilbehør for kutting og montering av solceller. Her kan man kjøpe bilsett til DKR 50,- pr. bil i pakninger på 5 stk. Også større pakninger finnes. Firmaet leverer også byggesett for mobiltelefonlading med hjemmelaget solcellepaneler.

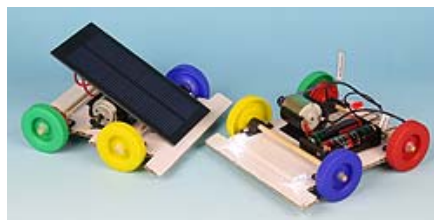
www.sagitta.se – er et svensk læremiddelfirma som bl.a. selger pakker på 50 biler, solcellemotorer og små solcellepaneler (2 V, 400mA) i tillegg til en mengde annet læremateriell.

Under er beskrevet en bil bygget med deler fra Sagitta.



Baksiden av panelet er utstyrt med to koblingsklemmer

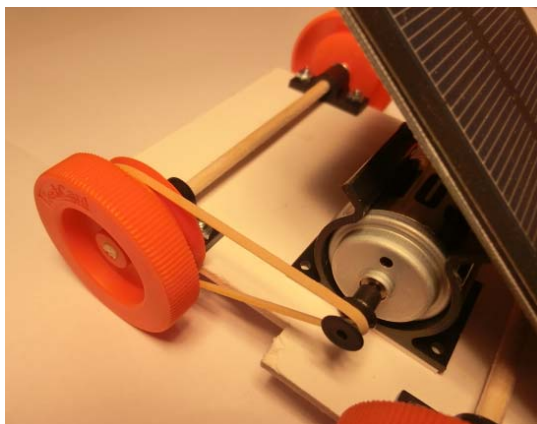
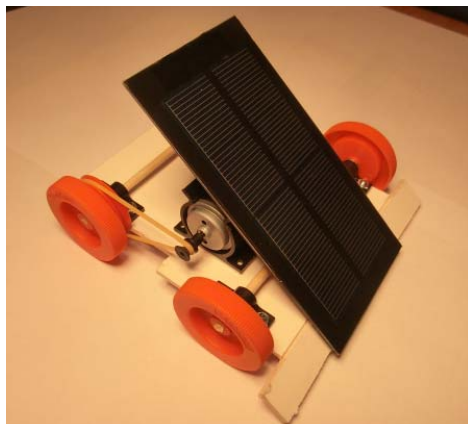
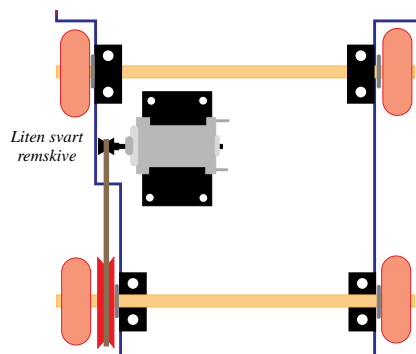
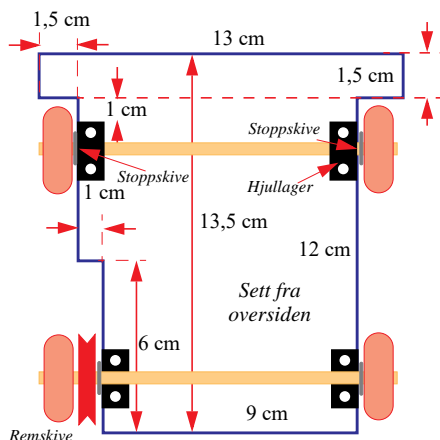
Bilbyggesett





Slik kan en enkel bil bygges (beskrivelsen er hentet fra www.sagitta.se/handledning/19651b):

1. Skjær til en papplade som vist på figuren til høyre. En 2 – 3 mm papplade er passende. Den øverste tverr-”bjelken” kan bøyes ned som en ”spoiler”.
2. Monter de svarte hjullagrene helt inntil sidekanten, ca. 1 cm fra endekantene som vist på figuren til høyre. Stikk hull med en syl der lagrene skal festes med skruer. Lagrene kan monteres med 3 mm skruer med mutter.
3. Akslingen i tre kuttes i riktig lengde slik at hjulene har en mm klaring inn til papplaten. Plasser en stoppskive mellom hjulene og hjullageret. Hjulene kan festes med litt flytelim.
4. I tillegg til hjulene skal drivakselen ha en remskive. Drivhjulene og remskiven festes med litt flytelim. Husk stoppskiven inn mot hjullagrene.
5. Motoren plasseres i plastholderen som kan limes til bunnplata med doggelsidig tape. Den lille svarte remskiven presses inn på motorakslingen slik at den er ca. 1 mm fra motorhuset.
6. Lodd to ledninger til loddeørene på motoren og koble dem til solcellepanelet som monteres på skrå over motoren med dobbelsidig tape på motorholderen og ”spoileren”. Som vist på bildene under.



Sagitta foreslår en rekke oppgaver i tilknytning til bilen. Disse oppgavene er kanskje enda mer aktuelle om bilen bygges med batteridrift:

- Beregn målestokken til bilen i forhold til en vanlig bil

- Mål hastigheten til bilen og regn ut hva hastigheten ville ha vært om bilen hadde størrelsen til en vanlig bil

2.6.2 Lag en solcellesikke

Vi anbefaler at elevene tar med seg solcellepanelet tilbake til skolen. I dette avsnittet er vist hvordan studentene kan bruke solcellepanelet til å lage en solcellesikke. Selv om panelet de har laget er noe større enn det som er antydnet under burde det la seg gjøre å bruke det dersom avstanden mellom cellene ikke er for stor slik at panelet ikke får plass på en CD-plate.

Utstyr:

- Solcellebrekkasje (www.skolesolceller.dk)
- Koblingsbånd (www.skolesolceller.dk)
- Lamineringsplast (Clas Ohlson)
- CD-plate
- 1 treplate 10,0 · 10,0 · 1,8 cm
- 1 sykkeleike
- 1 ark med blader og kronblader
- 1 solcellemotor 1,5 V (Sagitta)
- 1 tykk dobbeltsidig tape (Biltema)
- 1 el-sukkerbiter (Biltema)
- 2,4 mm krympestrømpe (Biltema)

Verktøy

- 1 avbiter
- 1 kraftavbiter
- 1 loddebolt m/loddetinn
- 1 bormaskin m/2 mm bor
- 1 lite skrujern
- 1 lamineringsmaskin (Clas Ohlson)
- 1 Solcellesag (www.skolesolceller.dk)

Lag trefoten og monter sykkeleika

1. Skjær ut ei treplate på 10,0 · 15,0 · 1,8 cm. Puss plata med sandpapir, ev. skråpuss kantene.
2. Finn midten av plata ved å trekke diagonalene.

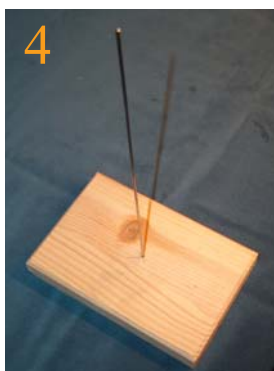




3. Bor et 2 mm hull fra oversiden. Hullet kan gjerne gå gjennom plata.

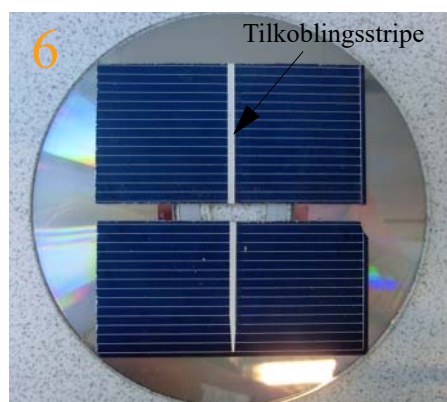


4. Ei sykkeleike har gjenger i den ene enden. Skru sykkeleika ned i plata fra oversida.
5. Kutt hodet av sykkeleike med en kraftavbiter.

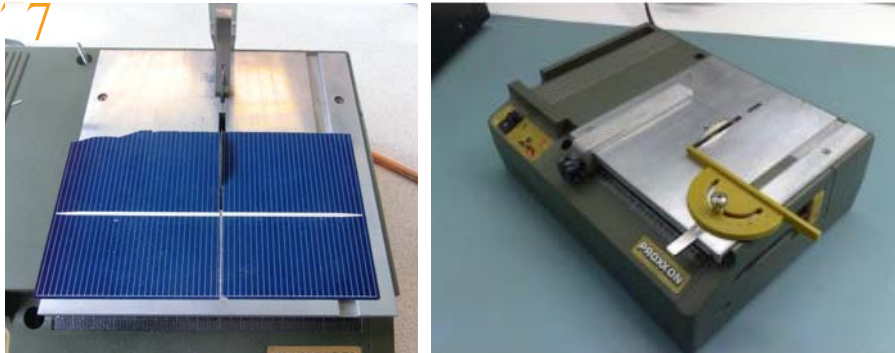


Oppdeling og oppkobling av solcellebrekkasje

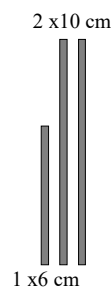
6. Brekk eller sag opp to passende store biter av brekkasje slik at de får plass side om side på en CD-plate. Sørg for at de har en tilkoblingsstripe som går rett over stykkene.



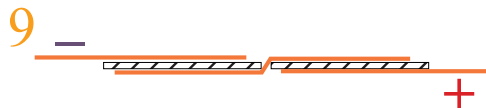
7. Ønsker man rene kutt som her, kan man bruke en liten hobby-sag med diamantblad. En slik kan f.eks. kjøpes hos www.skolesolceller.dk og er vist på figuren under.



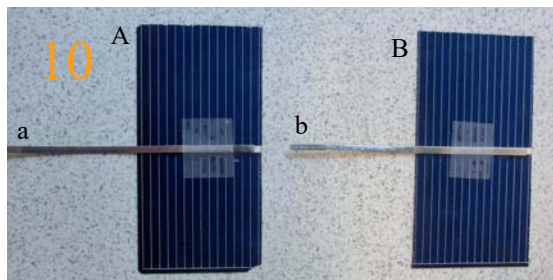
8. Vi bruker fortinnet koblingsbånd til å koble sammen cellene. Dette er bånd som er beregnet til å brukes til å koble sammen solceller til paneler. Klipp opp tre lengder av koblingsbånd av 2 x 10 cm og 1 x 6 cm.



9. Hver celle leverer en spenning på 0,5 V uavhengig av lysstyrken. Strømstyrken avhenger av cellearealet, lysstyrke og belastning. For å få motoren til å gå godt, ønsker vi å seriekoble to celler for å doble spenningen. Baksiden av solcellen blir positiv og forsiden negative. Forøvrig kan de seriekobles på samme måte som batterier for å få høyere spenning. Se figuren under. Den negative polen på den ene cella kobles til den positive til den neste osv.

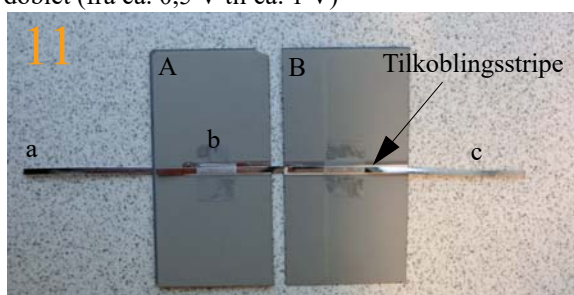


10. Fest koblingsbåndene (a og b) til oversiden av solcellene med en liten tape-bit slik at de holder seg på plass mens vi laminerer dem.





11. Så snur vi cellene med baksiden opp og fester b med en liten tape-bit til tilkoblingsstripen på baksiden av solcella A som vist på figuren under. I tillegg festes den positive elektroden c, til tilkoblingsstripen på undersiden av solcelle B. Nå har vi seriekoblet to solceller slik at spenningen blir doblet (fra ca. 0,5 V til ca. 1 V)



Laminering av solcellene til et panel

12. De to oppkoblede solcellene legges inn mellom plastfolien for laminering som vist på figuren under. La koblingsbåndene stikke ut på begge sider. Pass på at de ikke stikker lengre ut enn lamineringsbredden på maskinen.



13. Kjør solcellene med lamineringsplasten gjennom lamineringsmaskinen med den sveisede kanten først. Ta imot det laminerte solcellepanelet når det kommer ut av maskinen.

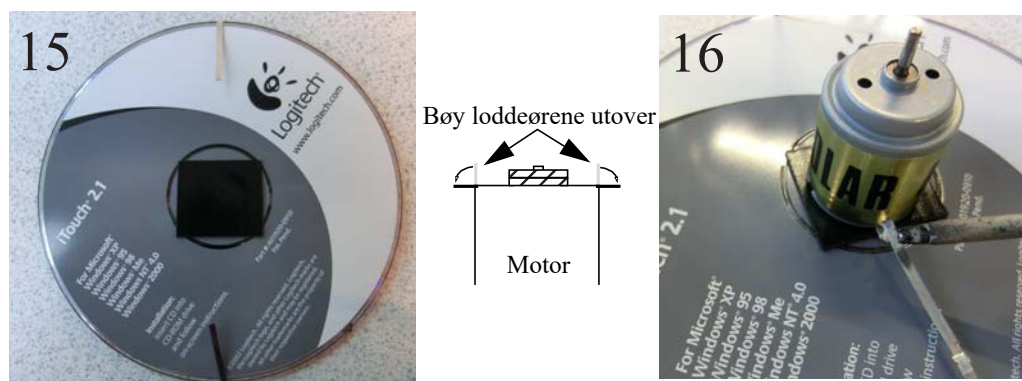


14. Tegn omrisset av en kassert CD-plate over det laminerte panelet (14a) og klipp ut langs omrisset. Bruk litt dobbeltsidig tape (14b) og lim panelet på CD-platen (14c). La koblingsbåndene favne om kanten av CD-platen som vist på figuren under. Disse skal senere kobles til motoren.



Monter motoren

15. Sett en stor og tykk dobbeltsidig tape midt på baksiden av CD-platen. Sørg for at den kommer midt over hullet i CD-plata. God sentrering er viktig.



16. Press motoren ned mot den dobbeltsidige tapen. Pass på at den blir sentrert. Lodd koblingsbåndene til loddeørene på motoren. Rotasjonsretningen vil bestemmes av polariteten på motoren og på koblingsbåndene som kommer fra solcellepanelet.





Fest motoren til sykkeleika

17. Skru ut skruene og ta ut skrukoblingen i en el-sukkerbit og skru den fast til motorakslingen. Fest den andre enden av skrukoblingen til toppen av sykkeleika ("stilken").

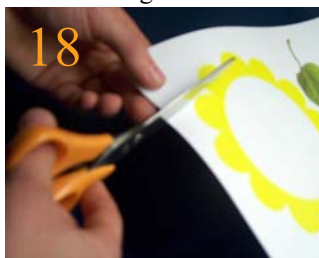


17



Sett blader og krone på solsikken

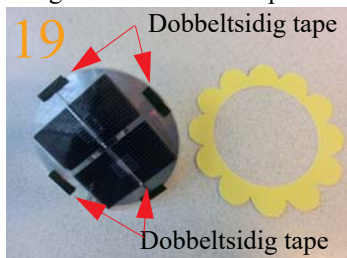
18. Klipp ut de gule kronbladene og de fire grønne bladene. Bladene kan, om ønskelig, forsterkes ved å lamineres i plastfolie.
19. Fest de gule kronbladene med dobbeltsidig tape eller litt lim langs kanten av solcellepanelet.



18



18



19

20. Fest bladene til "stilken" med tynn 8 cm ståltråd. Ståltråden festes til baksida av bladene med litt tape. Bladene kan også festes direkte til stilken med tapen.



20



20



20

21. Alternativt kan man tre krympestrømpe ned på eika, stikke stilken på bladet ned mellom krympestrømpe og sykkeleika og varme opp som vist i figuren under.

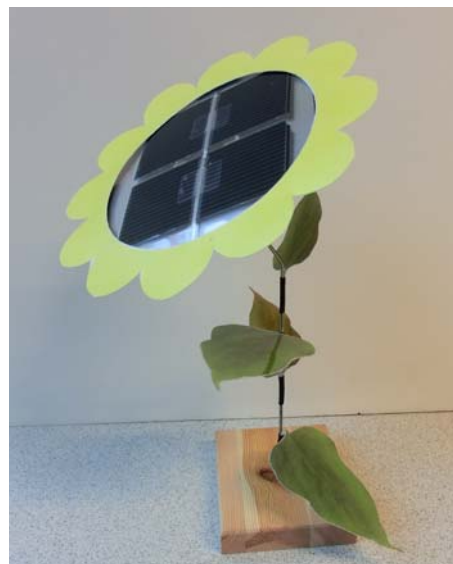


Blomsten er ferdig. Sett den i sola eller i lyset fra en kraftig lampe og den vil rotere.

Takk

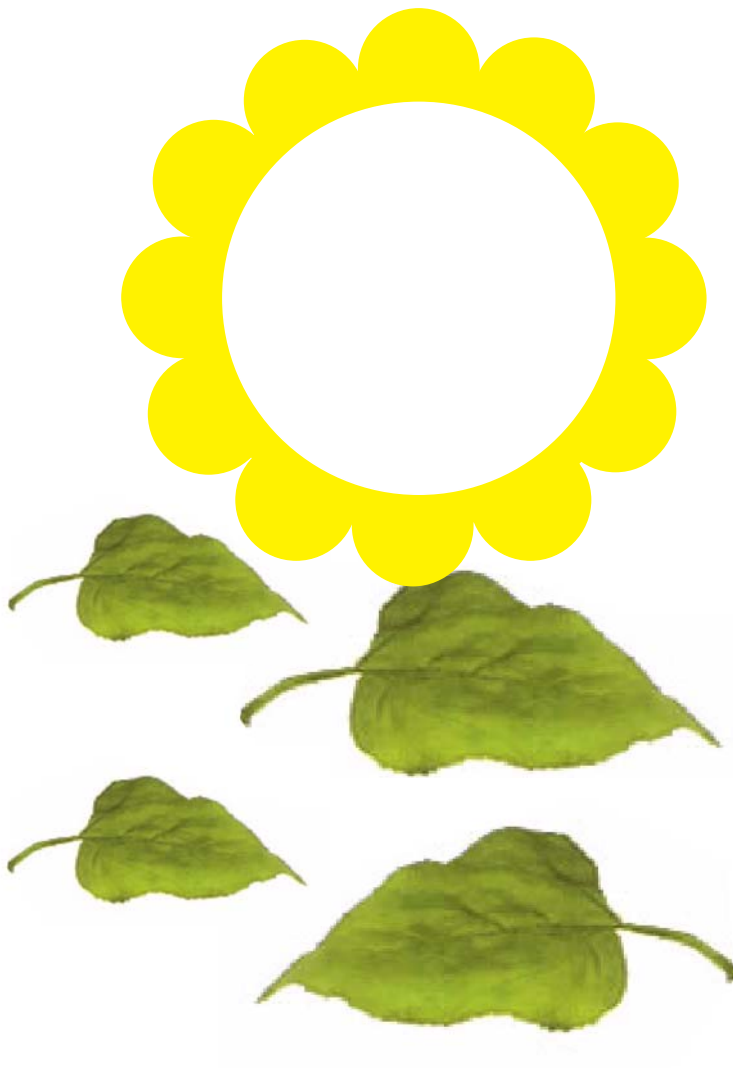
En takk til **REC ScanCell** (Narvik) som har gjort det mulig å utvikle eksperimentelle modeller både i skolen og ved Skolelaboratoriet ved NTNU.

Da REC ble flyttet ut av Norge, har vi begynt å kjøpe solcellebrekkasje hos www.skolesolceller.dk. De selger også hobbysag for oppdeling av solceller.





Kopioriginal for kronbladene og bladene er vist under. Malen må forstørres 200% for å passe til CD-platen.

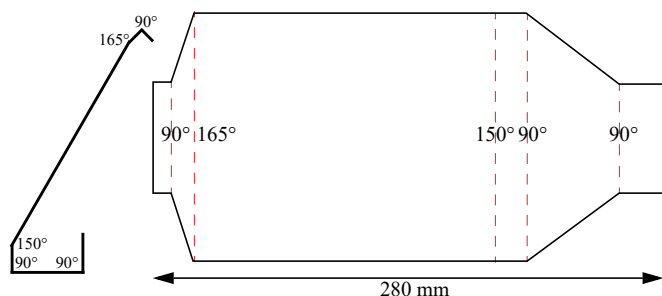
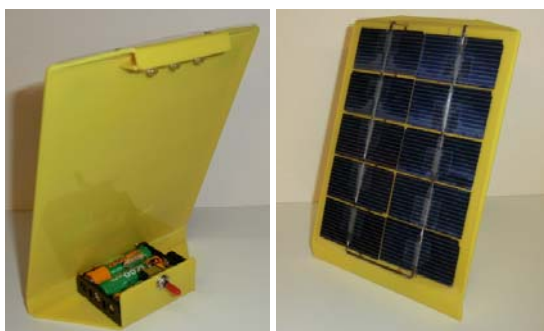


2.6.3 En liten solcelleladet LED-lampe

Spesifikasjon:

Vi ønsker å lage en liten LED-lampe drevet av ladbare batterier som kan lades av et lite solcellepanel. Solcellepanelet og batteriene skal være integrert i lampen.

- For å få skikkelig lys, velger vi å benytte tre hvite dioder som gir kraftig lys.
- Diodene parallellkobles slik at vi kan nøye oss med en batterispenning på 3,6 V, dvs. tre nikkel metallhydrid celler som hver gir 1,2 V.
- En ladespenning på ca. 5 V synes fornuftig, hvilket betyr at vi trenger 10 seriekoblede solcelleflak.
- Vi velger å tilpasse panelet til hva som er hensiktsmessig mht. størrelse og tar da den ladestrømmen vi får.



Utforming:

Selve lampen utformes av ett stykke plast som skjæres ut av en 2 mm plastplate (gul). Malen er vist på figuren over og er gjengitt i vedlegg C.2. Malen skal forstørres slik at den blir 28 cm lang. Plasten knekkes i samme retning alle steder ved hjelp av en plastknekker, f.eks. av en type som vist på figuren til høyre⁹. Stiplet linje betyr "dalknekk" med angitt innvendig vinkel som vist på figuren over. Den knekte profilen er vist til venstre på figuren over. Knekkvinklene er ikke kritiske.



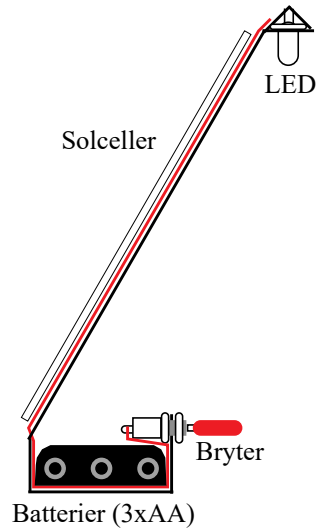
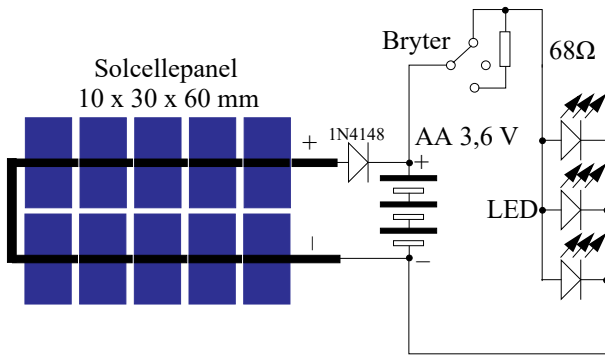
Elektrisk:

Vi har benyttet tre lysdioder koblet i parallell. Disse er montert på en rektangulær plastbit (60 x 12 mm) som passer i holderen øverst på lampen. De to ledningene fra lysdiodene stikkes gjennom hull i bakveggen og bøyes ut til siden slik LED-panelet holdes fast.

9. Leveres av Rolf Ingebrigtsen for kr. 1790,- + MVA, for mer info se: www.tisco.no



Ledningene føres ned bak solcellepanelet, gjennom bakplata og fram under batteripakken som ligger i holderen foran. Batteripakken inneholder 3xAA batterier og gir 3,6 V. Figuren under viser koblingsskjema for lampen.

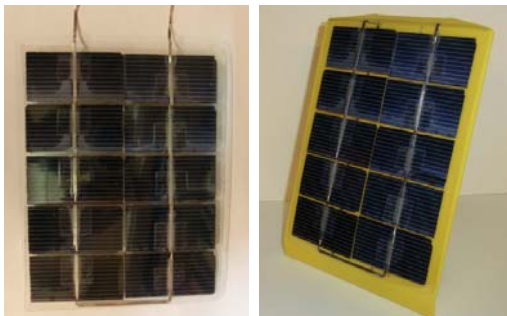


Vi har valgt å benytte en seriemotstand på 68Ω som kan legges inn etter behov, dersom vi vil spare batteriene. Lyset blir da litt svakere. Bildet til høyre viser batteripakken med bryter.



Lysdiodene er av typen 334-15/T2C2-1SUB (ELFA 75-004-40) og skal gi en lysintensitet på ca. 5600 - 11000 mcd ved 20 mA. Maksimal kontinuerlig strøm er lik 25 mA og maks i korte tidsrom er lik 100 mA. En seriemotstand på 68Ω gir en total strøm på ca. 53 mA fordelt på tre dioder, hvilket gir en strøm på ca. 17 mA i hver av diodene. Som vi ser så er dette godt innenfor maks. verdien på 25 mA. Vi ser også at det kan være ganske risikabelt å bruke diodene uten seriemotstand. En seriemotstand på 47Ω gir omtrent maksimal strøm i hver av diodene på 25 mA. En diode (1N4148) i serie med solcellepanelet hindrer lekkasjestrøm i reversretningen gjennom solcellene.

Solceller:



Som tidligere omtalt har vi valgt å benytte 10 stk. 30 x 60 mm solceller (som er skåret ut av solcelle flak på 155 x 155 mm). Disse seriekobles og lamineres i 0,125 mm lamineringsplasti en vanlig lamineringsmaskin.

Flakene monteres tett, uten å berøre hverandre, slik at de tar liten plass. Panelet kobles sammen med lysdioder og batteripakken som vist i koblingsskjemaet. Ledningene legges på

baksiden av panelet slik at de ikke blir synlige. Panelet kan monteres til plastplata med dobbeltsidig tape.

Den solcelleladete LED-lampa er dermed være ferdig.

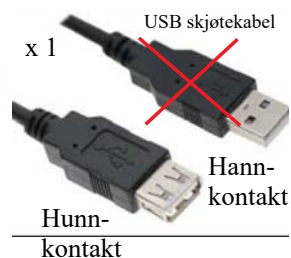
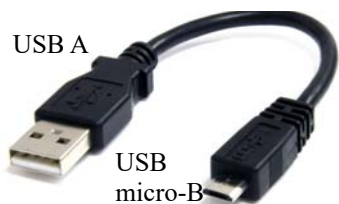
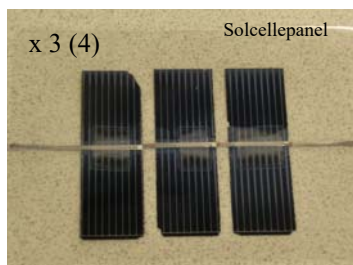
2.6.4 Lag en mobillader med solcelle panelene

I dette avsnittet skal vi se hvordan vi kan bruke solcellene laget i løpet av Energiløypa til å lade mobiltelefonen.

Siden en smarttelefon trenger 1 A og minst 0,5 A ladestrøm, så er den beste løsningen å bruke en Power Bank som vist på bildet til høyre. Denne kan lades med vesentlig mindre strøm.

Utstyr:

- 3 eller 4 stk solcellepaneler laget under Energiløypa
- 1 stk USB skjotekabel (Biltema eller Clas Ohlson)
- 1 stk USB A til USB micro-B (Biltema eller Clas Ohlson)
- 1 stk Power Bank (Biltema eller Clas Ohlson)

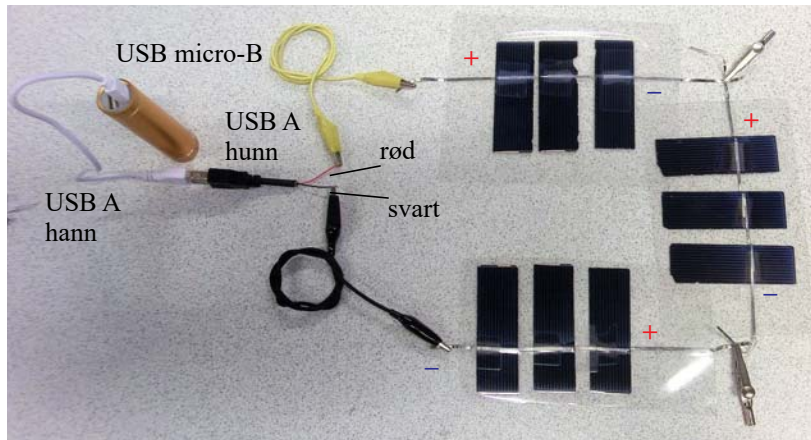


Gjør slik:

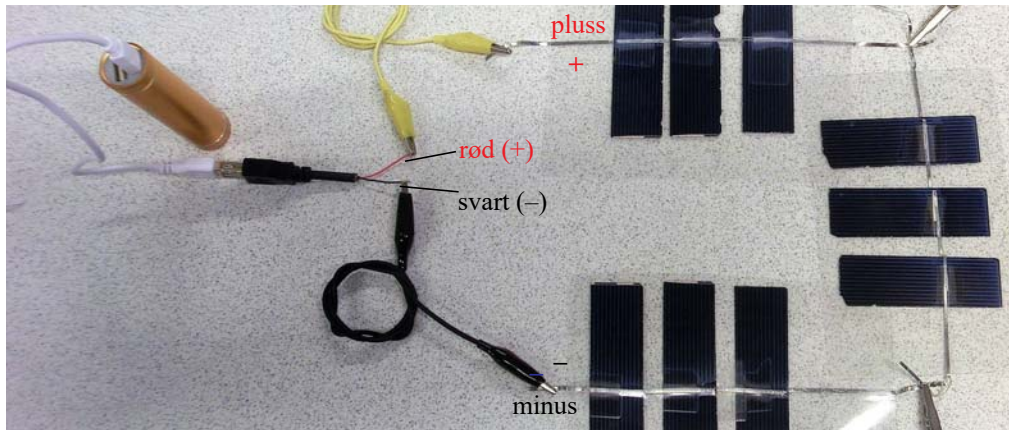
- Seriekoble tre (eller fire) solcellepaneler. Lodding er best, men de kan også kobles sammen med krokodilleklemmer. Pass på at pluss kobles til minus på panelene.
- Klipp av hann-kontakten til USB skjotekabelen vi skal bruke kabelen med hunn-kontakten (se bildet over).
- Ta av ca. 10 cm av den ytterste svarte isolasjonen på kabelen. Inni finner du fire tynne ledninger. Klipp bort den grønne og den hvite (kan også være andre farger) og ta vare på den blå og den røde. Avisoler endene til disse to ledningene.
- Koble den røde ledningen fra USB-kabelen til pluss på solcellepanelene, dvs. det koblingsbåndet som kommer fra undersiden av solcellen. Koble den svarte ledningen til minus på solcellepanelet, dvs. det koblingsbåndet som kommer fra oversiden av solcellen.



- Bruk USB A til USB micro-B kablen til å forbinde solcellepanelet til Power Banken som vist på figuren under. USB micro-B kontakten skal inn i Power banken.



Bildene under viser detaljer fra laboratorieoppkoblingen. Dersom man ønsker å bruke panelene som en ordentlig lader, er det lurt å montere panelene på en plata og lodde ledningene til hverandre.



I sterk sol vil tre paneler (9 celler) gi ca. 5 V tomgangsspenning og en strøm på ca. 200 mA under lading av Power banken. Dette vil lade en tom Power Bank på ca. 13 timer. Under lading skal Power banken lyse rødt eller blått. Fargen vil skifte når Power banken er fulladet.

Når energien i Power banken skal over til mobiltelefonen, brukes telefonens standard ladekabel med en USB A kontakt som plugges inn i Power banken (se bildet til høyre).



2.6.5 Mendocino-motor

I februar 1991 fikk *Lerry Spring* (1914–) låne en liten solcelledrevet motor av *Doug Doe*. Lerry plasserte motoren i vinduet i laboratoriet sitt ved Mendocino-kysten i California. Noen måneder senere konstruerte Lerry sin egen meget spesielle solcellemotor. Som den tidligere versjonen var solcellene montert på rotoren, men istedet for at akslingen var lagret opp på vanlig måte, svevde denne i et magnetfelt bare støttet i den ene enden av en vertikal glassplate, senere kalt en Mendocino-motor.¹⁰

Siden den gang er det bygget en lang rekke varianter av Mendocino-motoren, og senest av en gruppe studenter i Eksperter i Team ved NTNU. Motoren er bygget for bruk ved Vitensenteret i Trondheim hvor den vil inngå i en utstilling om fornybar energi.

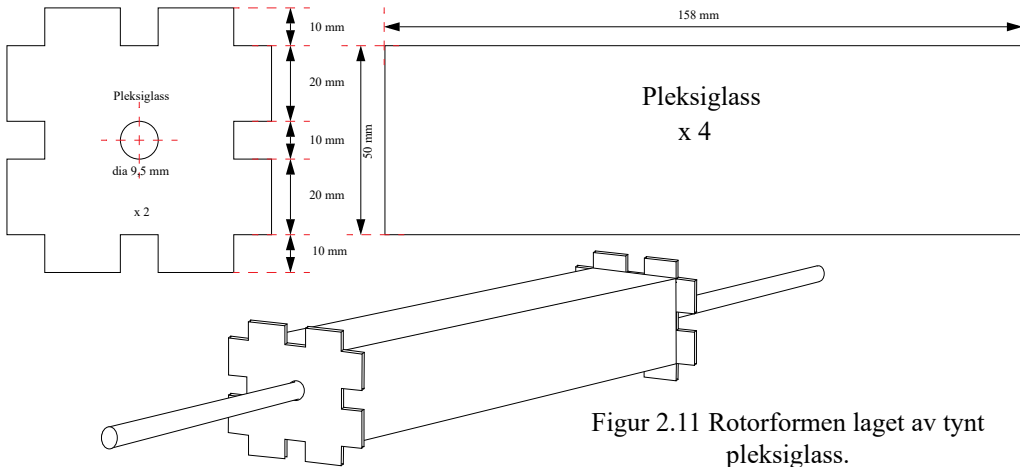
Vi vil her gjengi ganske kort hvordan studentene bygget motoren. For en mer fylldig beskrivelse se deres produkt rapport [2].



10. Lerry Spring http://www.larryspring.com/sub06_motors.html

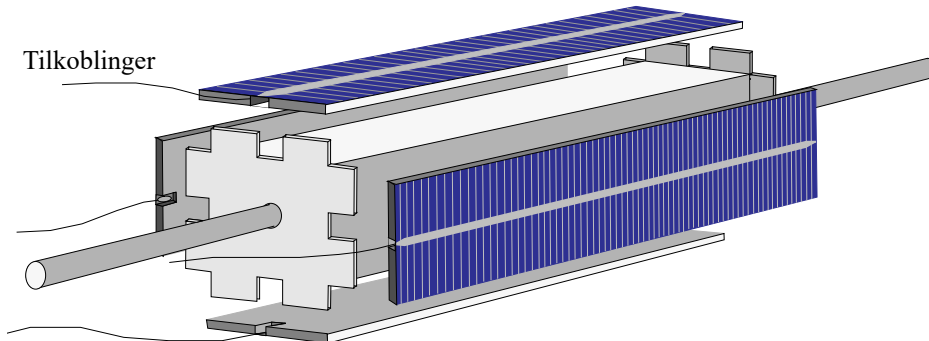


Rotoren har form som et kvadratisk rett prisme med dimensjoner 50 x 50 x 158 mm. Prismet er laget i 2 mm pleksiglass. Gjennom endestykkene går akslingen som er et tynnvegget aluminiumsrør (dia. 9,5 mm). Endestykkene har en flens som holder spolene (se figur 2.11).



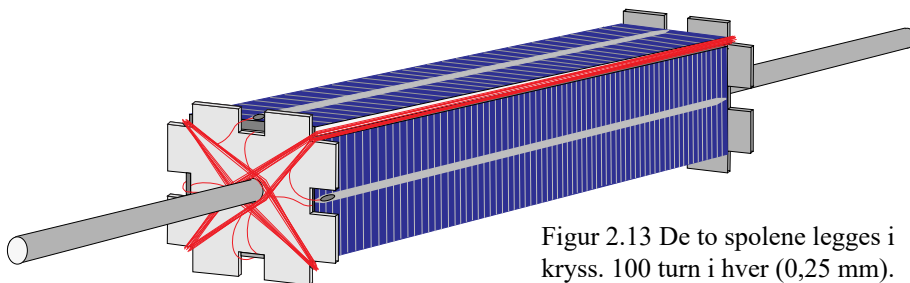
Figur 2.11 Rotorformen laget av tynt pleksiglass.

Solcelleflakene limes på 5 mm papp og skjæres i bredder på 50 mm. Hvert flak har en lengde på 155 mm. Det skjæres åpninger i pappen slik at det er mulig å koble seg til undersiden av solcellene. Ledninger loddes til koblingskinnene på undersiden av cellene før de limes, en på hver av rotorens sider som vist på figur 2.12.



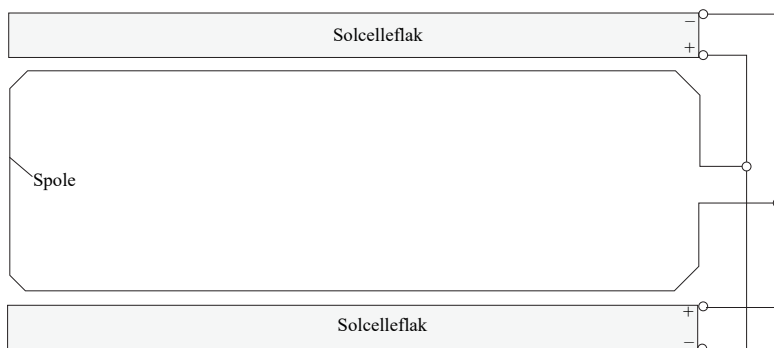
Figur 2.12 Solcellene limes på pleksiglassformen.

Etter at solcellene er montert, vikles to spoler i kryss, diagonalt over endeflatene som vist på figur 2.13. Hver spole har 100 viklinger, og vikles med 0,25 mm lakkisolert kobbertråd.



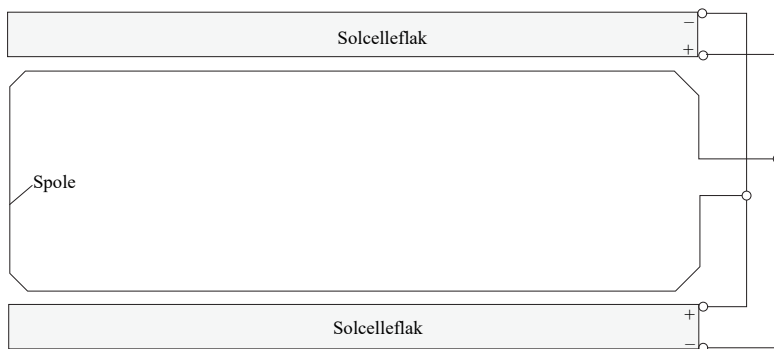
Figur 2.13 De to spolene legges i kryss. 100 turn i hver (0,25 mm).

Spolene kobles opp i antiparallell som vist i figur 2.14.



Figur 2.14 To og to motstående solceller kobles i antiparallell til en av spolene.

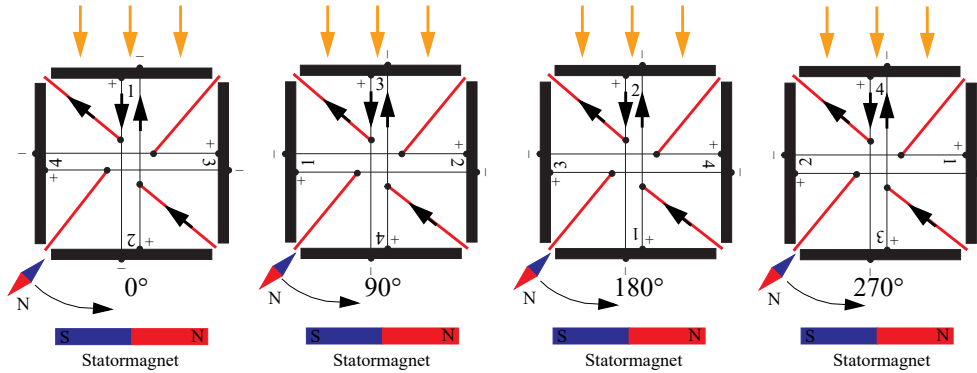
Figur 2.15 viser rotoren dreid en halv omdreining slik at de to andre solcelleflakene med tilhørende spole framkommer



Figur 2.15 Den andre spolen forbindes med to av solcellene på tilsvarende måte som den første spolen, bare at polariteten er bytte om.



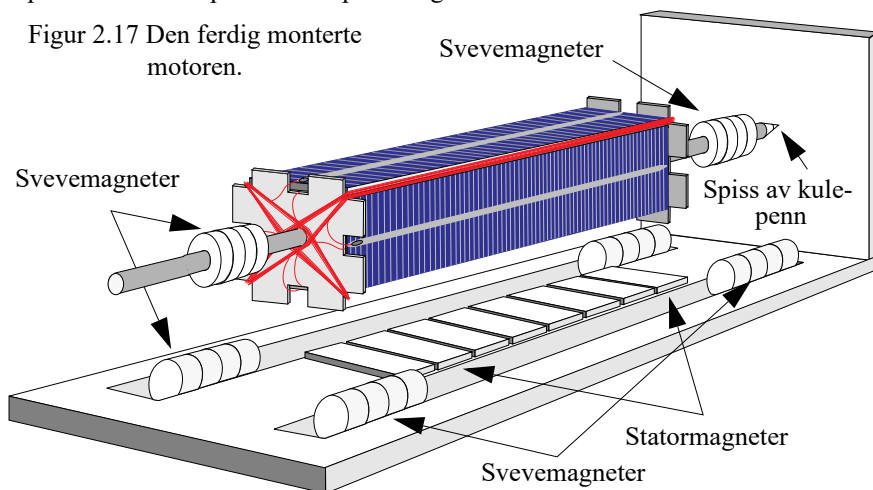
Når den ene solcellen belyses så vil strømmen gå i en retning. Dreies rotoren en halv omdreining slik at solcellen på motsatt side belyses, vil strømmen gå i motsatt retning gjennom den samme spolen, siden cellen er koblet motsatt av cellen på den andre siden. I forhold til statorens magneter, vil dette gi motoren et puff i samme retning siden motoen er rotert en halv omdreining. Det andre solcelleparet som står vinkelrett på det første, er koblet på tilsvarende måte slik at også det gir rotoren et puff i samme retning.



Figur 2.16 Viser koblingen av de to spolene til solcellene. Solcellene har plusspol på undersiden og minuspol på oversiden der lyset faller inn.

Figur 2.16 viser rotoren sett fra enden i fire stillinger, 90° dreid i forhold til hverandre. Lyset kommer hele tiden inn fra toppen. Spolene er tegnet diagonalt og går langs sidekantene til rotoren og tilbake på andre siden. Vi legger merke til at strømretningen i spolene er konstant i forhold til statormagneten. Dvs. at rotoren dreies i samme retning hele tiden, som er det vi ønsker. Motoren har ingen kommutator, men den stadig skiftende posisjonen til solcellene vil virke på samme måte.

Akslingen forsynes med åtte sirkulære neodymmagneter med hull, fire på hver side som vist på figur 2.17. Disse er kun for å holde rotoren svevende. For å redusere friksjonen mot endeplaten, benyttes spissen av en kulepenn som tilpasses og stikkes inn i aluminiumsrøret.

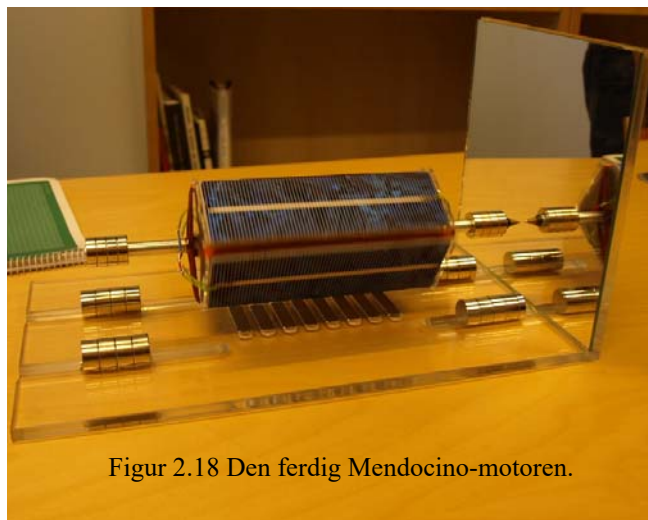


Statoren skal holde svevemagnetene og statormagnetene. Studentene benyttet 16 sylindervevmagneter fordelt med åtte foran, fire på hver side, og åtte bak som vist på figur 2.17. Svevemagnetene er limt fast nede i halvsirkelformede spor som er frest ut i en tykk pleksiglassplate. I enden er det plassert et vertikalt pleksiglassspeil som den spisse enden av rotoren hviler mot.

Midt under rotoren monteres åtte rektangulære neodymmagneter som limes fast til pleksiglassplata. Disse er statormagnetene som sørger for å gi rotoren et moment i dreieretningen når det går strøm i spolene.

Magnetene på akslingen skyves inn og ut til rotoren svever stabilt i lufta over statoren.

Du vil oppdage at når du plasserer rotoren over statoren i et rom med dempet belysning, vil den sannsynligvis dreie seg litt før den stabiliserer seg i én stilling. Det kommer av at vekten av rotoren ikke er helt symmetrisk fordelt (ikke balansert). Dette kan en rette på ved å lime fast biter av tykk kobbertråd på motsatt side, gjerne langs sidekantene der spolene ligger.



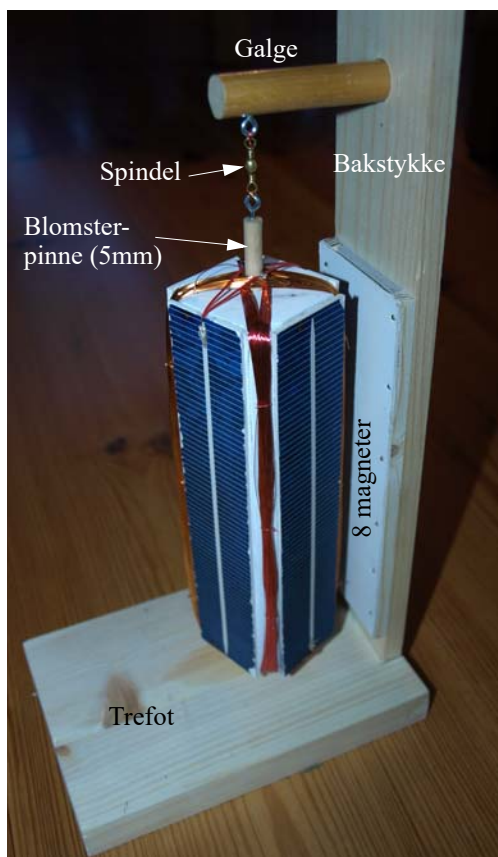
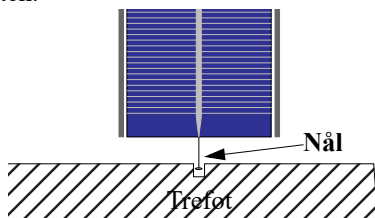
Figur 2.18 Den ferdig Mendocino-motoren.



Motoren startes ved å belyse rotoren på skrå ovenfra. Rotasjonsretningen bestemmes av fra hvilken siden rotoren belyses. Vær forsiktig i begynnelsen slik at den ikke går for fort. Dersom den får sleng på grunn av at rotoren ikke er helt balansert, kan den hoppe ut av magnetfeltet og havne ved siden av statoren og bli skadet.

2.6.6 Vertikal solcellemotor

En enkle variant av mendocinomotoren er vist på figuren til høyre. Rotoren som er bygget opp på samme måte som omtalt i avsnittet foran, henger i en spindel som i gjen er festet i en galge. Galgen er festet til et bakstykke av tre. 8 flate neodymmagneter er festet til bakveggen bak en papplate. Det hele er montert på en trefot. En knappenål er festet på undersiden av rotoren. Nålen er sentrert og stikker ned i ett 1,5 mm hull i trefoten.



Rotoren belyses med en lampe. 60 W er tilstrekkelig.

På hver side er det montert en $155 \cdot 32$ mm solcelle. Disse er montert på et prisme med et tverrsnitt på $42 \cdot 42$ mm og en lengde lik lengden av solcellene. Hver av spolene, som er viklet diagonalt har 100 vindinger, viklet med 0,25 mm lakk isolert kobbertråd. En blomsterpinne på 5 mm fungerer som gjennomgående aksling. Nåla på undersiden er festet i midtpunktet av akslingen.

3 Oppvarming av vann – måling av virkningsgrad

Elektriske vannkokere ble introdusert på markedet så tidlig som i 1893 av det engelske firmaet Crompton & Co. De første elektriske vannkokerne var temmelig primitive. Selve varmeelementet var installert i et eget rom under vannbeholderen siden en hadde problemer med å isolere den elektriske kretsen fra vannet.



Det var først i 1922 at den engelske ingeniøren **Leslie Large** i firmaet Bulpitt & Sons i Birmingham, klarte å løse problemet ved å vikle varmetråden rundt en isolerende kjerne. Den viklede varmetråden ble elektrisk isolert med en varmebestandig mantel og plassert inne i et metallrør som ble montert vannrett nede i selve vannbadet i kjelen. Dermed fikk man økt vannkokerens effektivitet betraktelig. På bildet til høyre ser vi en vannkoker av typen *Swan electric kettle* nå på museet i Liverpool¹¹.

I 1955 kom de første vannkokerne i rustfritt stål (K1) produsert av det engelske firmaet Russel Hobbs (se figur til høyre¹²). Denne var automatisert med en termisk sensor plassert i vanddampen som kom ut av tuten av kjelen, slik at strømmen kunne brytes automatisk når vannet kokte¹³.



En vannkoker kan ha en effektivitet fra 85 – 95%. Det som svekker effektiviteten er varmelekkasje gjennom veggene.

3.1 Måling av virkningsgrad – en laboratorieøvelse

Oppdraget:

Elevene skal finne ut hvilket av kokeapparatene induksjonsovn, vanlig kokeplate og vannkoker som raskest varmer opp 1 liter vann til 50 °C. Samtidig som de skal finne ut hvilket apparat som er mest effektivt, dvs. trenger minst energi for å varme opp vann fra 0 – 50 °C.



11. "Swan electric kettle, Museum of Liverpool" by Reptonix free Creative Commons licensed photos - <http://reptonix.awardspace.co.uk/photos/2012-02-11.htm>. Licensed under CC BY 3.0 via Commons - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Swan_electric_kettle,_Museum_of_Liverpool.jpg#/media/File:Swan_electric_kettle,_Museum_of_Liverpool.jpg

12. <http://russellhobbs.co.za/info-pages/about-russell-hobbs.aspx>

13. <https://en.wikipedia.org/wiki/Kettle>



Utstyr:

- 1 stk. Vannkoker (min. 1 L vann)
- 1 stk. Kokeplate med kjel
- 1 stk. Induksjonsplate med kjel
- 3 stk. Termometre
- 3 stk. Energimålere
- 1 stk. Litermål
- 1 stk. Stoppeklokke

Forslag til arbeidsdeling:

På denne stasjonen er det viktig å utnytte tida godt:

Den som...

... leder oppdraget

... koker vann i vannkoker

... koker vann på tradisjonell plate

... koker vann på induksjonsplate

... fører resultatene inn i loggen

Framgangsmåte:

Elevene skal måle hvor effektive de enkelte kokekarene er.
Gjør følgende:

1. Fyll 1 liter vann i hvert av de tre kokekarene.
Målingen skal gjøres for ett og ett kokeapparat i gangen
2. Mål starttemperaturen i hvert av karene og noter resultatet
3. Slå apparatet på maks. idet dere starter klokka.
4. Slå av hvert apparat akkurat idet vannet når 50°C.
5. Les av tiden når apparatet ble slått av
6. Mål temperaturen midt i væskemengden og noter antall grader Celcius

Resultatene fra målingene føres i tabellen:

Apparat	Start-temp.	Slutt-temp.	Effekt (Watt)			Totaltid [sek]	Elektrisk energi [Joule]	Termisk-energi [Joule]	Virknings-grad
			Etter 30 sek	Etter 60 sek.	Etter 90 sek				
Måling med riktige kokekar – 1. måling									
Vannkoker									
Kokeplate									
Induksjonsplate									
Måling med riktige kokekar – 2. måling (kan sløyfes)									
Vannkoker									
Kokeplate									
Induksjonsplate									
Måling med ombyttet kokekar (etter 5 min) (kan sløyfes)									
Kokeplate									
Induksjonsplate									

Beregning av tilført termisk energi fra starttemperatur til ca. 50°C =

Tilført varme opp til 50°C = Vannmengde i kg x Temperaturøkningen x Vannets spesifikke varmekapasitet

Vannkoker:

Vannmengde ____ [kg] x (Slutt-temp. ____ [°C] – Start-temp. ____ [°C]) x 4186 [Joule/K kg] =
 _____ [Joule]

Kokeplate:

Vannmengde ____ [kg] x (Slutt-temp. ____ [°C] – Start-temp. ____ [°C]) x 4186 [Joule/K kg] =
 _____ [Joule]

Induksjonsplate:

Vannmengde ____ [kg] x (Slutt-temp. ____ [°C] – Start-temp. ____ [°C]) x 4186 [Joule/K kg] =
 =



_____ [Joule]

Målt elektrisk energi:

Vannkoker:

Gjennomsnittlig brukt effekt _____ [W] x Tiden for oppkok [sek] = _____ [Joule]

Kokeplate:

Gjennomsnittlig brukt effekt _____ [W] x Tiden for oppkok [sek] = _____ [Joule]

Induksjonsplate:

Gjennomsnittlig brukt effekt _____ [W] x Tiden for oppkok [sek] = _____ [Joule]

Virkningsgrad:

Vannkoker:

Tilført varmeenergi opp til 50°C _____ [Joule] / Elektrisk energi _____ [Joule] = _____

Kokeplate:

Tilført varmeenergi opp til 50°C _____ [Joule] / Elektrisk energi _____ [Joule] = _____

Induksjonsplate:

Tilført varmeenergi opp til 50°C _____ [Joule] / Elektrisk energi _____ [Joule] = _____

Hvilket kokeapparat var best og hvorfor?

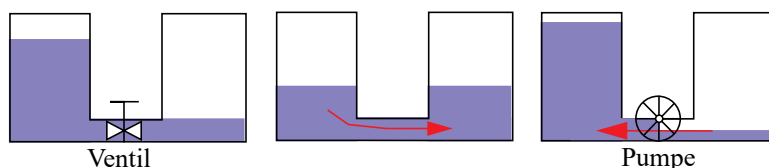
Skriv opp hvilken av de tre alternativene som brukte minst energi til å varme opp vann til 50°C gi en forklaring på hvorfor det var slik.

4 Varmepumpe – Måling av virkningsgrad

4.1 Er det mulig å pumpe varme fra et kaldt til et varmt sted

Noen vil hevde at det er umulig å varme opp et rom fra en kilde som er kaldere enn rommet. Det er imidlertid fullt mulig. Det som skjer, er at den kalde kilden blir enda litt kaldere fordi varme fjernes fra det som allerede er kaldt, og tilføres det oppvarmede rommet som blir litt varmere.

Vi kan tenke på det som å pumpe vann fra et kar med lite vann til et kar med mye vann. Dersom vi åpner ventilen, vil vannet av seg selv renne fra karet med mye vann, til karet med lite vann, helt til begge karene har like høy vannstand. Vi trenger ikke å tilføre energi for at dette skal skje, gravitasjonen gjør jobben for oss.

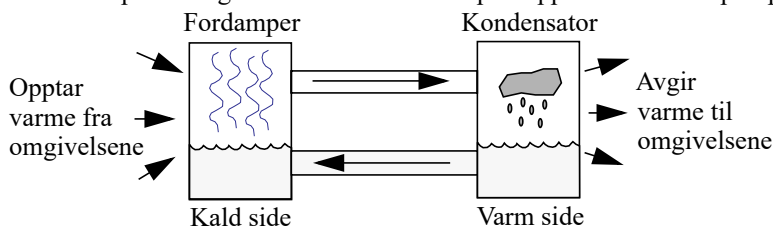


Skal vi få det motsatte til å skje, må vi sette inn ei Pumpe, det vil si vi må tilføre energi, som vist på figuren over. Da blir det nesten fulle karet enda litt fullere, og det nesten tomme karet blir kanskje helt tomt.

Slik er det også med varme. Vi trenger ei varmpumpe for å pumpe varme fra det kjølige stedet til det varme stedet. Et kjøleskap er ei slik varmpumpe. Den pumper varme fra det allerede kalde rommet inne i kjøleskapet, til rommet utenfor som gjerne er vesentlig varmere enn innsiden av kjøleskapet.

Hvordan fungerer ei varmpumpe?

I figuren under har vi på en meget enkel måte illustrert prinsippet for ei varmpumpe.

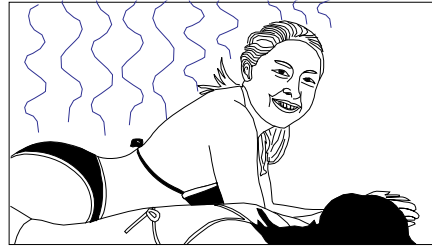


Vi må huske at når noe *fordamper* (fra væske til damp), opptar det varme, og omgivelsene blir avkjølt. Når noe *kondenserer* (går fra gass til væske), avgir det varme og omgivelsene blir oppvarmet. Vi skal nå se litt mer i detalj hvordan dette er mulig, ved å vise noen eksperimenter og eksempler fra hverdagen.



Vi har alle merket at vi kan bli temmelig kalde dersom vi lar være å tørke oss etter et bad og i stedet lar den våte kroppen tørke av seg selv.

For at kroppen skal bli tørr, må vannet fordampe. Til det kreves mye varme. Vannet tar varmen fra kroppen vår som dermed avkjøles.



Eksperiment: 1 Fordampning fra huden

Ha litt deodorant eller etterbarberingsvann på huden. Hva kjenner du?

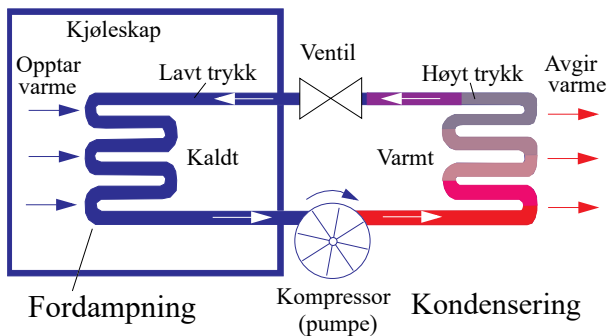
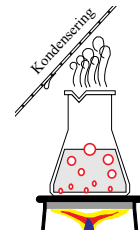
Du merker at huden blir avkjølt. Deodorant eller etterbarberingsvann inneholder stoffer som lett fordamper. Ved fordampningen avkjøles huden.

På samme måte som det kreves mye varme for å gjøre væske om til damp, så vil damp som kondenserer, avgi mye varme. Det kan vi merke når vi holder ei kald glass- eller metallplate over varm damp. Dampen kondenserer mot plata, som etter hvert blir svært varm.

Eksperiment: 2 Kondensering

Kok opp litt vann i en Erlenmeyer-kolbe. Hold ei kald glass- eller metallplate over dampen som kommer ut av kolben. Du kan lett få til det samme ved å holde plata foran tuten på en vannkjel som koker.

La dampen kondensere mot den kalde plata, og kjenn at plata blir varm på baksiden. Ved kondensering avgir dampen den varmen som den opptar ved fordampning.



I ei varmepumpe brukes ikke vann, men et medium som *opptar termisk energi ved fordampning og avgir energi ved kondensering*. La oss se nærmere på hvordan ei varmepumpe er bygget opp. Vi kan se på et kjøleskap som er ei varmepumpe hvor vi primært er interessert i den kalde siden av pumpe, det vil si fordampningssiden. Når varme pumpes ut av kjøleskapet, blir det kaldere på innsiden og ørlite grann varmere på utsiden.

I veggen inne i kjøleskapet ligger det et rør fylt med en væske (*arbeidsmedium*) som fordamper

når rørene befinner seg inne i kjøleskapet og opptar varme fra det innvendige av kjøleskapet, som dermed avkjøles. Deretter pumpes væska gjennom røret som passerer ut gjennom veggen i kjøleskapet og går i slynger på baksiden. Her kondenseres dampen i røret og avgir varmen til omgivelsene. Dersom vi kjenner på rørene som ligger på baksiden av kjøleskapet, kjenner vi at de er varme. Ei pumpe (kompressor) sørger for å drive væska rundt i rørsystemet. I tillegg har den, som vi skal se i neste avsnitt, en annen viktig funksjon.

Spørsmålet er: *Hvordan får vi arbeidsmediet til å fordampe i den delen av kjøleskapet som er kaldt, og kondensere der det er varmt? I utgangspunktet synes dette å stride **mot** naturens orden. La oss se litt på hva koking er, før vi besvarer spørsmålet.*

Trykket over væska endrer kokepunktet

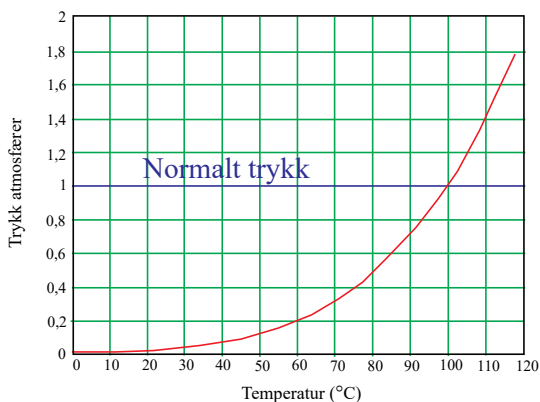
Dersom vi varmer opp vann i en kjele, vil temperaturen stige jevnt og trutt. Når den når 100 °C, vil store bobler stige opp gjennom væska til overflata. Vi sier at det *koker*. Etter at det har begynt å koke, stiger ikke temperaturen mer, men er konstant lik 100 °C helt til alt vannet er fordampet. Det betyr at all varme som tilføres, brukes til å omdanne vannet fra væske til damp.



Trykkoker

Fordampning skjer også før 100 °C er nådd, men bare fra overflata. Ved koking vil fordampningen foregå fra *hele* væskevolumet, derav de store dampboblene som stiger opp. Studerer vi boblene, vil vi se at de vokser etter som de nærmer seg overflata. Dampen inne i boblene har et trykk, et *damptrykk*. Idet kokingen begynner, klarer væska akkurat å produsere et damptrykk som er større enn trykket i væska, slik at det oppstår ei boble. Ved bunnen må dampen overvinne både trykket fra lufta og tyngden av vannet for at bobler skal oppstå. Ved overflata er det bare lufttrykket, derfor vil ei boble som løsner fra bunnen, bli større når den stiger.

Ved lavt lufttrykk, for eksempel på høyfjellet, vil koking oppstå ved en lavere temperatur. Siden trykket er lavere skal det mindre energi til for å føre væska over til damp. På Galdhøpiggen koker vann ved ca. 92 °C. På Mount Everest er lufttrykket bare ca. 1/3 av lufttrykket ved havet, hvilket betyr at vann koker ved ca. 70 °C. Denne temperaturen er for lav til for eksempel å trekke te. Det betyr at tedrikkende fjellklatrerne bør ha med seg trykk-koker.¹⁴



14. Trykk-koker – Reklameillustrasjon – Tramontina Pressure Cooker

http://www.costsaving2u.com/index.php?main_page=product_info&cPath=53&products_id=674



Vannet klarer ikke å nå den temperaturen som trengs for at teen skal løse seg opp i vannet. For å heve temperaturen ved koking kan man bruke trykkokere. På den måten kan en koke poteter ved høyere temperatur (f.eks. 120 °C), som gjør at det går fortere (ca. 30%), og en sparer energi.

Figuren over viser hvordan kokepunktet varierer med trykket. Koking ved lave temperaturer og lavt trykk kan lett illustreres med følgende eksperiment:

Eksperiment: 3 Kok vann ved 50 °C

Til dette eksperimentet trenger du en 20 ml sprøyte (uten spiss) og litt lunkent vann. Ta vann fra varmtvannskranen og fyll sprøyta ca. 1/5 med vann. Sørg for at det er minst mulig luft i sprøyta. Vannet kan være fra 40 °C til 60 °C. Hold sprøyta nær vertikalt og hold for tuten med fingeren samtidig som du drar i håndtaket.



Da vil du se at vannet inne i sprøyta koker.

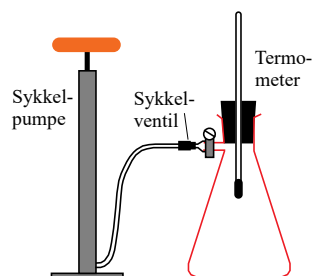
Når du trekker i håndtaket, senkes trykket over vannet, slik at kokepunktet senkes, og vannet koker kanskje helt ned mot 40 °C. Bruk et termometer og undersøk hvor langt ned i temperatur du klarer å få vannet til å koke.

Vi kan konkludere med at vi kan oppnå koking og dermed *fordampning fra hele væskevolumet ved å senke trykket*. Senker vi trykket tilstrekkelig og *braker en annen væske enn vann*, kan vi oppnå koking ved temperaturer under -30 °C, som vi har i en fryseboks.

På den andre siden ønsker vi å få til kondensering ved relativt høye temperaturer, bare vi hever trykket tilstrekkelig. Dette kan vi, om vi er heldig, demonstrere med følgende eksperiment:

Eksperiment: 4 Sammentrykket luft kondenserer og avgir varme

Bruk en kraftig Erlenmeyer-kolbe med en sideforgreining. Ha noen dråper vann inn i kolben. Koble sideforgreining til en slange med en ventil og en kraftig sykkelpumpe. Et termometer stikkes ned gjennom en kork med hull. Det er viktig at korken festes godt, gjerne med en klamp, slik at den ikke spretter av.¹⁵



15. Dette laboratorieutstyret er i salg hos Fredriksen naturfag <https://no.frederiksen.eu/>

Registrer temperaturen i kolben før du begynner å pumpe. Pump luft inn i kolben og registrer temperaturen på nytt. Hva skjer med temperaturen? Skjer det noe annet i kolben?

Hva skjer når du etterpå slipper lufta raskt ut av kolben?

Når du øker trykket i kolben, vil du legge merke til at temperaturen i kolben stiger noen grader. Du vil også registrere at det danner seg dugg på innsiden av glasset. Når lufta trykkes sammen, vil dampen som befinner seg i kolben kondensere og legge seg som dogg på innsiden av glasset. Når dampen kondenserer, avgir den varme som gjør at temperaturen stiger.

Dersom du slipper lufta raskt ut av kolben vil kondensen fordampe og temperaturen vil synke noen grader, siden fordampning krever varme.

Ventilen skiller lavtrykkssiden fra høytrykkssiden

Etter at arbeidsmediet har kondensert og gitt fra seg varme, kommer det til ventilen som slipper det ut i små porsjoner. Trykket foran ventilen er høyt, mens det etter ventilen er lavt.

Ventilen skiller altså høytrykkssiden fra lavtrykkssiden. Ventilen er en liten dyse (hull) som arbeidsmediet presses ut gjennom. En slik trykkreduksjon vil medføre en voldsom ekspansjon med tilhørende temperaturfall. Hvordan dette fungerer, kan illustreres ved følgende eksperiment:

Eksperiment: 5 Gass som utvider seg, blir kald

Ta en sprayboks med luftrensere og spray ut i lufta. Kjenn på boksen og dyschetta. Hva kjenner du?



Når du spruter ut litt av innholdet i sprayboksen, så blir boksen kald. Vi kan tenke oss at stoffet i boksen står under høyt trykk og har i utgangspunktet romtemperatur. Når vi spruter noe av dette stoffet ut, vil volumet til gassen som forlater boksen øke kraftig. Når varmen i det sammenpressede stoffet utvides, vil varmen fordele seg over et større volum, og temperaturen faller. Samtidig vil noe av stoffet fordampe og avkjøle omgivelsene.

Slik er det også i varmepumpa. Når trykket i arbeidsmediet synker, får vi en kombinasjon av utvidelse og fordampning. Fordampningen tar varme fra omgivelsene som avkjøles.

4.2 Pedagogisk forklaringsmodeller

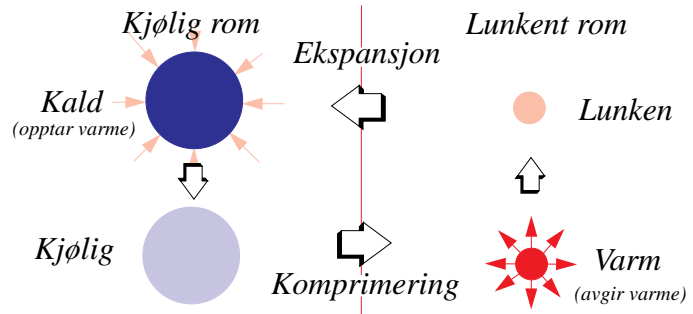
I dette avsnittet skal vi se på to ulike måter å formidle varmepumpas virkemåte på til elevene. Den første kaller vi "Fotball/tennisball-modellen", den andre kaller vi "Sirkulasjonsmodellen".



4.2.1 “Fotball/tennisball-modellen”

La oss tenke oss at vi har en beholder på størrelse med en fotball. Gassen inne i ballen er i utgangspunktet **kald**. Vi legger ballen i et **kjølig** rom (dvs. at rommet er kjølig, men likevel varmere enn ballen), hvor den kalde ballen tar til seg varme fra omgivelsene. La oss anta at den opptar 100 enheter varme. Dermed vil rommet omkring ballen avkjøles ytterligere.

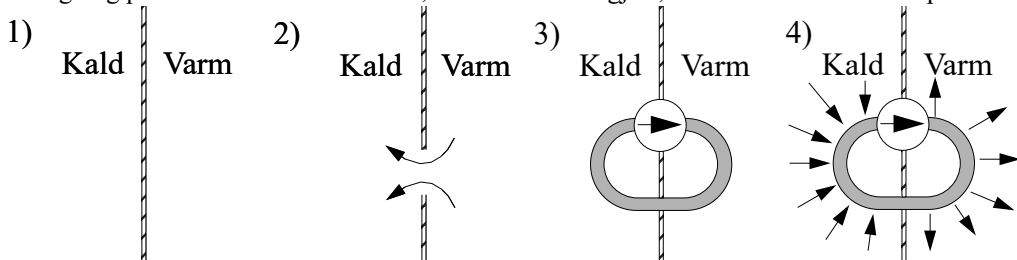
Så flytter vi ballen over til et lunkent rom som vi ønsker å varme opp, samtidig som vi **komprimerer** den, slik at den blir på størrelse med en tennisball. Tennisballen inneholder fortsatt 100 varmeeenheter, men fordi denne varmen er presset sammen i et langt mindre volum, vil temperaturen stige betraktelig (se eksperiment 4



foran). Siden ballen nå er varm, vil varme sive ut gjennom veggene i ballen og ut i rommet. Dermed vil ballen avkjøles, og temperaturen i rommet stige. La oss si at ballen etter avkjøling inneholder 50 enheter varme. Så ekspanderer vi ballen slik at den igjen blir på størrelse med en fotball samtidig som vi flytter den tilbake til det kjølige rommet. Siden ballen fortsatt inneholder 50 enheter varme, vil temperaturen synke kraftig (se eksperiment 4). Men siden ballen nå er blitt kaldere enn det kjølige rommet, vil varme sive fra rommet og inn i ballen som igjen fylles til den har 100 varmeeenheter. På denne måten flytter vi energi ved å flytte ballen fram og tilbake, samtidig som den ekspanderes og komprimeres. Den eneste energien vi trenger å tilføre utenfra, er for å flytte og komprimere ballen. Den tilførte energien utenfra (ofte som elektrisk energi) bidrar i praksis også til å gjøre ballen varmere. Ekspansjonen bruker av den indre energien i ballen og bidrar til avkjølingen.

4.2.2 Sirkulasjonsmodellen

I denne framstillingen skal vi gå meget langsomt og grundig til verks. Framstillingen kombinerer enkle skisser med eksperimenter som forklarer varmepumpas virkemåte. Skissene egner seg godt for tegning på tavle eller “white board”, eller som vi har gjort, bruke en animert Powerpoint.

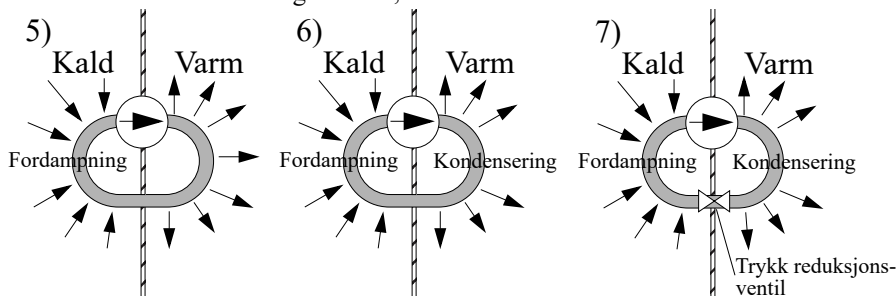


1. Vi tenker oss at vi har en vegg hvor det er varmt på den ene siden og kaldt på den andre.

2. Dersom vi lager et lite hull i veggen, vil varmen sive fra den varme siden over til den kalde. Etter noe tid, vil temperaturen i de to rommene bli like. At varme flyter fra et varmt til et kaldt sted, er det normale. Det skjer hele tida. Vår utfordring er å flytte varme fra den kalde siden og over til den varme siden av veggen. Vi må ikke glemme at selv om temperaturen er lav (under 0 °C), så er det fortsatt mye termisk energi (varme) til stede.
3. Vi lager oss ei rørsøyfe som dels er på den kalde og dels på den varme siden av veggen. Så setter vi inn ei pumpe i rørsystemet slik at væsken som røret er fylt med, sirkulerer.
4. Vi ønsker at varme skal strømme **inn** i røret og i væsken som sirkulerer på venstre side, og at varmen skal strømme **ut** av røret på høyre side. På den måten kan vi pumpe varme fra den kalde til den varme siden.

Mange elever vil på dette tidspunktet protestere og si at: “Vil ikke varmen sive inn i røret på høyre side og ut på venstre?” Det er et helt korrekt. Det vi har tegnet, er det vi ønsker oss, men som vi ennå ikke har fått til. La oss først se hvordan væsken kan oppta varme.

På dette tidspunktet er det naturlig å demonstrere fordampning av eter eller deodorant på hånda (eksperiment 1). Elevene vil kjenne at eteren gjør huden kald idet den fordampes. Fordampning krever varme som blir tatt fra omgivelsene, i dette tilfellet huden.



5. Klarer vi å få væsken i røret på venstre side til å **fordampe**, vil det sive varme inn i røret. Hvordan kan vi så få væske til å avgi varme på høyre side?

På dette tidspunktet demonstreres kondensering av damp mot en kjølig metallplate (eksperiment 2). Elevene kjenner at plata blir varm når dampen kondenseres.

6. Klarer vi altså å få væsken i røret på høyre side til å kondensere, vil det sive varme ut av røret.

Men det er noe galt her. Vi vet av erfaring av fordampning skjer mest effektivt på den siden temperaturen er høyest, mens kondensering skjer helst der det er kjølig. I vårt tilfelle synes det å være omvendt. Utfordringen er derfor å finne ut hvordan vi kan oppnå fordampning i kjølige omgivelser og kondensering der det er varmt.

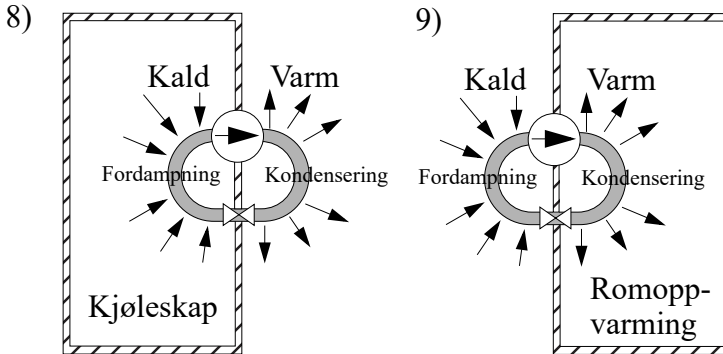
Vi vet at fordampningen er størst når en væske koker. Får vi væsken i røret på venstre side til å koke selv om det er kjølig, så har vi kanskje løst ett av problemene. Vann koker vanligvis ved 100 °C. La oss se om vi klarer å få vann som holder 50 °C, til å koke.

På dette tidspunktet gjennomfører vi eksperiment 3, koking av vann under lavt trykk. Elevene får



hver sin sprøyte og tilgang på litt lukket vann. Ved å senke trykket, ser de at vannet bobler og koker. Ved å gjøre trykket tilstrekkelig lavt (lage sug) i røret på venstre side, kan vi få væsken i røret til å koke til tross for at den er kjølig. På tilsvarende måte kan vi få kondensering i rørene på høyre side ved å øke trykket.

7. Vi trenger altså lavt trykk på venstre side og høyt trykk på høyre side. For å skille de to sidene fra hverandre, må vi sette inn en trykk reduksjonsventil i røret som fører fra den varme til den kalde siden. Denne ventilen er egentlig bare et lite hull eller et tynt rør. Når den varme væsken under høyt trykk presses gjennom ventilen, vil trykket og temperaturen falle. Det samme skjer når vi trykker på ventilen til en sprayboks (eksperiment 5). Vi kjenner at dusjen som kommer ut gjennom dysa, er kald.



8. Dersom vi isolerer den kalde siden, vil vi få et kjøle- eller fryseskap. Denne løsningen vil også fungere som kjøling i et rom en varm sommerdag.
9. Dersom vi isolerer den varme siden, vil vi få et system for romoppvarming.

4.3 Arbeidsmedier og p-h diagrammer

Egenskapene til arbeidsmediet er viktige. Mange ulike medier er brukt fra varmepumpene begynte å komme på markedet på begynnelsen av 1900-tallet. Før 1930 ble naturlige stoffer som eter (etyleter), svoveldioksid (SO_2), ammoniakk, propan og isobutan brukt. Senere klarte man å utvikle syntetiske stoffer som KFK- (Klor-Fluor-Karboner) og HKFK-medier (Hydrogen-Klor-Fluor-Karboner), som fungerte ypperlig til formålet, helt til man oppdaget at de var ozon-nedbrytende. Fra 1991 var det i Norge forbudt å bruke KFK-medier i nye anlegg, noe man faktisk kan ane konsekvensen av i dag. Tidlig på 90-tallet ble HFK-mediene introdusert (Hydrogen-Fluor-Karbon). Disse har derfor vært dominerende de seneste tiårene. I det siste har man imidlertid lykkes med å finne praktiske løsninger for å utnytte CO_2 som arbeidsmedium. Problemet med CO_2 har vært de høye trykkene som kreves for å oppnå varmeavgivelse ved ønsket temperatur.

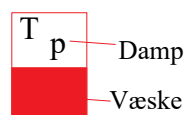
Et sentralt begrep er *metningstrykk*. La oss se litt på hva metningstrykk er før vi går videre.

4.3.1 Metningstrykk [3]

La oss tenke oss at vi har en lukket beholder som inneholder rent vann. I utgangspunktet er vannet fysisk atskilt med et lokk fra resten av beholderen som ikke inneholder noe vann eller vanndamp. Idet vi fjerner lokket, vil noe av vannet fordampe for så å kondensere til vann igjen. I starten vil det fordampe mer vann enn det kondenseres, men etter hvert vil det oppstå en balanse mellom fordampning og kondensering, og vi har nådd en metning.

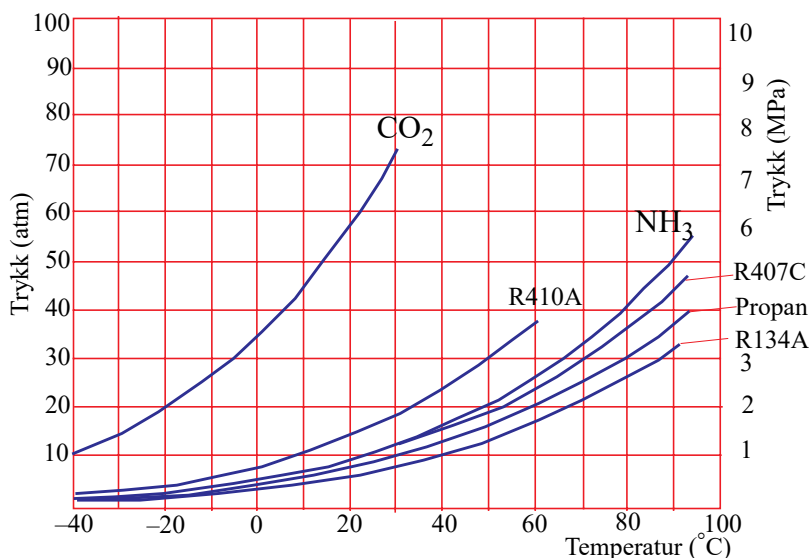
Dampen vil på samme måte som lufta øve et visst trykk. Etter som mer vann fordampes, vil trykket som denne dampen øver, øke. Når det oppstått en balanse mellom fordampning og kondensering, kan ikke damptrykket øke mer, og dampen har nådd sitt *metningstrykk*. Størrelsen til metningstrykket vil variere med temperaturen. Ved høy temperatur vil metningstrykket være høyere enn ved lavere temperaturer. I praksis betyr det at varm luft kan inneholde mer vanndamp (gram vann/m³) enn kald luft.

Vi er imidlertid ikke avhengig av at vannet fordampes i luft. Dersom vi har en lukket beholder med en veske med vakuüm over, vil det etter en tid også dannes damp over vesken. Vi kan måle trykket i denne dampen. Det viser seg at dette trykket (p) vil være konstant uavhengig av volumet, men avhengig av temperaturen (T).



Metningstrykket til arbeidsmediet er en viktig parameter for varmpumper. Figuren til høyre viser metningsstrykk som funksjon av temperatur for noen arbeidsmedier. R404A, R407A og R134A er HFK-medier.

Vi kan merke oss at 1 atm er ca. 100 000 Pa eller 0,1 MPa, som gjerne er den måleenhet som brukes.



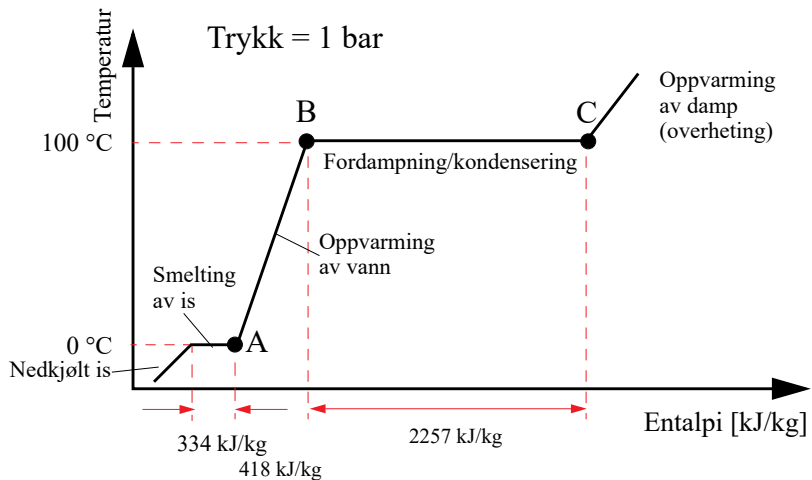
For at varmpumpa skal fungere på en tilfredsstillende måte, må vi forlange at vi kan oppnå tilstrekkelig fordampning ved *akseptable* lave trykk (større enn 1 bar), samtidig som vi kan oppnå nødvendig kondensering ved *akseptable* høye trykk (mindre enn 25 bar). I den forbindelse betyr *akseptable* at vi kan nøye oss med en billig kompressor. Av figuren over ser vi at bruk av CO₂



stiller større krav til utstyret, siden kompressoren må bringe CO₂ opp på et langt høyere trykk enn de mer tradisjonelle arbeidsmediene. Det vil også stille større krav til rør og koblinger for å unngå lekkasje.

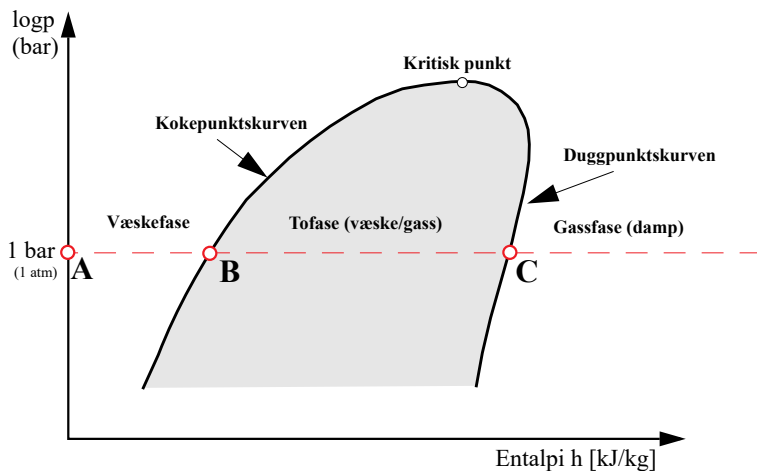
4.3.2 p-h diagrammet¹⁶

La oss se litt nærmere på hva som skjer idet væsken går over til damp. Vi tar utgangspunkt i energidiagrammet for vann som vi tidligere har studert. Her ser vi hvordan vannet går gjennom en rekke faseendringer når det tilføres varme. Ved A



(0 °C) har isen gått over til vann. Ved B (100 °C) koker vannet, og fordampning skjer fra hele væskevolumet. Ved C er all væske gått over til damp. Tilføres ytterligere termisk energi, vil damptemperaturen øke, og vi sier at dampen er *overhettet*. Vi legger merke til at energiaksen angir energimengde pr. kg av stoffet. Energi pr. kg betegnes også *entalpi*.

Plasseringen av faseovergangene A, B og C er imidlertid også avhengig av trykket. Vi kan dermed tegne et diagram som viser energimengde pr. kg ved de ulike faseovergangene, som funksjon av trykket over væsken (stoffet). Dersom vi kaller entalpien (energi/masse) for *h*, og trykket for *p*, kan vi tegne et såkalt *p-h diagram*.



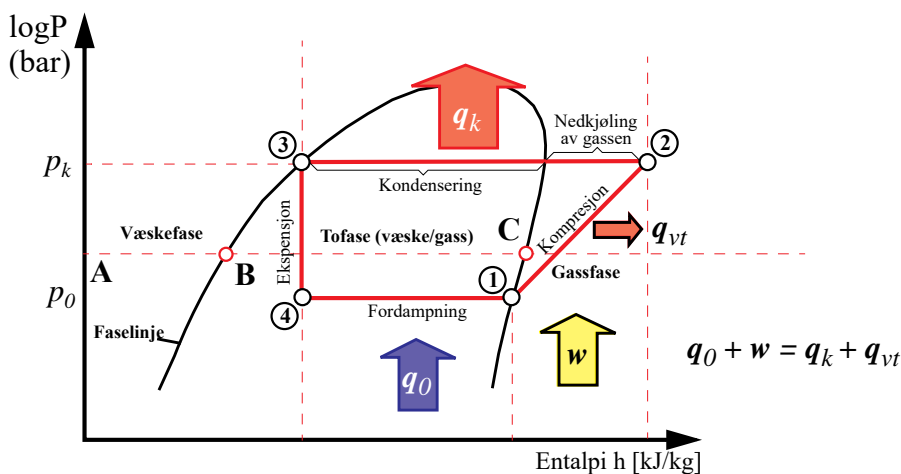
16. Dette stoffet er hentet fra Jørn Stenes (SINTEF) foredrag og fra [4].

Vi kjenner igjen punktene A, B og C fra figuren foran. Disse antyder verdien til entalpien ved faseovergangen fra fast stoff (is – for vann) til væske (A), fra væske til gass (B – kokepunktet), og entalpien der *all* væske har gått over til damp (C). Til høyre for C vil dampen være overhettet. I området mellom B og C har vi en tofasetilstand, hvor noe av mediet er i væskeform, og resten er gått over til damp. I dette området brukes den tilførte energien til fordampning, mens temperaturen er konstant. Andelen damp øker etter hvert som vi nærmer oss C.

Venstre del av den buede kurven kalles *kokepunktskurven*. Vi legger merke til at nødvendig energiinnhold i mediet for at koking skal inntreffe, øker med økende trykk helt til vi kommer til det *kritiske punktet*. Over kritisk punkt vil mediet ikke fordampe når varme tilføres mediet, men temperaturen vil øke. Avkjølingskurvens forløp er bestemt av mediets tetthet og spesifikke varmekapasitet ved ulike temperaturer og trykk. Kurven til høyre for kritisk punkt kalles *duggpunktskurven*. Den angir verdien til entalpien (energi/kg) som funksjon av trykket hvor dampen begynner å kondensere.

Arbeidsmediene som brukes i varmepumper og kjøleskap, har lignende sammenhenger mellom trykk og entalpi. Vi skal bruke dette diagrammet til å vise hva som foregår når arbeidsmediet sirkulerer i varmepumpa eller kjøleskapet.

På figuren under viser den trapeslignende kurven tilstanden til arbeidsmediet. La oss starte i tilstand 1.



4 – 1 Fordampning, 1 – 2 Kompressjon, 2 – 3 Kondensering, 3 – 4 Ekspansjon

Ved tilstand 1 er arbeidsmediet så vidt gått over i dampform. Trykket er relativt lavt (p_0), og arbeidsmediet er på vei inn i kompressoren. Fra tilstand 1 til 2 tilfører kompressoren energi (w) til arbeidsmediet, og trykket øker betraktelig (p_k). Idet arbeidsmediet går fra tilstand 2 til 3, kondenseres arbeidsmediet og avgir varme (q_k) til omgivelsene i kondensatoren. Ved tilstand 3 er arbeidsmediet i væskeform idet det møter ekspansjonsventilen, og trykket faller fra tilstand 3 til



4. I denne overgangen vil arbeidsmediet beholde sin entalpi, men befinne seg til høyre for kokepunktskurven. Dermed vil arbeidsmediet fordampe og oppta termisk energi (q_0) fra omgivelsene, som avkjøles.

Slik sirkulerer arbeidsmediet i varmepumpa og opptar og avgir termisk energi. Generelt kan vi si:

- Høyt trykk gir høy temperatur, slik at det avgis varme til omgivelsene.
- Lavt trykk gir lav temperatur, slik at varme kan opptas fra omgivelsene.

Avhengig av om vi ønsker kjøling eller oppvarming, kan vi isolere fordamperen (kjøling) eller kondensatoren (oppvarming).

Vi kan sette opp energibalansen:

$$\mathbf{q_0 + w = q_k + q_{vt}} \quad (4.1)$$

hvor q_0 er termisk energi opptatt i fordamperen, w er elektrisk energi tilført av kompressoren, q_k er avgitt termisk energi i kondensatoren og q_{vt} er energien som lekker ut av systemet. Kompressoren har også varmetap.

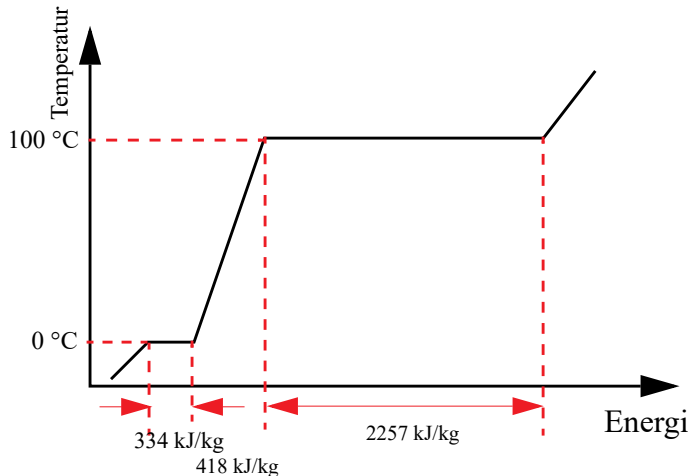
4.4 To laboratorieøvelser knyttet til forståelse av varmepumper

Dette delkapitlet beskriver to laboratorieøvelser for å øke den grunnleggende forståelsen av varmepumpas virkemåte.

4.4.1 Måling av kondensasjonsvarmen til vann

Dette laboratorieforsøket illustrerer at den termiske energien i vandamp er vesentlig mye større enn energien i varmt vann med samme temperatur. Det er en egenskap som utnyttes i varmepumper, dog ikke for vann, men for kjølemediet som sirkulerer mellom den varme og kalde delen av varmepumpa.

Som tidligere omtalt viser figuren til høyre energitilstanden for vann ved 1 atm trykk i ulike tilstander.



Diagrammet viser hvor mange kilojoule (kJ) som skal til for å føre 1 kg is over til vann (334kJ/kg), og tilsvarende for å føre 1 kg vann ved 100 °C over til damp med samme temperatur (2257 kJ/kg). Som vi ser, skal det en betydelig mengde varme til for å bringe vann over til damp med samme temperatur, og mye mer enn for å føre is over til væske også med samme temperatur.

En del av denne energien brukes til utvide væsken til gass (det vil si bryte bindingene mellom vannmolekylene), men mesteparten brukes til å øke energiinnholdet i dampen. Ved et trykk på 1 atm, regner vi med at dampen tar ca. 1675 ganger så stor plass som den tilsvarende væskemengden.

I det neste forsøket skal vi styrke denne antagelsen.

Måling av temperaturøkning tilsatt 5 ml kokende vann

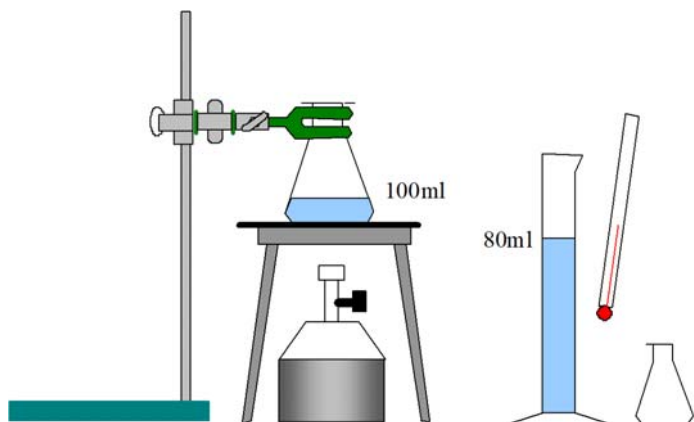
Utstyr

- Erlenmeyerkolbe (250 ml) med ca. 100 ml med vann
- Kork med hull
- 2 glassrør bøyd i 90 °C vinkel
- Gummislange
- 1 målesylinder (100 ml)
- Termometer
- Kokestativ med nett
- Stativ med fot og klype
- Isoporkloss (etter behov)
- Gassbrenner
- Fyrstikker
- Begerglass/kolbe 100 ml

Figuren til høyre viser måleoppstillingen

Framgangsmåte

1. Fyll akkurat 80 ml vann i målesylinderen og mål temperaturen (t_1) på vannet (noter).
2. Fyll ca. 100 ml vann i erlenmeyerkolben.
3. Sett kolben på stativet og fest den til stativet med klypa.





4. Tenn gassbrenneren, og kok opp vannet uten å sette på korken med glassrør.
5. Mål temperaturen (t_2) på det kokende vannet (unngå å berøre bunnen med termometeret).
Noter.
6. Hell ca. 5 ml kokende vann fra erlenmeyerkolben over i målesylinderen. Rør godt rundt med termometeret. Les av nøyaktig hvor mye vann (m_2) som er blitt tilført. Noter i gram.
7. Mål temperaturen på vannet i målesylinderen (t).

Gjenta forsøket om ønskelig.

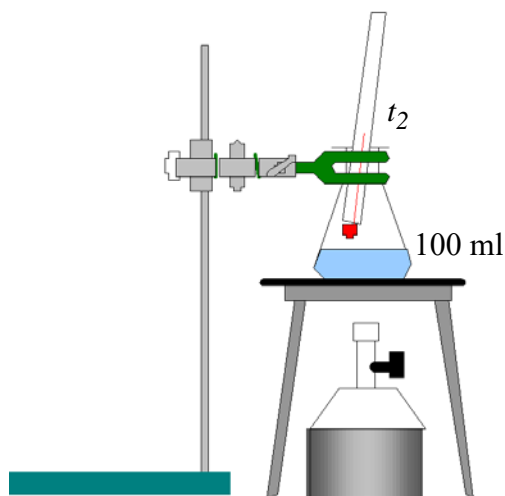
Måling nr.	Mengde vann i sylinder før tilsatt varmt vann (m_1)	Temp. i sylinder før tilsatt varmt vann (t_1)	Mengde varmt vann tilført målesylinder (m_2)	Temp. i varmt vann i kolbe (t_2)	Temp. i målesylinder etter tilsatt varmt vann (t)	Kommentar
1						
2						

Regn om fra milliliter til gram (1 ml vann = 1 gram).

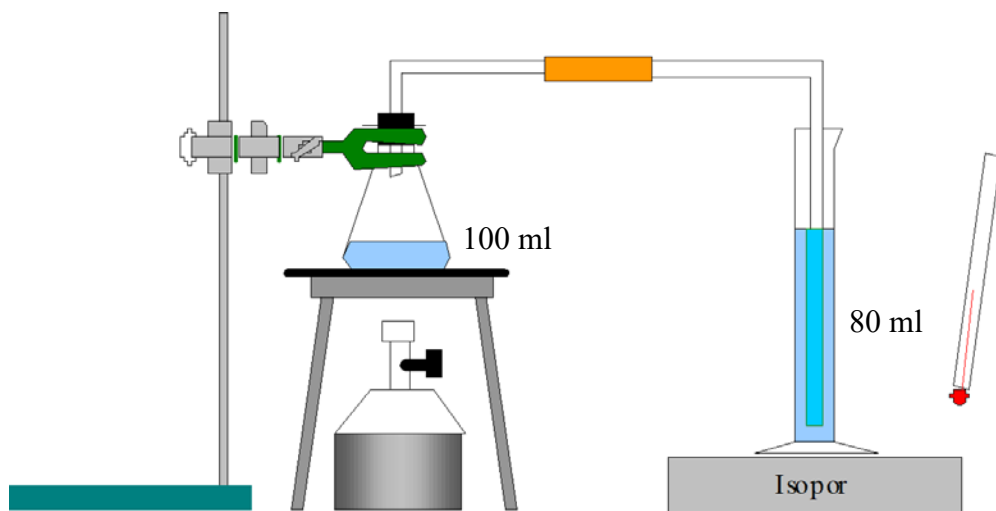
Måling av temperaturøkning tilsatt damp tilsvarende 5 ml vann

Framgangsmåte

1. Fyll på nytt akkurat 80 ml vann (m_1) i målesylinderen og mål temperaturen på vannet. Noter.
2. Kok opp vannet på nytt uten at glassrørene er tilkoblet, som vist på figuren til høyre.
3. Mål temperaturen (t_2) på dampen rett over vannflata når vannet koker. Noter.



4. Før røret med damp fra erlenmeyerkolben ned i vannet i målesylindringen.



5. La glassrøret gå langt ned i vannet – helst ned til bunnen av målesylindringen. La røret med damp stå slik til det er tilført like mye væske som i del 1 av forsøket (5 ml). Rør godt rundt med termometeret.

6. Mål temperaturen (t) etter at 5 ml vann er tilført som damp. Noter.

Gjenta forsøket om ønskelig.

Måling nr.	Mengde vann i sylindring før tilsatt damp (m_1)	Temp. i sylindring før tilsatt damp (t_1)	Mengde damp tilført målesylindring (m_2)	Temp. i damp i kolben (t_2)	Temp. i målesylindring etter tilsatt damp (t)	Kommentar
1						
2						

Observasjoner

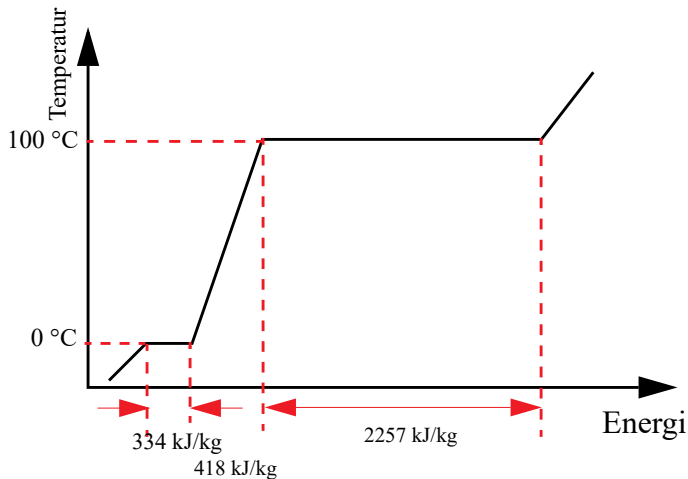
Sammenlign temperaturen hos vanndamp temperaturen til det kokende vannet? Var det forskjell på temperaturstigningen i de to forsøkene, og hvordan forklares det?



Det neste delkapittelet beskriver hvordan måleresultatene kan brukes til å beregne spesifikk varmekapasitet for vanndamp.

4.4.2 Beregning av kondensasjonsvarmen til vanndamp

Vanndamp med temperatur 100 °C inneholder mye mer energi enn vann av samme temperatur (se figuren under).



Vi skal her måle kondensasjonsvarme for vann. Men først må vi se litt på teorien.

Teorigrunnlag

Den varmemengden som et stoff inneholder, bestemmes av stoffets *masse*, dets *temperatur* og dets evne til å oppta *varme*. Stoffets evne til å oppta varme angis med stoffets *spesifikke varmekapasitet* (c_0) og er forskjellig fra stoff til stoff. Det betyr at det skal forskjellig mengde varme til for å varme opp 1 kg vann og 1 kg jern, 1 grad Kelvin. Det skal dessuten mer energi til for å varme opp en stor mengde stoff, framfor å varme opp en liten mengde stoff.

Varmemengden Q som skal til for å varme opp massen m fra temperaturen t_1 til t_2 , kan skrives som

$$Q = c_0 m (t_2 - t_1) \quad (4.2)$$

Varmemengde (Q), måles i joule (J), massen (m) i kg, temperaturen (t) i grader (Kelvin eller grader Celcius). c_0 får da benevnningen kJ pr. kg og grader (kJ/kgK).

For et stoff av en spesiell utforming og masse, som for eksempel en kolbe eller målesylinder, kan vi slå sammen den spesifikke varmekapasiteten og massen, siden innretningen alltid vil ha samme masse, og kalle denne for innretningens varmekapasitet C . Den varmemengden som skal til for å varme opp innretningen fra temperaturen t_1 til t_2 , kan da skrives som:

$$Q = C (t_2 - t_1) \quad (4.3)$$

På lignende måte kan vi definere den varmemengden som skal til for å gjøre om 1 kg vann til 1 kg damp med samme temperatur. Denne varmemengden kaller vi *fordampningsvarmen, l*. Trenger vi en spesiell varmemengde for å føre 1 kg vann over til 1 kg damp, får vi den samme varmemengden tilbake når dampen kondenserer til vann. Setter vi Q lik den varmemengden som skal til for å føre vannmengden m over til damp, kan vi skrive:

$$Q = l m \quad (4.4)$$

Vi legger merke til at vi kan sløyfe temperaturen, siden vi antar at dampen har samme temperatur som det kokende vannet.

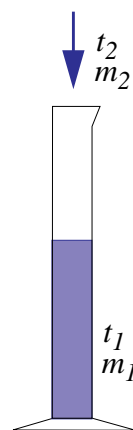
Nå kan vi sette opp varmemengde-ligningen for forsøket vårt. La oss begynne med varmemengden som overføres når vi heller 5 ml kokende vann i målesylindren.

$$Q_{\text{varmt vann}} = Q_{\text{kaldt vann}} + Q_{\text{sylinder}} \quad (4.5)$$

Den varmemengden som det varme vannet avgir ($Q_{\text{varmt vann}}$), må være lik varmemengden som det kalde vannet i målesylindren mottar ($Q_{\text{kaldt vann}}$), pluss varmemengden som selve målesylindren m/termometer mottar (Q_{sylinder}) (her inngår også tap til omgivelsene). Skriver vi denne ligningen fullt ut, får vi

$$c_0 m_2 (t_2 - t) = c_0 m_1 (t - t_1) + C(t - t_1) \quad (4.6)$$

t er den temperaturen vi ender opp med i målesylindren etter at det varme vannet er tilført, hvor m_2 og t_2 er massen og temperaturen til det varme vannet, m_1 og t_1 er massen og temperaturen til det kalde vannet, mens t er den endelige temperaturen i målesylindren.



La oss anta at oppvarmingen av målesylindren betyr lite for forsøket. Da kan vi stryke det siste leddet i ligning (4.6), og vi kan løse ligningen for å finne den forventede temperaturen i målesylindren etter at det varme vannet er tilført.

$$t = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2} \quad (4.7)$$

Bestem apparatets varmekapasitet

Dersom vi kjenner spesifikk varmekapasitet for vann, kan vi bruke de målte temperaturene til å finne apparaturens varmekapasitet, C . Løser vi ligning (4.6) mht. C , får vi

$$C = \frac{c_0 (m_2 (t_2 - t) - m_1 (t - t_1))}{(t - t_1)} \quad (4.8)$$



hvor $c_0 = 4,19 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. Det vil si c_0 er den varmemengden som skal til for å varme opp 1 kg vann én grad. Denne verdien av C kan vi senere bruke når vi skal måle kondensasjonsvarmen.

Måling av måleapparaturens varmekapasitet, et måleeksempel

Her gjennomfører vi et måleeksempel slik at vi kan få et inntrykk av hva det er mulig å oppnå av resultater.

Vi fyller en målesylinder med 80 ml (0,08 kg) vann og måler temperaturen i vannet til $21,8^\circ\text{C}$. Vi tilsetter 5 ml (0,005 kg) kokende vann med en temperatur på $98,5^\circ\text{C}$.

Måling nr.	Mengde vann i målesylinder før tilsatt varmt vann (m_1)	Temp. i målesylinder før tilsatt varmt vann (t_1)	Mengde varmt vann tilført målesylinder (m_2)	Temp. i varmt vann i kolbe (t_2)	Temp. i målesylinder etter tilsatt varmt vann (t)	Kommentar
1	0,08 kg	21,8 °C	0,005 kg	98,5 °C	25 °C	

Vi beregner forventet temperatur med ligning (4.7) og får

$$t = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2} = \frac{0,08 \cdot 21,8 + 0,005 \cdot 98,5}{0,08 + 0,005} = 26,3^\circ\text{C} \quad (4.9)$$

Målingene viser at vannet holder 25°C etter at det kokende vannet er tilsatt målesylinderen. Vi har altså et avvik på $1,3^\circ\text{C}$, som er relativt mye. Vi antar at dette skyldes tap av varme til måleoppsettet. Ved hjelp av ligning (4.8) vil vi bestemme instrumentenes varmekapasitet.

$$C = \frac{c_0(m_2(t_2 - t) - m_1(t - t_1))}{(t - t_1)} \quad (4.10)$$

$$\frac{4,19(0,005(98,5^\circ - 25^\circ) - 0,08(25^\circ - 21,8^\circ))}{25^\circ - 21,8^\circ} = 0,146 \text{ kJ/K kg} \quad (4.11)$$

Denne verdien skal vi ta med oss når vi skal beregne kondensasjonsvarmen.

Måling av kondensasjonsvarmen til vanndamp, et måleeksempel

I det neste forsøket skal vi lede 5 ml (0,05 kg) damp ned i vannet i målesylinderen slik at vannstanden i målesylinderen øker med 5 ml. Vi skal også måle temperaturen vi får.

Vi setter igjen opp ligningen som beskriver overføringen av varme fra dampen til vannet i målesylindren:

$$Q_{\text{damp}} + Q_{\text{varmt vann}} = Q_{\text{kaldt vann}} + Q_{\text{sylinder}} \quad (4.12)$$

Først avgir dampen varme idet den kondenserer (Q_{damp}). Derneft avgir det kondenserte vannet varme ($Q_{\text{varmt vann}}$) til det kalde vannet ($Q_{\text{kaldt vann}}$) og til målesylindren og termometeret (Q_{sylinder}). Vi setter inn uttrykkene for de ulike varmemengdene og får

$$l m_2 + c_0 m_2 (t_2 - t) = c_0 m_1 (t - t_1) + C (t - t_1) \quad (4.13)$$

Her er l kondensasjonsvarme, C er varmekapasiteten til måleutstyret, og t er den temperaturen vi ender opp med i målesylindren. Løser vi denne ligningen mht. på vanddampens kondensasjonsvarme l , får vi

$$l = \frac{c_0 m_1 (t - t_1) + C (t - t_1) - c_0 m_2 (t_2 - t)}{m_2} \quad (4.14)$$

Alternativt kan en ta utgangspunkt i at kondensasjonsvarmen er kjent og lik $l = 2257 \text{ kJ/kg}$, for så å beregne den forventede temperaturstigningen t .

$$t = \frac{(c_0 m_1 + C) t_1 - (c_0 t_2 + l) m_2}{(c_0 (m_1 + m_2) + C)} \quad (4.15)$$

Eksempel

La oss ta utgangspunkt i målinger og se om vi kan beregne kondensasjonsvarmen (som er den samme som fordampningsvarmen for vann) for vanddamp.

Følgende verdier er målt:

Måling nr.	Mengde vann i sylindrer for tilsatt damp (m_1)	Temp. i sylindrer for tilsatt damp (t_1)	Mengde damp tilført målesylindrer (m_2)	Temp. i dampen fra kolben (t_2)	Temp. i målesylindrer etter tilsatt damp (t)	Kommentar
1	0,08 kg	22 °C	0,05 kg	97,2 °C	48 °C	

I tillegg har vi målt varmekapasiteten til måleutstyret til $C = 0,146 \text{ kJ/K kg}$.



Dersom vi setter inn i ligning (4.14) får vi:

$$C = \frac{4,19 \cdot 0,08(48 - 22) + 0,146(48 - 22) - 4,19 \cdot 0,005(97,2 - 48)}{0,005} = 2296,1 \text{ kJ/K} \quad (4.16)$$

Dette er et avvik på

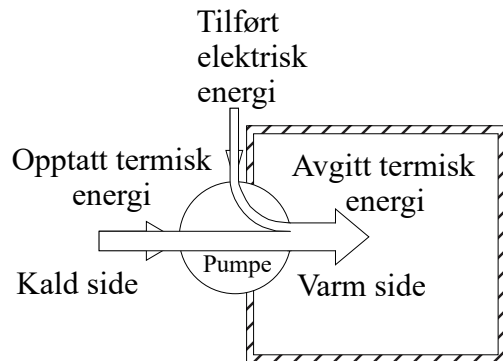
$$\frac{(2296,1 - 2257)100\%}{2257} = 1,7 \% \text{ avvik} \quad (4.17)$$

Hvilket er langt bedre enn forventet.

4.4.3 Måling av virkningsgrad (varmefaktor) – En laboratorieøvelse

For å forklare varmefaktoren til ei varmepumpe, er det enklest å betrakte den som et lukket rom som vist på figuren til høyre.

Ei varmepumpe pumper varme fra den kalde (*opptatt termisk energi*) til den varme siden (*avgitt termisk energi*). For å få til dette må vi tilføre pumpa elektrisk energi (*tilført elektrisk energi*). Som vi skjønner av figuren, så er vi i dette tilfellet mest opptatt av hvor mye varme (termisk energi) vi kan få inn i rommet vårt. Den varmen vi opptar på utsiden av rommet på kald side, er gratis. Mens den energien vi tilfører fra det elektriske nettet for å drive pumpa, må vi kjøpe. Vi ønsker derfor å bruke minst mulig tilført kostbar elektrisk energi og oppta mest mulig gratis termisk energi (varme) fra utsiden (kald side).



Varmefaktoren angir forholdet mellom mottatt varme som vi kan nyttiggjøre oss, og den tilførte elektriske energien som vi betaler for. Jo større dette forholdet er, jo mer lønnsom er varmepumpa.

$$\text{Varmefaktoren} = \frac{\text{Avgitt termisk energi}}{\text{Tilført elektrisk energi}} \quad (4.18)$$

Måling av varmefaktor

For å gjennomføre denne øvelsen trengs følgende utstyr:

- Varmepumpe med varmeisolert vannbeholdere på varmsiden
- Termometer

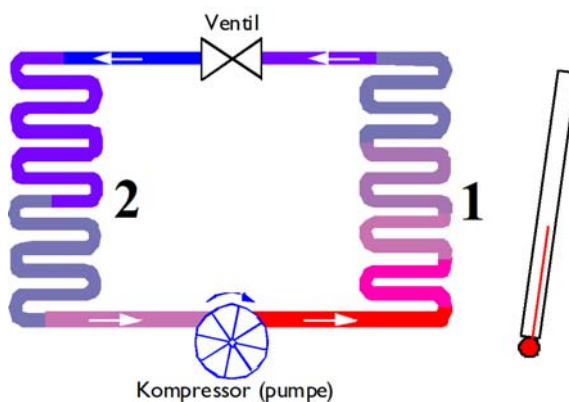
- Klokke
- Litermål
- Effektmåler for måling av elektrisk effekt

Figuren under gjengir en prinsippsskisse av varmepumpa.

Gjør følgende:

Angi på figuren (kan gjøres mens målingen pågår):

- På hvilken side opptas termisk energi (varme)?
- På hvilken side avgis termisk energi (varme)?
- På hvilken side skjer det kondensering?
- På hvilken side skjer det fordampning?
- På hvilken side er det lavt trykk?
- På hvilken side er det høyt trykk?
- Hvilken vei pumpes den termiske energien (varmen)?



Vi skal nå finne ut hvor effektiv denne pumpe er ved å bestemme forholdet mellom avgitt termisk energi på varmsiden og tilført elektrisk energi. Dette forholdet kaller vi *varmefaktoren* (VF) til varmepumpe:

For å finne *avgitt energi* må vi måle vanntemperaturen på *varm side* over tid. For å finne *tilført elektrisk energi* måler vi elektrisk *effekt* over tid. For virkelig å se at vi pumper termisk energi, gjør vi også målinger på den *kalde siden*.

Gjør følgende:

Bildet til høyre viser varmepumpe uten termos og plastbeger.

1. Sett en termos rundt kobberør-spiralen på venstre side, som er den varme siden, og ei plast-bøtte på høyre som er den kalde siden.
2. Fyll opp termosen til venstre med 2,5 liter vann. Noter massen til vann på varm side:kg





3. Fyll opp plastbøtta til høyre med 5 liter vann slik at vannet står over kobberør-spiralen.
Noter massen til vannet på kald side:kg

4. Mål temperaturen i begge karene og noter i tabellen.

Det er viktig å røre godt under målingene siden det varme vannet har en tendens til å samle seg øverst, og det kalde nederst i beholderne.

5. Start kompressoren og start klokka.

6. Les av effektforbruket på effektmåleren og noter i tabellen.

7. Les av temperaturene og effekten med ca. 3 minutters mellomrom og noter i tabellen.

8. Les av trykket på varm og kald side med ca. 3 minutters mellomrom og noter i tabellen.

Tid fra start	Temperatur (°C)		Trykk (bar)		Tilført elektrisk effekt (Watt)
	Varm side	Kald side	Varm side	Kald side	
Oppstart 0 min	°C	°C	bar	bar	W
3 min	°C	°C	bar	bar	W
6 min	°C	°C	bar	bar	W
9 min	°C	°C	bar	bar	W
12 min	°C	°C	bar	bar	W
	°C Temp.økning	°C Temp.økning	bar Trykkøkning	bar Trykkøkning	W Gjennomsnitt

Beregning av pumpens varmefaktor:

Vi skal nå beregne pumpens varmefaktor:

1. Beregn temperaturøkningen på varm side: _____ °C
Temperaturøkningen er slutt-temperatur minus starttemperatur.
2. Beregn temperaturreduksjon på kald side: _____ °C
Temperaturreduksjon er starttemperatur minus slutt-temperatur.
3. Beregn gjennomsnittlig tilført elektrisk effekt: _____ Watt
Se på effektmålingene og anslå et gjennomsnitt.
4. Måleperiode: _____ sekunder

5. Beregn avgitt termisk energi til varm side:

Spesifikk varmekapasitet for vann er $4.18 \cdot 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \times \text{grad})$

Beregn avgitt termisk energi på varm side =

$4.18 \cdot 10^3 \text{ [J}/(\text{kg} \times \text{grad})]$ x massen til vannet på varm side [kg] x temp. økning varm side [C]=

.....[J/(kg × grad)] x.....[kg] x.....[C] =.....[Joule]

6. Beregn tilført elektrisk energi til kompressoren:

Tilført elektrisk energi [Joule] = Tilført elektrisk effekt [Watt] x Måleperioden [sek] =

.....x.....=.....Joule

Beregn varmfaktoren (V_F) til pumpa som forholdet mellom avgitt energi på varm side og tilført elektrisk energi:

$$V_F = \frac{\text{Avgitt termisk energi til varm side}}{\text{Tilført elektrisk energi}} = \dots\dots\dots$$

Generelle formler:

Elektrisk energi (Joule) = Effekt (Watt) × tid (sekund) [$E_e = P_e \times \Delta T$]

Avgitt termisk energi (J) = $4\,180 \text{ (J/kg} \times \text{grad)} \times \text{temperaturforandring (}^\circ\text{C)} \times \text{vannmengde (kg)}$ [$Q = c \times \Delta t \times m$]

Spesifikk varmekapasitet for vann: $c_0 = 4,18 \times 10^3 \text{ J/K kg}$

Drøft følgende spørsmål:

Hvor kommer den termiske energien (varmen) som avgies til beholderen på varm side fra?

.....
.....
.....

Drøft feilkilder ved målingene.

.....
.....
.....

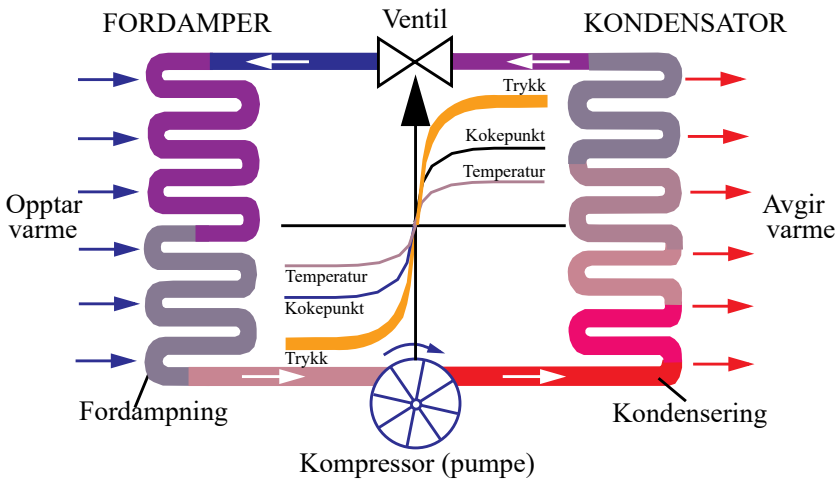


4.5 Oppsummering

I rørene på baksiden av et kjøleskap vil arbeidsmediet kondensere under høyt trykk og avgi varme. I rørene på innsiden av kjøleskapet vil arbeidsmediet fordampe under lavt trykk og oppta varme. På denne måten transporterer arbeidsmediet varme fra innsiden til utsiden av kjøleskapet.

Ønsker vi å varme opp et rom, snur vi varmepumpa. Vi plasserer da fordampere på utsiden (opptar varme) og kondensatoren på innsiden (avgir varme). Dette gjøres normal ved hjelp av ventiler som snur væskestrømmen og hvilken side som har høyt og lavt trykk.

Det geniale ved varmepumpa er altså knyttet til endringer av trykket i arbeidsmediet etter som det passerer gjennom systemet. Figuren under illustrerer hvordan trykket på kondenserings- og fordampningssiden endres, slik at fordampning kan skje ved lave temperaturer og kondensering ved høye temperaturer.



5 Vannkraftverk – Induksjon og måling av virkningsgrad

Når en ser bort fra solceller så er induksjon grunnlaget for all energiproduksjon basert på energibæreren elektrisitet. I dette kapittelet skal vi undersøke hvordan mekanisk energi kan omdannes til elektrisk i et vannkraftverk.

5.1 Mekanisk energi

Før vi ser nærmere på generering av elektrisk energi ved hjelp av induksjon, 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)

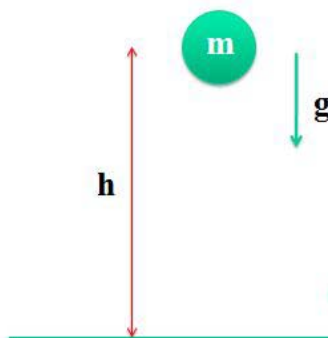
Stillingsenergien til en gjenstand forutsetter at den påvirkes av en kraft. Det vanligste er *tyngdekraften* som trekker gjenstanden til jorden. En stein som ligger på bakken, kan normalt ikke utføre noe arbeid. Vi sier at den har *null stillingsenergi i forhold til bakken* den ligger på. Dersom vi løfter 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)

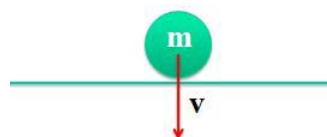
Som stillingsenergi *kan* steinen utføre et arbeid. Den utfører imidlertid ikke noe arbeid før vi ev. skulle finne på å slippe den. Akkurat idet vi slipper, har den ingen fart, dvs. den har fortsatt bare stillingsenergi. Rett før den treffer bakken, så har den stor fart, men ingen høyde. Da er alle stillingsenergien 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,



Figur 5.1 Stillingsenergi
 $= m \cdot g \cdot h$



Figur 5.2 Bevegelsesenergi
 $= 1/2 \cdot m \cdot v^2$



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:

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.

5.2 Fra mekanisk til elektrisk energi

La oss begynne med et innledende eksperiment.

Eksp. 6 Den fallende magneten

Til dette eksperimentet trenger vi en kraftig sylindrisk neodym-magnet og et kobberør (f.eks. Ø 15 mm). Magnetten 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 magnetten gjennom røret og ta tiden det tar for magnetten 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. Magnetten vil bremses opp uten i særlig grad å berøre veggene i røret. Har du flere rør vil du oppdage følgende:

- *Magnetten bremses mer i rør med liten diameter enn med stor*
- *Magnetten bremses mer i kobberør enn i rør av aluminium eller messing*
- *Magnetten 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 rørvæggen opptrer som elektriske virvelstrømmer (eng. “eddy current”). Vi sier at det *induseres* elektrisk strøm i rørvæggen. Siden kobberøret ikke er en ideell elektrisk leder, men har litt motstand, vil strømmen i rørvæggen etterhvert omdannes til varme (termisk energi). Den induserte strømmen vil tappe magnetten for kinetisk energi som dermed bremses opp.

- *En større del av magnetfeltet rundt magnetten vil trenge inn i et trangt rør enn i et vidt rør. Dermed induseres en større strøm og magnetten 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 magnetten bremses mer og dermed vil falle langsommere.*



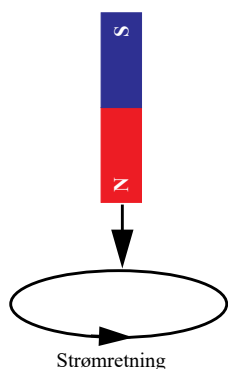
Figur 5.3 Magnet som faller i et kobberør med slisse.

- *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.*

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?

5.3 Induksjon



Figur 5.4 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:

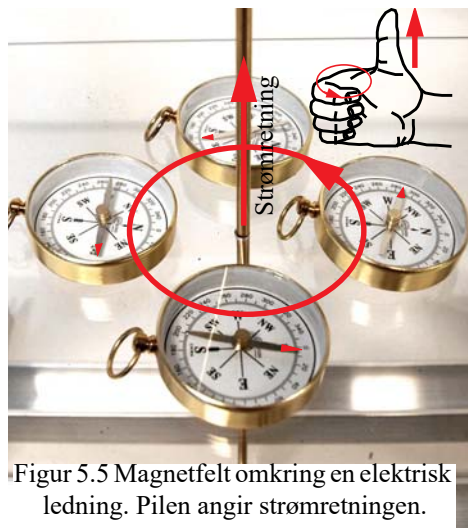
Størrelsen til spenningen som driver strømmen gjennom ringen (den sluttete kretsen), vil være avhengig av hvor fort magnetfeltet som skjærer gjennom ringen, endrer seg (endring pr. tidsenhet (sekund)). En kraftig magnet vil kunne bidra til å gjøre endringen av magnetfeltet større, likeså vil farten magneten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

5.4 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-

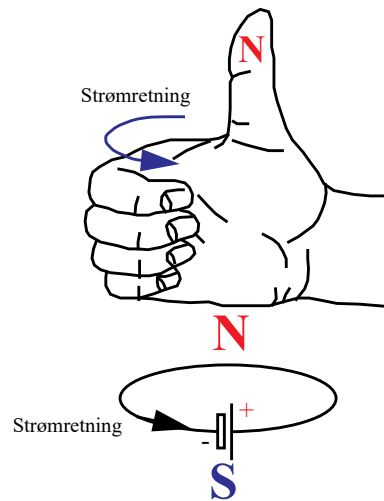


Figur 5.5 Magnetfelt omkring en elektrisk ledning. Pilen angir strømretningen.



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 plassert omkring ledningen, se figur 5.5 på side 88. Vi kan bruke høyrehåndsregelen 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 5.6 Høyrehåndsregelen for å bestemme nordpolen til elektromagneten.

Dersom vi lager en sløyfe av ledningen vil vi få en “spole” med én vikling (figur 5.6). 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 høyrehåndsregelen for å bestemme elektromagnetens nord- og sørpol. Vi kan formulere høyrehåndsregelen slik:

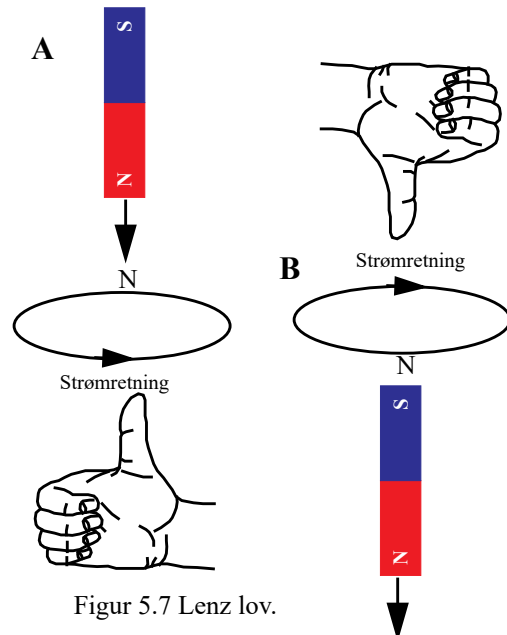
Høyrehåndsregelen:

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.

5.5 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 høyrehåndsregelen for å bestemme strømretningen i en ledningssløyfe som påvirkes av en magnet som føres gjennom ledningssløyfa (“spolen”).



Figur 5.7 Lenz lov.

Figur 5.7 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 5.7). 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 kobberøret 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.

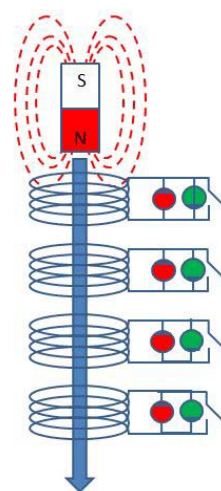
Figur 5.8 viser fire spoler som hver er koblet til to lysdioder og en bryter. Lysdiodene (en grønn og en rød) er koblet motsatt vei. Dersom vi slipper magneten gjennom spolene, vil det, når magneten går inn i en spole, oppstå en strøm den ene veien i spolen og den grønne lysdioden lyser. Når magneten 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.

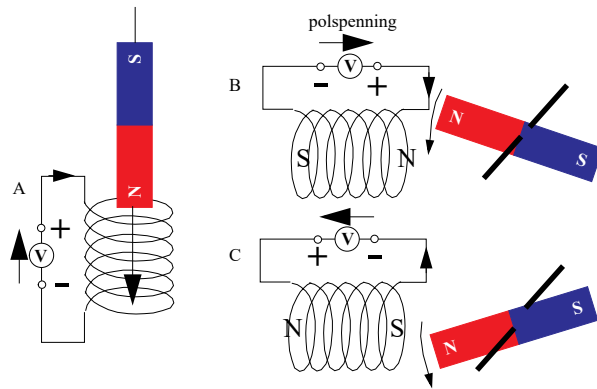


Figur 5.8 Magnet som slippes gjennom spoler



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 spolen.

Vikler vi opp en ledning slik at vi får en spole og fører en magnet raskt forbi den som vist på figur 5.9, 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 5.9 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 5.9 Magnetten setter elektronene i bevegelse og det skapes en spenning over spolens tilkoblingspunkter.

Når magneten nærmer seg spolen (figur 5.9 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 5.9 C). På den måten får vi en spenning over spolens tilkoblingspunkter som veksler mellom å være positiv og negativ. *Vi har fått en elektrisk vekselspenning.*

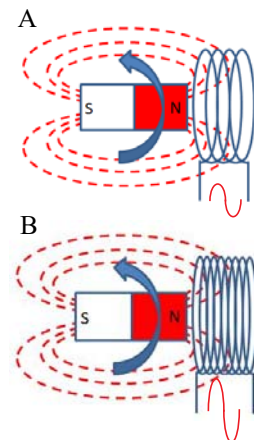
5.6 Antall viklinger

For en ideell generator vil antall viklinger til spolen bestemme størrelsen til spenningen over klemmene (figur 5.10). Dobbelt så mange viklinger gir ideelt sett dobbelt så høy spenning (figur 5.10 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.

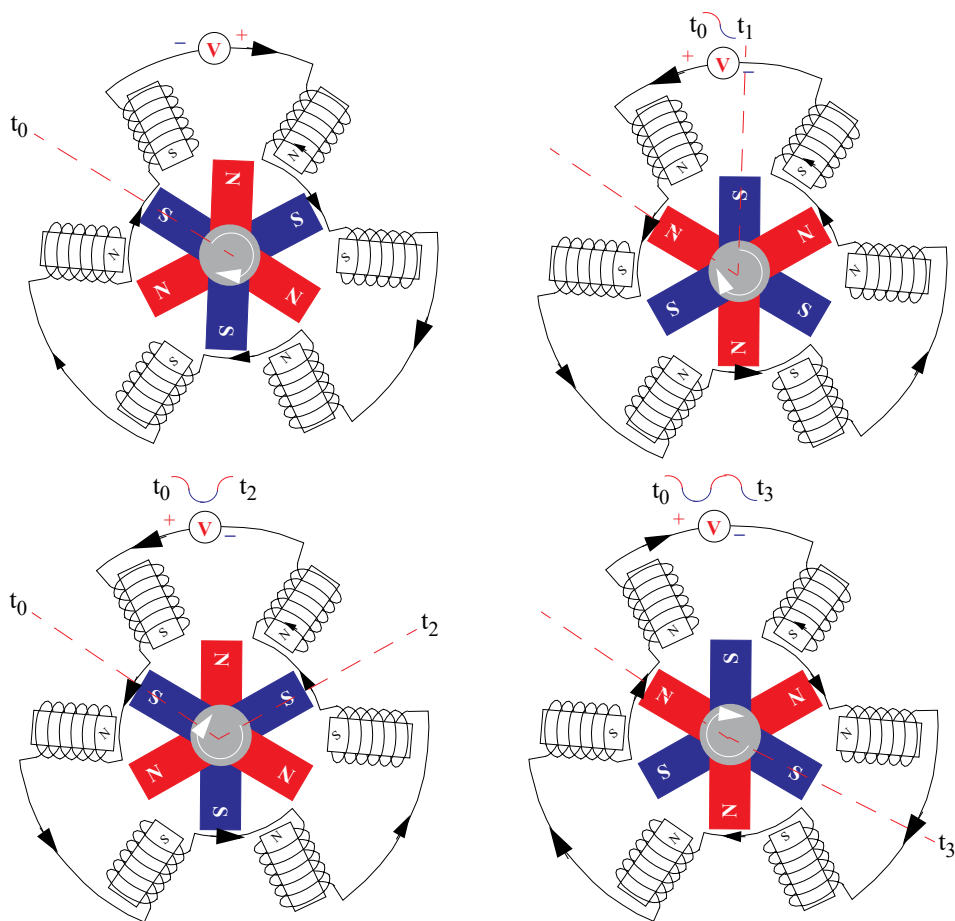
5.7 Generatoren

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



Figur 5.10 Antall viklinger bestemmer størrelsen på spenningen

I prinsippet er en generator bygget opp som vist på figur 5.10. Som oftest er flere spoler koblet i serie eller i parallell som vist på figur 5.11, bare med den forskjellen at det er flere magneter og flere spoler som vist på figur 5.11.



Figur 5.11 Prinsippskisse 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 5.11 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.

5.8 Byggeprosjekter - generator

I de to påfølgende eksperimentene skal vi se hvordan vi kan lage fungerende generatorer. Begge kan i prinsippet lages sammen med elever, men den første er kanskje den som lettes lar seg realisere i klasserommet med relativt enkle midler.

5.8.1 Bygg en sykkel-dynamo

Eksperiment: 7 Lag en enkel sykkel-dynamo med blinkende baklys

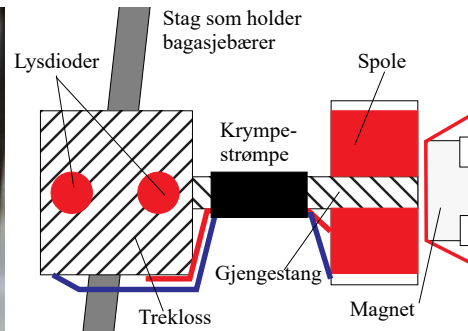
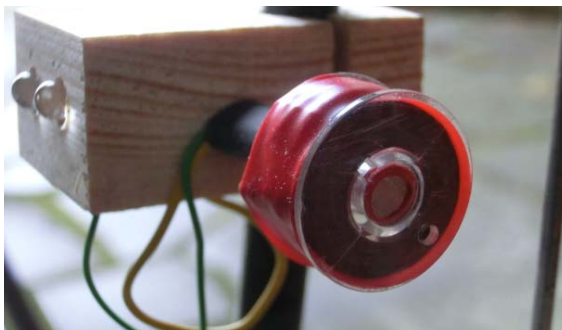
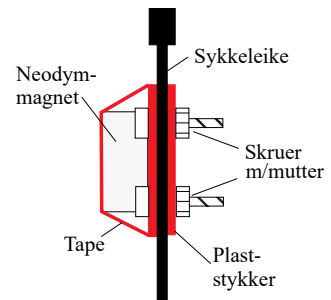


Figur 5.12 En sylindrisk neodymmagnet er festet til to plater av plast som klemmes fast mellom eikene.

I dette eksperimentet skal vi beskrive en enkel hjemmelaget sykkel-dynamo 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 5.13 Montasje av neodymmagnet.

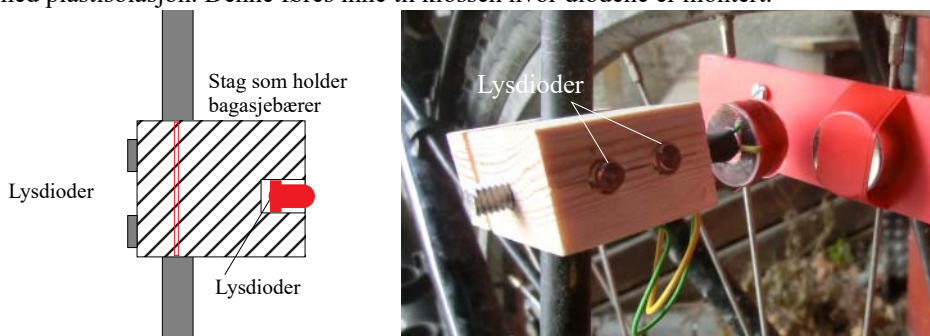


Figur 5.14 Spolen er festet til en gjengestang som er skrudd inn i holderen for lysdiodene, og som er festet til ett av stagene som holder bagasjebæreren.

En krympestrømpe er tredd inn på gjengestangen og ledningene, slik at ledningene festes til gjengestangen.

Avstanden mellom magnet og spole gjøres så liten som man tør f.eks. 1 mm. Her må man sørge for at spolen ikke slår bort magneten når hjulet roterer. 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 elektriktape.

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



Figur 5.15 Montering av lysdioder og fest til stag som holder bagasjebærer.

For montering av lysdiodene bores to “brønner” for diodene med diameter 6 mm rett inn fra siden i klossen. La hullet være litt grunnere en lysdioden. Derneft 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 5.16 Klossen festes til staget som holder bagasjebrettet.

I det neste eksperimentet skal vi lage en mer effektiv generator, en håndgenerator.



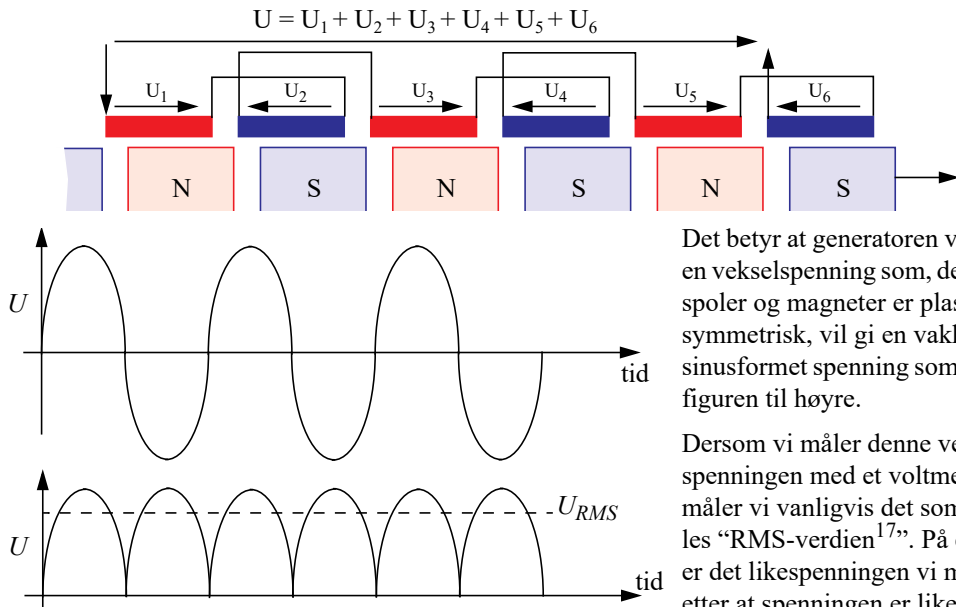
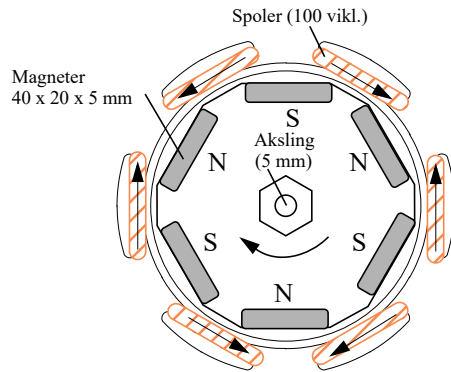
5.8.2 Bygg en håndgenerator

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

Eksperiment: 8 Lag en håndgenerator

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 vekselspenningen med et voltmeter, måler vi vanligvis det som kalles "RMS-verdien¹⁷". 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 (stiplet linje).

17.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).

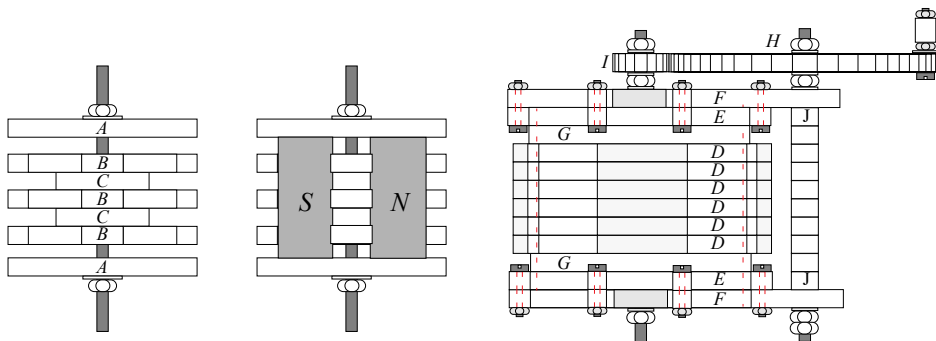
Konstruksjon

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



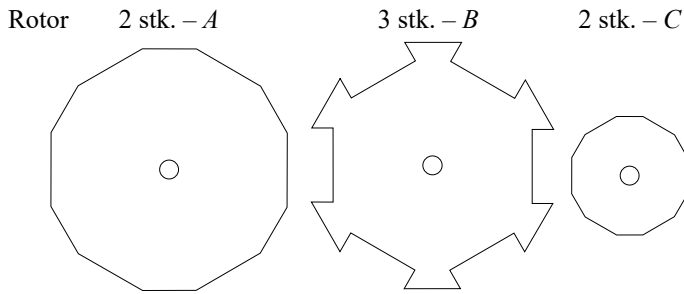
Figuren over viser delene som skal til for å lage generatoren. Ser en svært godt etter vil en også se at det finnes et ekstra sett topp- og bunnplater skåret i akryl slik at det skal være mulig å se hva som foregår inne i generatoren når den roterer.

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

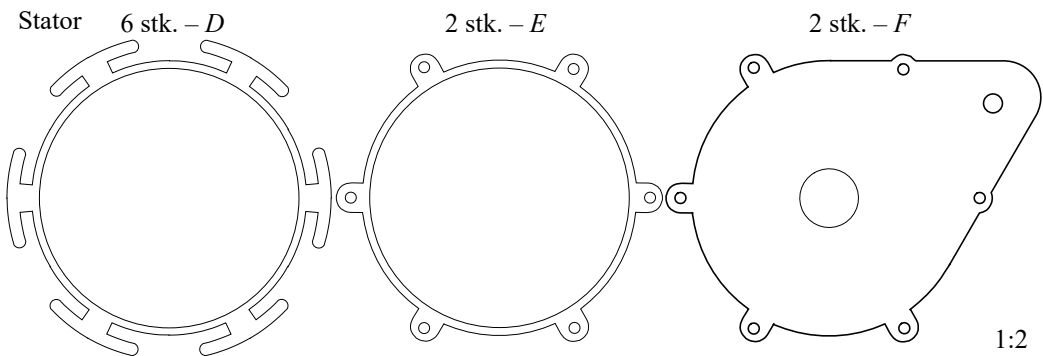




Figuren under viser omrisset av de enkelte delene som rotoren er satt sammen av, sett ovenfra.

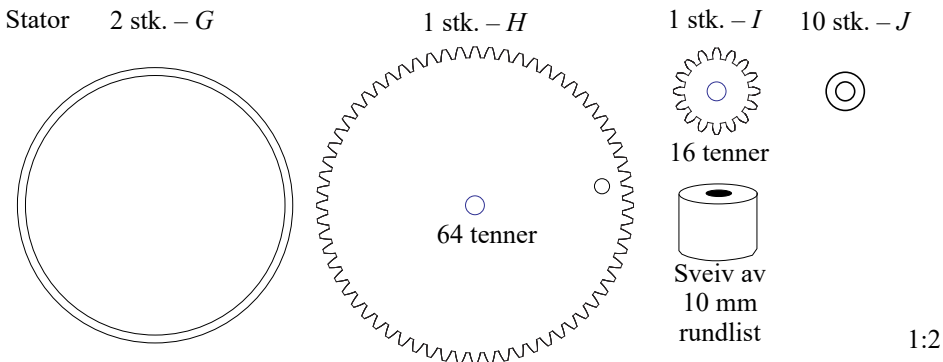


Figuren under viser tilsvarende deler for statoren, også sett ovenfra.



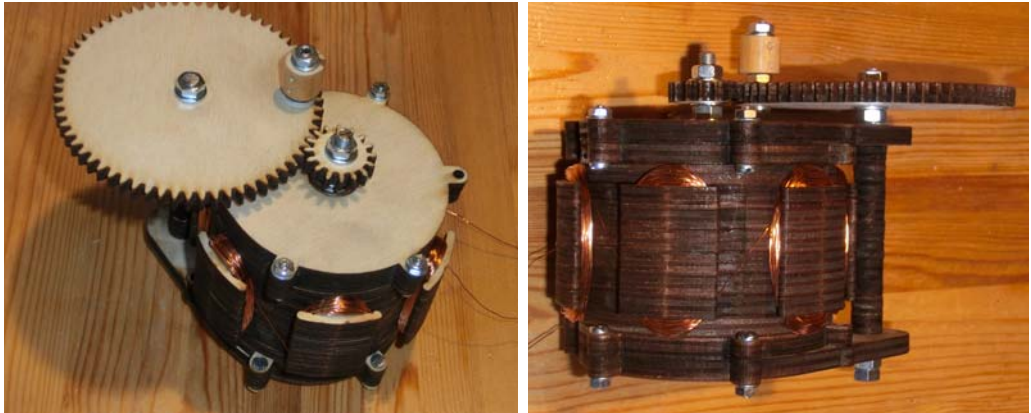
De enkelte delene er merket med bokstaver som man også finner igjen på profiltegningene av rotor og stator over.

Figuren under viser resten av delene til statoren inkludert tannhjulene til håndsveiva som har en utveksling på 1 : 4.



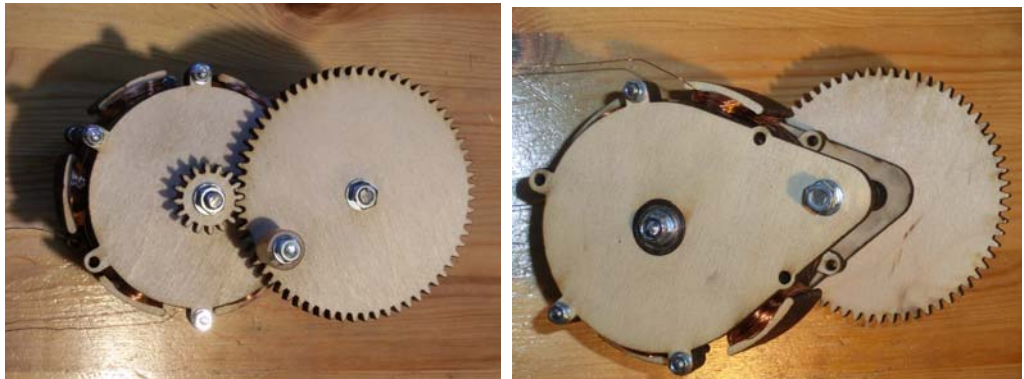
Akslingene er laget av 5 mm gjengestang som er kappet i hensiktsmessige lengder og giret har en utveksling på 1:4. Rotoren er montert i lag *F* med kulelager med dimensjoner: 16 x 5 x 5 mm (ytre diameter, indre diameter og tykkelse). Tannhjulene er laget med programmet GearDXF og har

parametrene: Stort tannhjul T64 DP20 BHD5,0 OD8,382 BD7,638 RD7,81 og lite tannhjul T16 DP20 BHD5,0 OD2,286 BD1,909 RD1,714¹⁸.



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

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). Ev. ta kontakt for å skjæremaler for laserkutteren.

5.9 Turbinen¹⁹

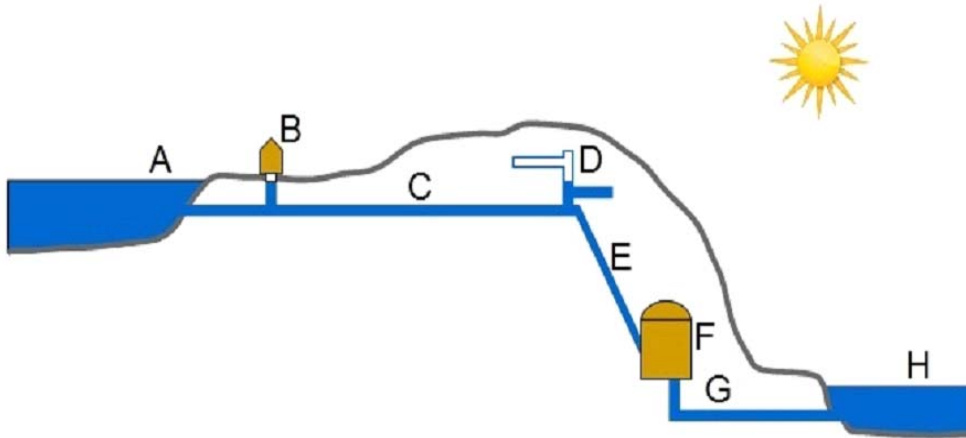
Nå har vi sett hvordan man kan få elektrisk energi ved hjelp av roterende magneter, en generator. I en generator sitter det i prinsippet magneter i den ene enden av en aksling, mens noe i den andre enden må sørge for at akslingen og magnetene roterer. Men hva er det som skal sørge for energien som kreves for at magneten skal rotere? Det er her den andre viktige roterende delen av et vannenergiverk sitter, nemlig turbinen med dens såkalte løpehjul. Dette skal vi komme tilbake til.

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

19. Dette avsnittet er forfattet av Pål-Tore Selbo Storli ved Hydrdynamiske laboratorier ved NTNU



Energien som utnyttes i et vannenergiverk kommer fra solen. Solen får vannets kretsløp til å gå rundt, og det er når vannet trekkes ned mot havet av tyngdekraften at vi henter ut energien. Energien til vannet er i utgangspunktet stillingsenergi i form av at vannet befinner seg høyere opp i terrenget enn der kraftverket befinner seg. Gjennom tunneler og rør trekker tyngdekraften vannet nedover til turbinen. På vei dit blir stillingsenergien omdannet til trykk- og hastighetsenergi. Når vannet så går gjennom turbinen er det trykk- og hastighetsenergien man utnytter for å produsere elektrisk energi. Etter å ha passert gjennom turbinen strømmer vannet videre ut til det nedre reservoaret, elven, sjøen eller hva det er som mottar vannet til slutt. Dette kan man se i figur 5.17 (G og H), der vannet strømmer fra venstre mot høyre.

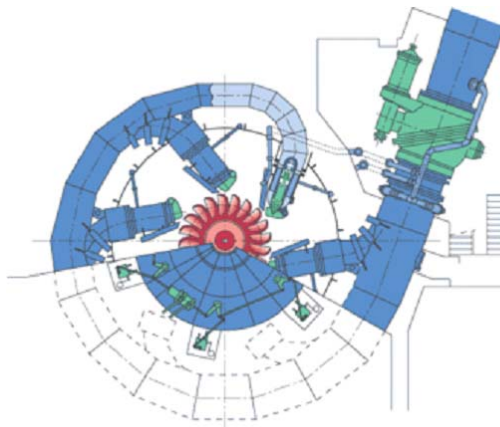


Figur 5.17 Skjematisk fremstilling av et kraftverk, delene C til G befinner seg inne i fjell i moderne kraftverk (Kilde: Wikipedia)

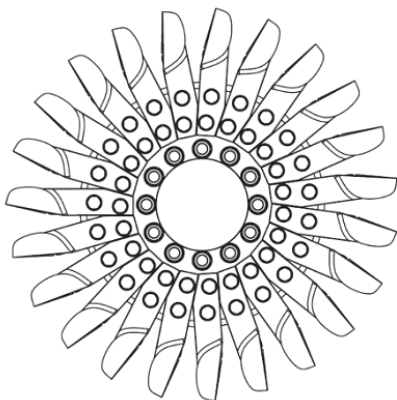
I figur 5.17 er:

- A. Det øvre reservoaret, der vannet er lagret til vi har bruk for å lage elektrisk energi.
- B. Lukehus som inneholder en luke som gjør at man kan stenge for vannstrømmen hvis man ønsker det, i forbindelse med reparasjoner og slikt
- C. Tilløpstunnel, veien som vannet tar mot kraftstasjonen
- D. Svingsjakt, en innretning som gjør at kraftverket kan reguleres bedre
- E. Trykksjakt, her går vannet ned mot kraftverket og stillingsenergi blir til trykkenergi
- F. Selve kraftstasjonen. Her inne befinner turbinen og generatoren seg
- G. Avløpstunnel, veien som vannet tar etter å ha passert gjennom kraftstasjonen
- H. Nedre reservoar, elven, sjøen eller innsjøen som er der vannet ender opp etter å ha gått gjennom kraftverket

Vann fra høyt oppe i terrenget trekkes av tyngdekraften gjennom tunneler og rør (C og E i figur 5.17) ned mot kraftstasjonen (F i figur 5.17). Figur 5.18 viser deler av innsiden av kraftstasjonen, hvor vannet kommer ned det store røret oppe til høyre. Det er altså inne i kraftstasjonen at vi henter energien ut fra vannet, og denne energien hentes ut ved hjelp av en turbin. Det finnes flere forskjellige type turbiner som er egnet til forskjellige typer kraftverk. De mest vanlige er Kaplan-, Francis- og Pelton-turbinen. Vi skal se litt nærmere på Pelton-turbinen, som er turbintypen på figur 5.18.



Figur 5.18 Tegning av en Pelton-turbin (Voith Siemens Hydro Power Generation)

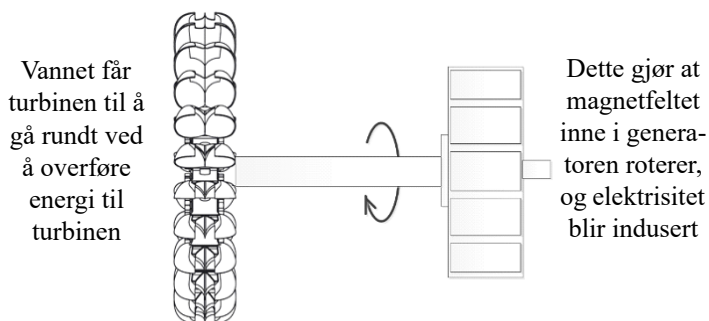


Figur 5.19 Pelton-turbin

Pelton-turbinen er i sin enkleste form en plate som har skje-formede skovler montert jevnt rundt på platen, se figur 5.19. De store turbinene er litt mer avansert enn som så, og de skjeformede skovlene har en egg som deler strålen i to på en kontrollert måte. Denne kan sees på figur 5.20, som er den samme Pelton-turbinen som i figur 5.19, bare sett fra siden (Sett fra venstre mot høyre i figur 5.19).

I en Pelton-turbin øker hastigheten til vannet gjennom dyser, og kommer ut av dysene som vannstråler med stor hastighet. Antallet dyser varierer med størrelsen til Pelton-turbinen. I figur 5.18 fordeles vannet på seks dyser. Alle disse dysene spruter vann inn på Pelton-turbinen som gjenkjennes i midten av tegningen.

Den store hastigheten til vannet ut fra dysene representerer stor bevegelsesenergi som vi kan nyttiggjøre oss ut i turbinen. Når vannet treffer skovlene på Pelton-turbinen bremses vannet ned, og bevegelsesenergien blir omdannet til mekanisk roterende energi siden vannet får turbinen til å rotere. Siden turbinen



Figur 5.20 En turbin (til venstre) koblet sammen med rotoren til en generator (til høyre) via en aksling.



er koblet til en aksling som i andre enden er koblet til et magnetfelt, vil magnetfeltet inne i generatoren rotere når turbinen roterer, og man får induisert elektrisk energi i generatoren.

Virkningsgraden til turbin og generator er et mål på hvor bra en turbin og generator klarer å omforme energien i vannet til elektrisk energi. Virkningsgraden er en kjempeviktig egenskap ved vannkraftverk, fordi den forteller hvor mye energi i form av salgbar elektrisitet man får produsert av den, tross alt, begrensede lagrede energien man har tilgjengelig oppe i reservoaret.

Typisk virkningsgrad for en stor turbin er mellom 92–95%, så kommer virkningsgraden for tunnelsystem og generator i tillegg dersom man ønsker den totale virkningsgraden for hele kraftverket. Disse to er typisk 95% hver, slik at den totale virkningsgraden blir på ca. 85%.

For å øke virkningsgraden ytterligere må man redusere friksjonstapene. Dette betyr å redusere vannhastigheten, som i sin tur betyr å øke dimensjonene på alle vannfylte deler av kraftverket. Dette blir veldig dyrt, og man vil ikke få igjen nok energi til å betale for ekstrakostnaden med de økte dimensjonene.

Disse tallene angir det som kalles *toppvirkningsgraden*, dvs. maksimal virkningsgrad under optimale forhold. Denne virkningsgraden faller dersom kraftverket f.eks. kjøres med redusert kapasitet. I dag er det ikke vanlig å forsøke å heve toppvirkningsgraden, men heller øke driftsikkerhet og levetid for anleggene.

5.10 Måling av virkningsgraden i et enkelt vannkraftverk

Avsnittet beskriver laboratorieoppgaven som brukes under Energiløypa som er beregnet på elever på VG1. Målsetningen med oppgaven er å forstå hvordan man kan måle virkningsgraden til et enkelt vannkraftverk. En enklere versjon som kan realiseres i klasserommet eller i laboratoriet ved egen skole er beskrevet i vedlegg A.

Innledningsvis beskrives teorien for målingen dernest målerapporten, eller elevarket.

5.10.1 Bakgrunn

Hensikten med denne laboratorieoppgaven er å gi elevene innsikt i hvordan et mini vannkraftverk fungerer, med høydebasseng med ventil, turbin, generator og belastning. Videre forstå hva anleggets virkningsgrad er og kjenne til noen av de faktorene som påvirker virkningsgraden.

Opplegget som er skissert under er hentet fra laboratorieøving TEP4225 – Energi og miljø – “Vannkraft”, NTNU. En forenklet utgave presenteres for elevene som gjennomfører Energiløypa.

Læringsmål:

- Lære hvordan virkningsgraden for et turbin/generatorsett kan bestemmes ved eksperimenter
- Lære at virkningsgraden for en vannturbin (Pelton-turbin) avhenger av turtallet (omdreiningshastigheten)

- c. Lære hvordan strøm og spenning måles for en likestrømsgenerator
- d. Lære hvordan virkningsgraden for et turbin/generatorsett varierer med turtall (omdreiningshastigheten)

Innledning

I dette laboratorieforsøket skal vi måle virkningsgraden for et turbin/generatorsett bestående av en liten Pelton-turbin og en DC-generator.

Virkningsgrad:

Vi kan tenke oss å måle virkningsgraden for ulike deler av “vannkraftverket”:

- Turbin eller generator hver for seg
- Kombinasjonen av turbin og generator
- Hele systemet fra høydebassenget og helt fram til belastningsmotstanden (lasten).

Vi velger å måle virkningsgraden, η , fra høydebassenget og helt fram til lasten.

For å få til det må vi måle effekt avgitt til lasten, P_{avgitt} og effekt tilført av vannet fra høydebassenget, $P_{tilført}$:

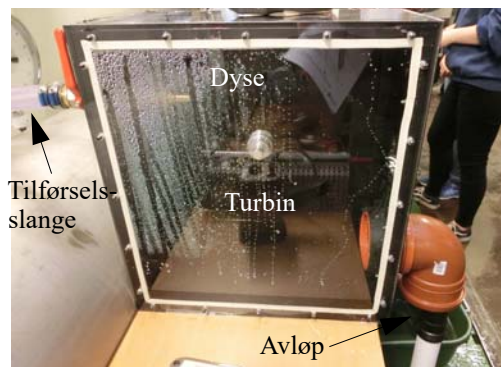
$$\eta = \frac{P_{avgitt}}{P_{tilført}} \quad (5.1)$$

Vi ønsker å gjøre ytelsen størst mulig ved å variere noen parametere. Her er det flere parametere som i prinsippet kan endres:

- Fallhøyde
- Dyseåpning (ventil)
- Rotasjonshastighet
- Belastning

Vi antar at egenskapene til turbinen og generatoren er gitt. Videre antar vi at fallhøyden er gitt og egenskapene (diameter og friksjon) til “trykksjakta”, som er et plastrør. Siden kuleventilen på inntaket vanskelig lar seg bruke for kontrollert endring av pådraget, bruker vi kun denne for å åpne eller lukke for vannstrømmen.

Da står vi igjen med optimalisering av lastmotstanden. En varierende lastmotstand vil endre den mekaniske belastningen på turbinen. Ved å trekke mer effekt ut av generatoren, vil det bli tyngre for turbinen å dra generatoren, noe som medfører at rotasjonshastigheten reduseres. Rotasjonshastighet og belastning er derfor to parametere som henger sammen.





Turbinen

Pelton-turbinen er godt egnet for å hente energien ut av vannfall med stor fallhøyde og begrenset vannføring. Turbinen består av et *løpehjul* som roterer i luft og en dyse som leverer en vannstrøm med stor fart mot løpehjulet. Denne turbintypen er en såkalt *impulsturbin*, som innebærer at hele trykket fra fallhøyden (trykkhøyden), omformes til hastighet på vannet ut av dysa.

En turbin er i prinsippet en innretning som omdanner effekten i vanntrykket (hydraulisk effekt), $P_{\text{tilført}}$, til mekanisk roterende effekt, $P_{\text{avgitt mek}}$.

Det er viktig å knytte undervisningen opp til ting som er kjente for elevene. Formelen for (relativ) stillingsenergi til en masse burde være kjent, ev. at en kan argumenter for at den er rimelig:

$$\text{Stillingsenergi } (E) = \text{Massen } (m) \times \text{Tyngeakselerasjonen } (g) \times \text{Høyden } (h) \quad (5.2)$$

Vi vet at:

$$\text{Effekt } (P) = \text{Energi } (E) / \text{Tid}(t) \quad (5.3)$$

Dvs. at effekt er energi pr tidsenhet, dvs. pr sekund.

Her ønsker vi å regne med energi pr. sekund, altså effekt da dette er enklere. I vårt tilfelle er det vannet i høydebassenget som er massen som utgjør stillingsenergien og høyden leser vi av på manometeret. Denne betegnes som meter vannsøyle eller mVs.

$$\text{Effekt } (P_{\text{tilført}}) = \text{Massen } (m) \cdot \text{Tyngeakselerasjonen } (g) \cdot \text{Høyden } (h) / \text{Tid} \quad (5.4)$$

Vi vet at

$$\text{Massen til vannet } (m) = \text{Tettheten til vannet } (\rho) \cdot \text{Volumet til vannet } (V) \quad (5.5)$$

Setter vi ligning 5.5 inn de i ligning 5.4 får vi:

$$\begin{aligned} \text{Effekt } (P_{\text{tilført}}) = \\ \text{Tetthet vann } (\rho) \cdot \text{tyngeakselerasjonen } (g) \cdot \text{Høyden } (h) \cdot \text{volum vann } (V) / \text{Tid} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Her ser vi at

$$\text{Vannstrømmingen } (Q) = \text{Volum vann } (V) / \text{Tid} \quad (5.7)$$

som måles med ei bøtte på 20 liter. Videre måler vi trykket i ekvivalent vannsøyle høyde (h), som dermed måles i mVs (meter vannsøyle) med manometeret.

Setter vi ligning 5.7 inn i ligning 5.6 får vi:

$$\begin{aligned} \text{Effekt } (P_{\text{tilført}}) = \\ \text{Tetthet vann } (\rho) \cdot \text{tyngeakselerasjonen } (g) \cdot \text{Høyden } (h) \cdot \text{Vannstrømmingen } (Q) \end{aligned} \quad (5.8)$$

Som forenkelt kan skrives:

$$P_{\text{tilført}} = \rho \cdot g \cdot h \cdot Q \quad (5.9)$$

Hvor:

- ρ Tettheten til vann er lik 1000 kg/m^3
- g Tyngdeakselerasjonen lik $9,81 \text{ m/s}^2$
- h Trykket på inngangen av ventilen måles i mVs (meter vannsøyle) og avleses på manometer
- Q Volumstrøm av vann måles m^3/s , og bestemmes ved å måle tida det tar å fylle en bøtte.

Løpehjulet er utformet slik at vannstrålen som treffer vil avbøyes nær 180° . Dette gir reaksjonskrefter og et roterende moment på løpehjulet, som igjen driver generatoren. Den avgitte mekaniske rotasjonseffekten kan beregnes ut fra følgende ligning:

$$P_{\text{avgitt mek}} = \omega \cdot M \quad (5.10)$$

Hvor:

- ω Rotasjonshastighet på turbin måles i radianer/s
- M Dreiemoment som måles i N m

Siden vi ønsker å måle avgitt effekt til belastningen etter generatoren, så kan vi i denne omgang overse avgitt mekanisk effekt. Vi velger heller å måle levert elektrisk effekt til lasten og betrakter hele anlegget samlet.

Det kan vises at den optimale virkningsgraden til turbinen oppnås når hastigheten langs ytterkant av løpehjulet er halvparten av hastigheten til vannstrålen.

Det kan derfor være av interesse å finne hastigheten til vannet, c , når det kommer ut av dysa før det treffer turbinbladene og sammenligne denne med hastigheten til skovle. Denne kan enklest beregnes dersom man kjenner vanntrykket på inngangen av dysa. I følge Toricelli kan vannhastigheten beregnes ut fra følgende ligning:

$$v_v = \sqrt{2g\Delta H} \quad (5.11)$$

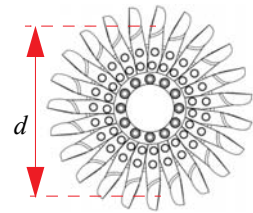
Hvor:

- v_v Vannhastighet ut av dyseåpningen
- g Tyngdeakselerasjonen lik $9,81 \text{ m/s}^2$
- ΔH Trykket på inngangen av ventilen måles i mVs (meter vannsøyle)



Hastigheten til skovlene beregnes ved at man måler diameteren til turbinen der vannet treffer og måler rotasjonshastigheten til akslingen inn på generatoren med en turtallsmåler.

$$v_s = d \times 3,14 \times \text{RPM} / 60 = \text{_____} \text{ m/sek} \quad (5.12)$$

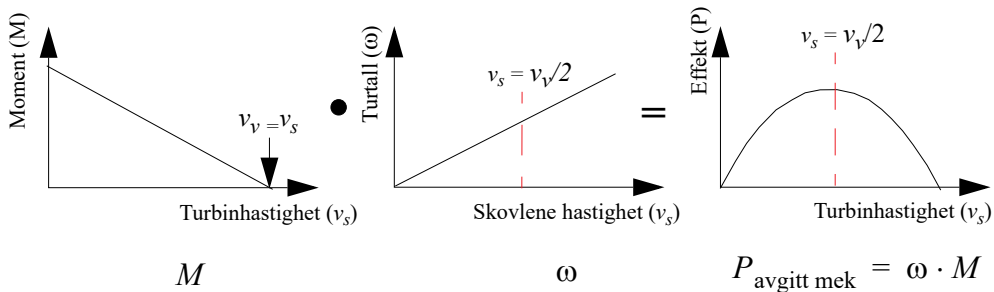


Hvor:

- v_s Skovlenes hastighet i m/s
- d Diameteren til turbinen er målt til _____ m
- RPM Turtallet pr minutt er målt til _____ rpm

At virkningsgraden blir høyest mulig når hastigheten til turbinbladene er halvparten av hastigheten til vannstrålen kan sannsynliggjøres slik:

Momentet på turbinskovlene har sin maksimalverdi når skovlene står i ro. Etter som skovlene begynner å rotere, vil momentet avta lineært til det er null når skovlenes hastighet er lik vannhastigheten (v_v). Turbinens avgitte mekaniske effekt er gitt av produktet mellom momentet og turtallet (ω) som vil ha sin maksimalverdi når hastigheten til skovlene er halvparten av vannhastigheten ($v_s = v_v/2$), som vist på figuren under.

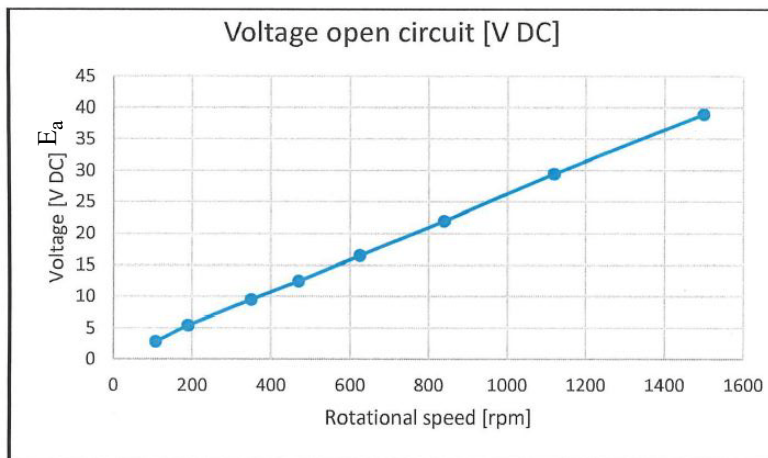


Generatoren

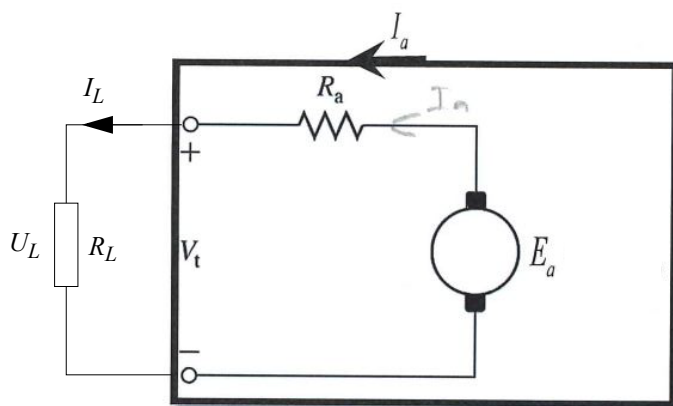
Generatoren i dette forsøket er en likestrømsgenerator med permanente magneter. Permanentmagnetene er montert på den stasjonære delen av generatoren (statoren – generatorhus). I spor på rotoren er det montert et antall *spoler*. Når rotoren dreies rundt av turbinen, omdannes mekanisk rotasjonsenergi til elektrisk energi i spole på rotoren. Den elektriske energien “hentes” ut fra spole på rotoren i form av likespenning og likestrøm via de to ledningene som er ført ut på siden av generatorhuset. Rød tilkobling er positiv spenning, svart er negativ.



Målinger på generatoren viser at det er en lineær sammenheng mellom den ubelastede spenningen ut av generatoren (*tomgangsspenningen*) og rotasjonshastigheten i det aktuelle turtallsområdet. Denne sammenhengen er vist på figuren under.



Det vil alltid være litt motstand i viklingene i generatoren. Denne motstanden kan vi kalle generatorens *indre motstand*, R_a . Dessuten vil vi gjerne belaste generatoren med en ytre motstand, lastmotstand (eller bare last) som er motstanden i det apparatet der vi ønsker å utnytte den leverte effekten. Det kan være belysning, motorer eller apparater for oppvarming o.l. I vårt tilfelle er det en stor variabel motstand der den leverte effekten blir til varme (til venstre på figuren under).



Elektrisk effekt:

Den elektrisk effekten levert til lasten, er lik spenningen over lasten multiplisert med strømmen i lasten:

$$P_{\text{avgitt elektrisk}} = U_L \cdot I_L \quad (5.13)$$



Hvor:

I_L	Strømmen i lasten
U_L	Spenningen over lasten
R_L	Lastmotstanden
$P_{avgitt\ elektrisk}$	Avgitt elektrisk effekt til lasten

Virkningsgraden for turbin og generator med last

Virkningsgraden for turbin, generator og leveransen til lasten blir:

$$\eta = \frac{P_{avgitt\ elektrisk}}{P_{tilført}} \quad (5.14)$$

Hvor:

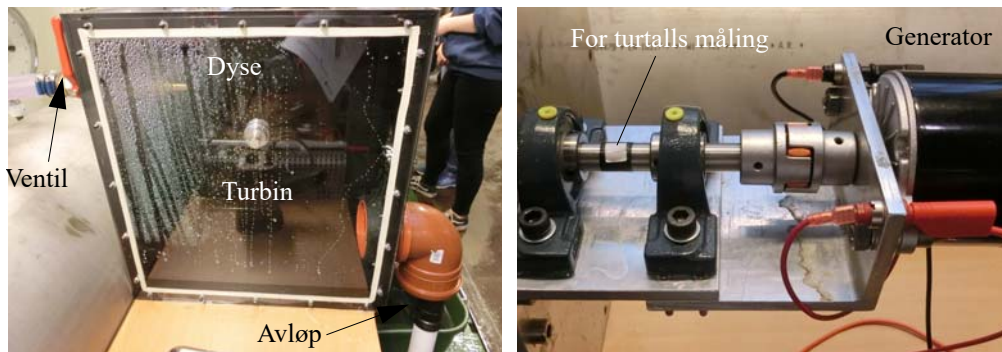
η	Virkningsgraden
$P_{avgitt\ elektrisk}$	Avgitt effekt til belastningsmotstanden
$P_{tilført}$	Tilført effekt fra høydebassenget

5.10.2 Måling av virkningsgrad

Vi skal nå måle virkningsgraden til en kombinert turbin og generator med en belastningsmotstand.

Måleoppstilling:

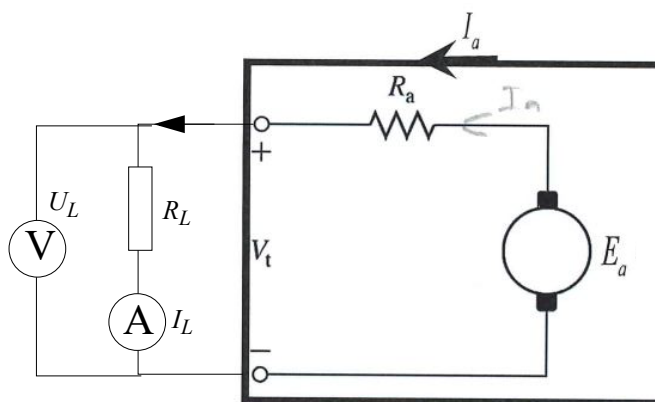
I denne måleoppstillingen har vi et *høydebasseng* med vann opp under taket som fylles automatisk. Vanner renner ned gjennom en *slange* og ender opp i en *ventil* med et rødt håndtak ved inntaket til *turbinen*. Ventilen åpner når håndtaket er horisontalt.



Inne i kammeret er *Pelton-turbinen* *montert*. Når ventilen åpnes, *slippes* vannet gjennom dysen og inn på *skovlene* til turbinen. Turbinen drives rundt av vannstrålen som treffer skovlene.

Turbinakslingen kommer ut på siden av kammeret og er koblet sammen med akslingen til *generatoren*. Generatoren består av en roterende del med spoler (rotor) omgitt av permanente magneter (stator) som omtalt foran. Når spolene beveger seg forbi magnetene, *induseres* det en elektrisk spenning i spolene, slik at det begynner å gå en strøm når den kobles til belastningsmotstanden. Til venstre på akslingen er det festet en liten reflekterende lapp, denne brukes for turtallsmålinger.

Effekten som leveres til belastningsmotstanden kan bestemmes ved å måle strømmen gjennom lasten og spenningen over den. Effekten er produktet av strøm og spenning.



Virkningsgrad:

Virkningsgraden er definert som:

$$\eta = \frac{P_{\text{avgitt elektrisk}}}{P_{\text{tilført}}} \quad (5.15)$$

Hvor:

η	Virkningsgrad
$P_{\text{avgitt elektrisk}}$	Avgitt elektrisk effekt til lasten
$P_{\text{tilført}}$	Tilført effekt fra høydebassenget

Beregning av avgitt elektrisk effekt:

Avgitt elektrisk effekt er:

$$P_{\text{avgitt elektrisk}} = U_L \cdot I_L \quad (5.16)$$





Hvor:

I_L	Strømmen i lasten
U_L	Spenningen over lasten
$P_{avgitt\ elektrisk}$	Avgitt elektrisk effekt til lasten

Beregning tilført effekt fra vannstrømmen:

Tilført effekt fra vannstrømmen til turbinen er:

$$P_{tilført} = \rho \cdot g \cdot \Delta H \cdot Q \quad (5.17)$$

Hvor:

ρ	Tettheten til vann er lik 1000 kg/m ³
g	Tyngdeakselerasjonen lik 9,81 m/s ²
ΔH	Trykket på inngangen av ventilen måles i mVs (meter vannsøyle)
Q	Volumstrøm av vann, m ³ /s

Et manometer plassert bak turbinen måler vanntrykket fra høydebassenget.

Effekt og energi

Effekt er lik energi/sek.

$$\text{Energi [Joule]} = \text{Effekt [Watt]} \cdot \text{Tid [sek]} \quad (5.18)$$

Virkningsgraden sier noe om hvor mye av energien som blir tilført turbinen som ender opp med å bli levert til belastningsmotstanden. Dersom all tilført energi kommer fram til lasten er virkningsgraden lik 1 (100%). Normalt er ikke det tilfelle, dermed vil virkningsgraden alltid være < 1.

Belastning

Belastningsmotstanden kan varieres med en glider på toppen (to hvite knapper).

Liten motstandsverdi hos lasten gir høy belastning slik at turbinen arbeider tyngre (lavere hastighet). Høy motstandsverdi gir lav belastning og turbinen arbeider lettere (høyere hastighet).

5.11 Elevark – Vannkraftverk

Elevarket er ment å være en støtte for elevene når de arbeider med laboratorieoppgaven.

Utstyr:

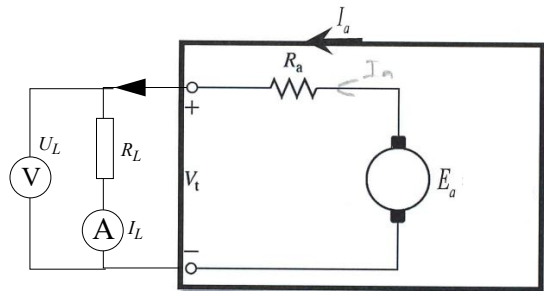
- Peltonturbin med generator i hus
- Et plastbøtte, 20 L
- Et høydebasseng

- Slange med ventil
- Multimeter for måling av strøm
- Multimeter for måling av spenning
- Variabel belastningsmotstand
- Lab. kabler
- Turtallsmåler

Forslag til arbeidsdeling:

Den som ...

- ... leder oppdraget
- ... passer multimeterne
- ... sørger for å måle turtallet
- ... sørger for å måle vannstrømmen
- ... fører resultatene inn i loggen



Oppdraget:

Hensikten er å **måle virkningsgraden** til vannkraftverket fra høydebassenget og til belastningen: Hvor stor andel av stillingsenergien til vannet i bassenget får vi ut som elektrisk effekt i prosent?

Dere skal:

- ... **måle** vanntrykket på inngangen av ventilen (manometeret)
- ... **måle** volumstrømmen av vann (bøtte og stoppeklokke)
- ... **beregne** levert effekt til turbinen
- ... **måle** strøm, spenning og turtall for fem ulike verdier av lastmotstanden, før inn tabellen
- ... **beregne** levert elektrisk effekt og føre verdier inn i tabellen
- ... **beregne** virkningsgraden for hver måleserie
- ... **bestemme** optimalt turtall der levert effekt er størst
- ... **sammenligne** vannhastighet og turbinhastighet



Framgangsmåte:

a. Utstyret

Gjør dere kjent med utstyret og måleoppstillingen og start opp forsøket

- Slå på de to multimeterne for måling av strøm og spenning (likestrøm og likespenning).
- Juster belastningsmotstanden til høyest mulig verdi.



b. Tilført effekt til turbinen

Mål og beregn tilført effekt til turbinen.

Det er vannets stillingsenergi som utnyttes i denne oppgaven:

$$\text{Stillingsenergi } (E) = \text{Massen til vannet } (m) \cdot \text{Tyngeakselerasjonen } (g) \cdot \text{Høyden til bassenget } (h)$$

Her ønsker vi å regne med energi pr. sekund, dvs effekt, da det er enklere. Vi kan da skrive at effekten til vannet som treffer skovlene er:

$$\text{Effekt } (P) = \text{massen } (m) \times \text{tyngeakselerasjonen } (g) \times \text{høyden } (h) / \text{tid } (t)$$

Vi vet at

$$\text{Massen til vannet } (m) = \text{tettheten til vannet } (\rho) \times \text{volumet til vannet } (V)$$

Videre vet vi at:

$$\text{Vannstrømmen } (Q) = \text{volum vann } (V) / \text{tid } (t)$$

Setter vi dette inn i formelen vår får vi at tilført effekt fra vannet ved ventilen til turbinen er:

$$\text{Tilført effekt } (P) = \text{Tetthet vann } (\rho) \times \text{tyngeakselerasjonen } (g) \times \text{høyden } (h) \times \text{vannstrømmen } (Q)$$

- Tettheten til vann $(\rho) = 1000 \text{ kg/m}^3$
- Tyngeakselerasjonen $(g) = 9,81 \text{ m/s}^2$
- Avlest høyde (manometeret) (h) : _____ mVs

Åpne ventilen ved innløpet til turbinen (rødt håndtak). Vent til det renner godt fra avløpet og sett bøtta under. Ta tiden det tar å fylle en 20 liters bøtte og regn ut volumstrømmen:

- Avlest vannstrøm (Q) : _____ m^3/sek

Husk og regn om fra liter/sek til m^3/s .

- Beregn tilført effekt og før resultatet inn i tabellen under

$$\text{Tilført effekt} = 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \text{_____} m \cdot \text{_____} \text{ m}^3/\text{s} = \text{_____} W$$

Målepunkt	Turtall rpm	Strøm I_L	Spenning U_L	Avgitt elektrisk effekt	Tilført effekt turbin	Virknings- grad
1						
2						
3						
4						
5						

c. Mål turtallet

Mål turtallet med turtallsmåleren:

- Omdreininger pr. minutt: _____ rpm

Før den målte verdien for turtallet inn i tabellen.

d. Strøm, spenning og effekt

Mål strøm og spenning levert til lasten og beregn levert elektrisk effekt:

- Avlest strøm: _____ A, og spenning: _____ V
- Beregnet levert effekt: Strøm _____ A · Spenning _____ V = Effekt _____ W

Før verdiene for strøm, spenning og levert effekt inn i tabellen:

e. Gjenta målingene

- Gjenta måling av turtall, strøm og spenning, og beregn levert effekt for til sammen fem ulike verdier av belastningsmotstanden.

Juster belastningsmotstanden fra høy (dvs. lav strøm) til en lavere verdi (økende strøm) og noter tilhørende verdier for turtall, strøm og spenning. Gjenta dette for fem verdier for belastningsmotstanden. De fem posisjonene er markert på belastningsmotstanden. Beregn levert effekt for alle tilfellene og før resultatet inn i tabellen over.

f. Beregn virkningsgraden

Beregn virkningsgraden for hvert av de fem målepunktene i tabellen:

- Virkningsgrad = Avgitt effekt (Watt) / Tilført effekt (Watt)

og før resultatene inn i tabellen over.



g. Grafisk framstilling av virkningsgraden

- Framstill virkningsgraden som funksjon av turtallet som en graf i diagrammet under, og skriv verdier på aksene.



- Hvordan vil dere tolke grafen?

Kommenter resultatet:

h. Optimalt turtall

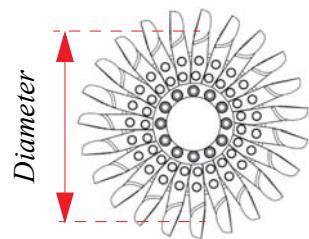
Les av turtallet for turbinen der levert effekt er størst (optimal verdi). Bruk tabellen eller den grafiske framstillingen.

- Avlest optimalt turtall (RPM_{opt}): _____ rpm

i. Sammenlign farten til vannet og farten til turbinskojlene

Beregn farten til turbinskojlene fra turtallet i m/s. For hver omdreining går skovlene en lengde som er lik omkretsen av turbinen:

- Diameteren til turbinen er målt til _____ m
- Skovlenes fart = Diameter x 3,14 x Optimalt turtall / 60
- Skovlenes fart er beregnet til: _____ m/s



Beregn farten til vannstrålen fra trykket (målt med manometeret i mVs) i følge Toricelli's ligning:

$$Farten\ til\ vannstrålen = \sqrt{2 \cdot Tyngdeakselerasjon \cdot Trykk}$$

- Beregnet fart til vannstrålen ved optimal last er: _____ m/s

Sammenlign farten til vannet med farten til skovlene. Farten til skovlene bør være ca. halvparten av farten til vannet. Kommenter resultatene:



6 Referanser

- [1] Håvard Karoliussen, *Energi for Framtida*, SLserien nr. 8, april 2006
- [2] Grytli, Rimstad, Hansen, Bojsen, Muggerud, *Produkt rapport*, NTNU 06.05.09, EiT-landsby 37 Elle-Melle Solcelle, 2009
- [3] Metningstrykk
<https://no.wikipedia.org/wiki/Damptrykk>
- [4] Jørn Stene, *Varmepumper – Grunnleggende varmepumpeteknikk* SINTEF Energiforskning AS, Avd. Energiprosesser, utg. 4, 1997 Rapportnr. STF84 A97302
- [5] Rossing N.K., Aastebøl H. *Elektrisitetlære*, Utg. 4.5, Skolelaboratoriet 2019
<https://www.ntnu.no/documents/2004699/12108297/Elektrisitetsl%C3%A6re.pdf/b919d094-3a7e-a1d8-a593-bac21c56fee8?t=1573723302041>
- [6] Rossing N.K., Storli P.T., Aastebøl H., Tellbon R., Fredagsvik M.S. *Energiløypa 2019 – veiledningshefte*, Utg. 4.4, Skolelaboratoriet 2019
<https://www.ntnu.no/documents/2004699/12108297/Energil%C3%B8ypa+-+Student+veiledning+4.1.pdf/4a794690-ee59-4924-862b-7a30957c1ffe>
- [7] Rossing N.K. *Praktisk solcelleteknologi for skolen*, Rev. 3.2, Skolelaboratoriet 2014
<https://www.ntnu.no/documents/2004699/12108297/Solceller+3.2+SL.pdf/e2f13107-3c30-4d66-bb89-d99f21f39929>
- [8] Rossing N.K., Fagerli T. *Varmepumper og solfangere*, Rev. Skolelaboratoriet 2013
<https://www.ntnu.no/documents/2004699/11799071/Varmepumpehefte+4.4+SL.pdf/62762508-9982-4339-9052-ee40aa3569ce>

Vedlegg A Mål virkningsgraden i et vannenergiverk

En laboratoricøving man kan gjøre i klasserommet

A.1 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.

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





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





- Velg den dysa (liten eller stor) dere tror gir mest levert energi
- Sett SPARK stasjonen i **måleark 2** - Effektkurve
- Start målingen på SPARK (trykk ) og registrer effekt som funksjon av tiden (effektkurven)
- Åpne ventilen
- Tilpass vertikal skala ved å trykke på  og deretter .
- Lukk ventilen når vannstanden er nådd ned til nedre målestrek
- Stopp målingen på SPARK
- Finn levert energi til belastningsmotstanden som arealet under kurven
Trykk  - Velg deretter AREAL, trykk OK, les av areal
- Skriv resultatene inn i tabellen under
- Gjenta målingen for andre dyser og belastningsmotstand

Måling	Dyse Liten/Stor	Belastning 3,9 / 8,2 Ohm	Levert energi (Ws)	Kommentar
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

A.2 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]

Levert elektrisk energi til belastningen:

Maksimalt levert energi til belastningen: _____ [Joule] (1 Watt sek. = 1 Joule)

Virkningsgrad:

Virkningsgrad = Levert energi til belastning/ Vannets stillingsenergi dvs.

Virkningsgraden = Elektrisk energi _____ [Joule] / Stillingsenergi energi _____ [Joule] = _____

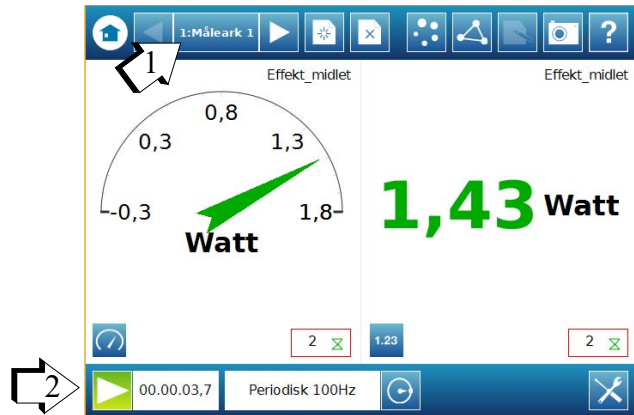
Diskuter resultatet _____

A.3 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.

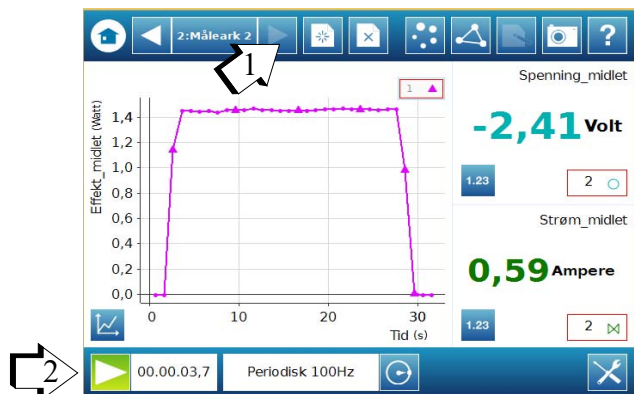
Startes:  Stoppes: 



Måling av effektkurve og energi




1. Velg måleark 2 - *Energimåling*
2. Målingen startes og stoppes ved å trykke på pila i nederste venstre hjørne.

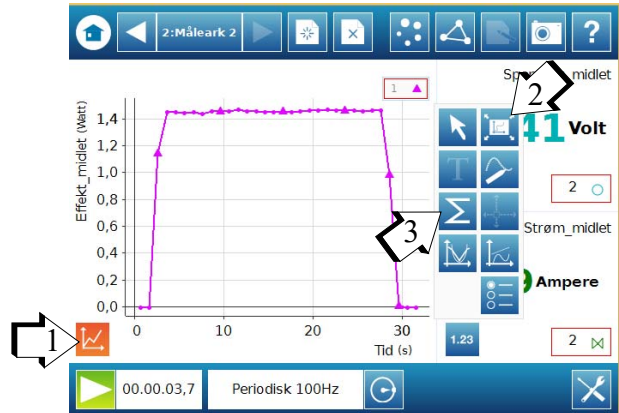
Startes:  Stoppes: 





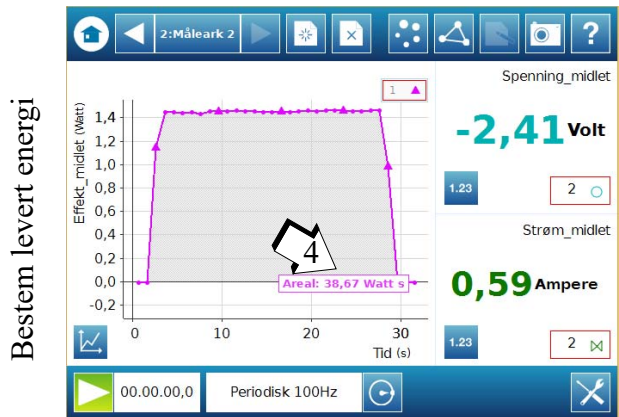
Skaler og beregn areal (energi)

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 .
2. Velg STYRE DATA
3. Velg ADMINISTRERE KJØRINGER
4. Velg SLETT ALLE KJØRINGER
5. Trykk Ja
6. Trykk OK og OK






Vedlegg B Bruk av Spark datalogger

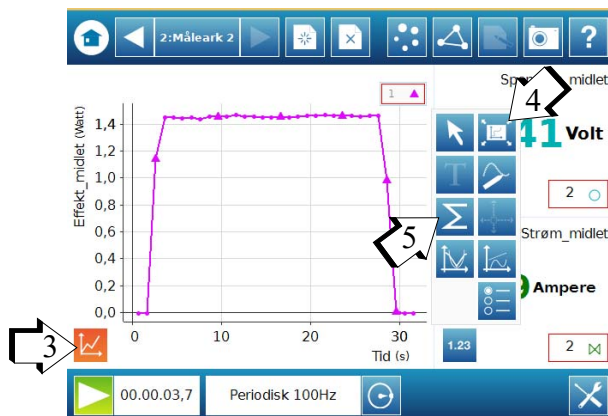
Registrering av strøm som funksjon av tiden

1. Velg måling - *Strømmåling*
2. Målingen startes og stoppes ved å trykke på pila i nederste venstre hjørne.
Startes:  Stoppes: 




Skaler og beregn areal (As)

3. Trykk på symbolet .
4. Trykk  for å skalere opp grafen.
5. Trykk  - Velg deretter AREAL
6. Trykk OK
7. Les av areal (figur under til høyre)

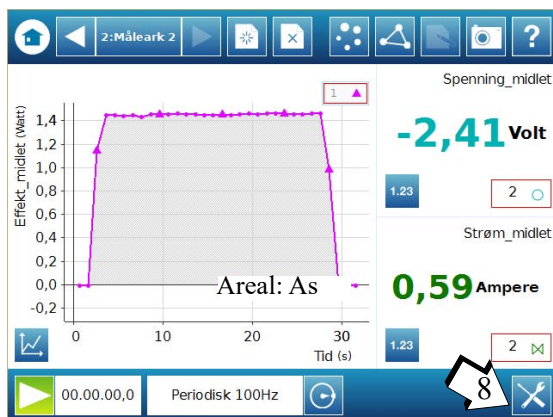




Fjern gamle målinger

8. Trykk på symbolet 
9. Velg STYRE DATA
10. Velg ADMINISTRERE KJØRINGER
11. Velg SLETT ALLE KJØRINGER
12. Trykk Ja
13. Trykk OK og OK

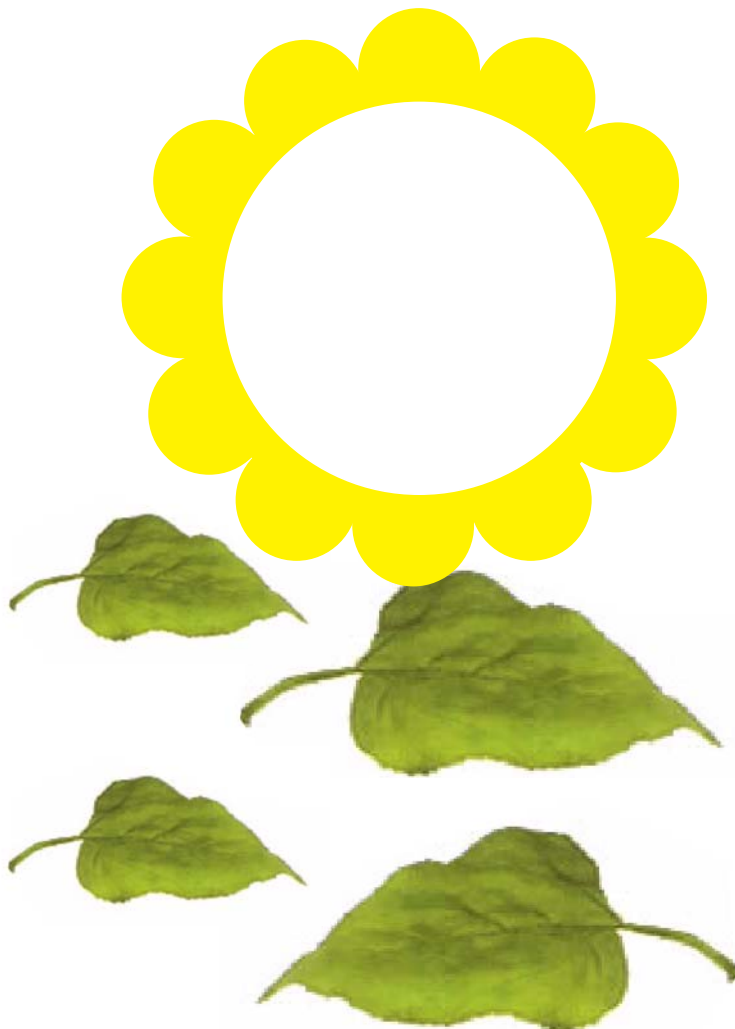
Bestem strømmengde [As]



Vedlegg C Kopioriginaler

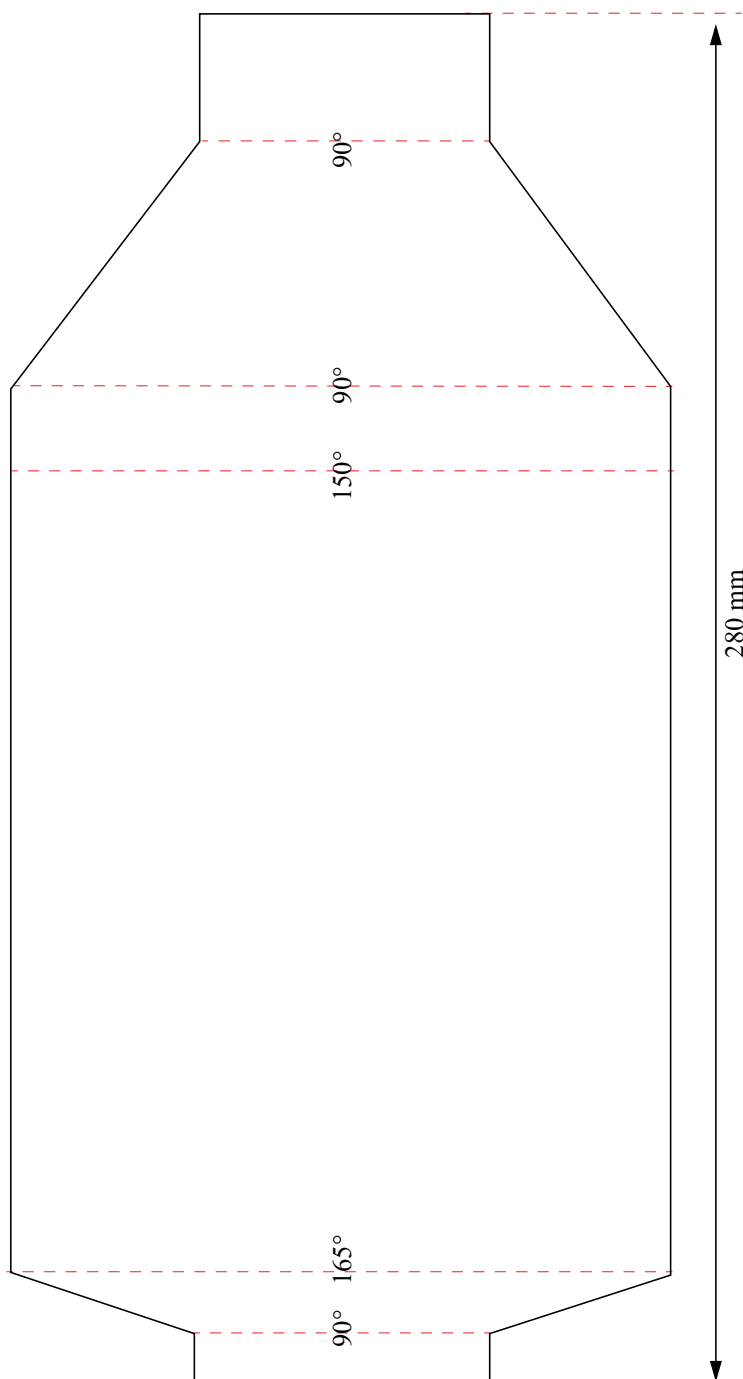
C.1 Kopi original solcellesikke

Malen må forstørres 200% for at den skal passe.





C.2 Mal for Solcelle LED-lampe





Solcellelampe

Heftet omtaler elektrisitet produsert av solceller og generator slik vi finner det i et vannenergiverkt. I tillegg beskrives varmepumper og oppvarming av vann ved ulike teknologier. Alle temaene har fokus på virkningsgrad som fortsatt er et gjennomgående tema i naturfaget i videregående skole.

Heftet har hovedsakelig en konseptuell tilnærming til temaene og inkluderer derfor i mindre grad de matematiske modellene som beskriver fenomenene.

Heftet inneholder flere eksempler på illustrative demonstrasjoner som kan egne seg i klasserommet, i tillegg til modeller som kan framstilles sammen med elevene. Eksempelvis solcelledrevet bil, solcelle lader for mobiltelefon og solcelleladet lampe. Videre beskrives to ulike generatorer som kan lages sammen med elevene i klasserommet.

Nils Kr. Rossing

Dosent ved Skolelaboratoriet

E-post: nils.rossing@ntnu.no

Pål-Tore Selbo Storli

Førsteamanuensis ved Institutt for energi- og prosessteknikk

E-post: pal-tore.storli@ntnu.no

Steve Vøller

Forsker ved Institutt for elkraftteknikk

E-post: steve.voller@ntnu.no

Tore Fagerli

Pensjonert lektor fra Byåsen vgs.

NTNU



Trondheim

Institutt for
fysikk

Skolelaboriet
for matematikk, naturfag
og teknologi

Tlf. 73 55 11 43

<https://www.ntnu.no/skolelab>