

FYS 2150. ØVELSE 11

SOLCELLEN

Fysisk institutt, UiO

Mål

Etter å ha vært gjennom denne øvelsen skal du vite hvordan du rent praktisk kan benytte en solcelle som generator for elektrisk strøm, og du bør kjenne til hvilken virkningsgrad (effektivitet) en solcelle har. Du skal også vite at solcellen krever en spesiell belastning (optimal belastning) for å gi maksimal effekt, og at denne optimale belastningen varierer med lysintensiteten.

Innledning

Solceller er kommet for å bli som en energikilde i spesielle sammenhenger. Vi kjenner dem fra svære paneler som brukes på satellitter og romsonder for å gi elektrisk energi for instrumenteringen ombord. Men vi kjenner også solcellene fra armbåndsur, lommeregnerne og solcelleanlegg for hyttebruk. Foreløpig brukes ikke solceller for storstilt kraftproduksjon på samme måte som vannkraft osv., til det blir kraften alt for dyr sammenliknet med andre billigere alternativer. Mange hevder at solceller aldri vil kunne konkurrere prismessig med andre alternativer for storproduksjon av energi. Med alle overraskelsene innen elektronikk de siste 20-30 årene i mente, har vi vanskelig for å avskrive denne muligheten en gang for alle. Likevel er solceller idag mest aktuelle som strømforsyning for apparater som av forskjellige grunner ikke kan tilkobles lysnettet.

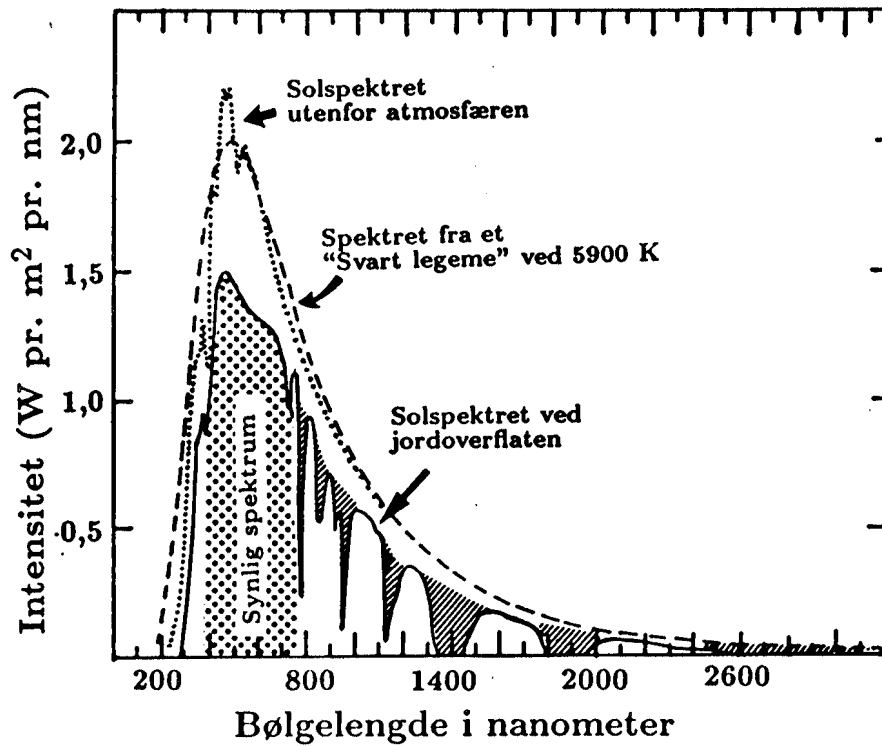
En solcelle omdanner synlig lys (og UV) *direkte* til elektrisk strøm. Dette er en stor fordel med solceller relativt til mange andre energikilder. For eksempel kan solceller skaleres ned til de minste “fornybare” strømkilder vi kjenner. Med det mener vi at det kan lages solcelleanlegg på mange kvadratmeter såvel som på én kvadratcentimeter, og begge deler virker. (Effekten endrer seg selvfølgelig med arealet.) Tilsvarende variasjon i fysisk størrelse har vi ikke når det gjelder vannkraft,

vindkraft, bølgekraft eller solfangere. Dersom du senere som eksperimentalfysiker, eller kanskje også i ditt private liv, trenger en energikilde som skal være lett og som skal vare i årevis, kan det godt hende at solceller er det beste valg. Men det er noen få spilleregler du bør kjenne til, og de vil vi gå inn på i denne øvelsen.

Hvilken effekt kan sollyset gi?

Med flere deilige somre bak oss, skjønner de fleste at sola sender inn en betydelig effekt (energi pr. tid) mot jorda. Effekten av strålingen fra sola er faktisk 1355 W/m^2 når en måler utenfor atmosfæren. Denne verdien kalles *solarkonstanten*. Når lyset går gjennom atmosfæren, absorberes en del av strålingen. Ozonlaget absorberer de mest kort bølgede UV-strålene, og absorpsjon i vanndamp, karbondioksyd m.m. er også betydelig. De ulike absorberende stoffene i atmosfæren setter opp klare "hull" (spektralområder med relativ lav intensitet) i spekteret til lyset som kommer ned til jordoverflaten. Dette er illustrert i figur 1. Til tross for betydelig absorpsjon kommer det i middel fram ca. 950 W/m^2 til jordens overflate på en klar dag (avhenger av breddegraden!). Verdien avhenger selvfølgelig av skydekket, og høyeste verdi kan faktisk oppnås når sola skinner rett på stedet en måler samtidig som lyse skyer reflekterer en del lys i tillegg.

Hvor stor del av denne effekten kan vi nyttiggjøre oss i praksis? Med en solcelle kan vi ta ut ca. 10% av den effekten som faller inn på cellen, dvs. omtrent 95 W/m^2 . Selv om dette er godt under effektiviteten til en solfanger (som varmer opp vann), er det betydelig energi for mange elektronikkformål. Men la oss nå se på hvordan en solcelle er bygget opp.



Figur 1: Spektralfordeling av solstrålingen. Strålingen ved havoverflaten er basert på at sola står i zenit (loddrett over oss), og at vanndamptrykket er 20 mm Hg. (Figuren er tatt fra Henriksen og Larsen: Ozonlaget og UV-stråling, 1989)

Solcellens anatomi og virkemåte

De vanligste solceller er laget av et halvledermateriale, og før vi går inn på oppbygning og virkemåte, kan det kanskje være nyttig å repetere litt om halvledere generelt. Vi tar da for oss halvledere basert på silisiumkrystaller.

Silisiumatomene har fire valenselektroner hver som inngår i bindinger med naboatomene. Bindingene er organisert slik at silisiumatomene danner en krystall. Valenselektronene er bundet såpass kraftig til sitt atom (kjerne) at de ikke normalt kan flytte på seg. Ledningsevnen er derfor lav.

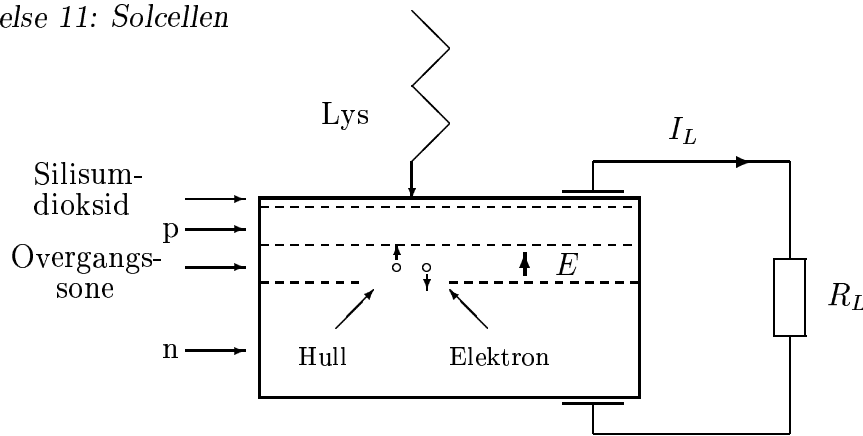
Silisium kan imidlertid "dopes" med fremmedatomer. Med dette mener vi at en svært liten del (ca. $1 / 10^6$) av silisiumatomene blir erstattet med et annet slags atom. Når fremmedatomene er så få, vil de ikke forstyrre selve krystallstrukturen til silisium. Den elektriske ledningsevnen blir likevel ganske mye forandret. Dette kan vi forklare slik:

Silisium kan f.eks. dopes med arsen, og arsen har fem valenselektroner. Kun fire av disse inngår i normale bindinger til nabo silisium-atomer. Det femte elektronet vil være langt lettere bundet til arsen, og det skal ikke store påvirkningen til før det kan forlate arsen og binde seg løst til et nabo silisium-atom, eller vandre videre i krystallen. Silisium dopet med arsen får derfor elektroner som forholdsvis lett kan bevege seg fra et atom til et annet innenfor krystallen, og ledningsevnen blir da langt større enn for en ren silisiumkrystall. En halvleder laget ved arsen-doping av silisium, sier vi er en *n-type* halvleder (n for negativ ladningsbærer).

Silisium kan også dopes med bor-atomer, og bor har bare tre valenselektroner, mens en helst skulle hatt fire for å få en normal binding til nabo silisium-atomer. Vi får da et underskudd på elektroner. Et slikt underskudd, som vi kaller et *hull*, kan fjernes på én binding dersom et elektron “lånes” fra en nabobinding. Det skal ikke store påvirkningen til for at en slik “låning” kan forekomme, og følgen er at hullet forholdsvis lett kan flytte seg rundt omkring i krystallen. En halvleder av denne typen kalles derfor for en *p-type* halvleder (p for “positiv” ladningsbærer).

Dersom vi ved spesielle dopingsteknikker lager en halvleder som består av en p-type og en n-type i tilgrensende områder, får vi en pn-overgang. Spesielle forhold oppstår i sonen mellom n og p, og vi kaller denne sonen for en *overgangssone*. Her vil noen elektroner fra arsen (i n-type området) “permanent” forflytte seg over til bor-atomer (i p-type området). Det vil da oppstå ladde ioner på hver sin side av overgangssonen. På grunn av disse ionene vil det oppstå et elektrisk felt i denne sonen, og feltet vil være rettet fra n-type området til p-type området. Dette feltet sørger for at ikke flere elektroner fra n-området forflytter seg over til p-området. Feltstyrken kan vi modifisere med å sette spenning over pn-overgangen. Setter vi positiv spenning på p-området relativt til n-området, vil feltstyrken avta, og eventuelt bli så liten at elektroner fra n-området lett kan ta seg over til p-området. I så fall får vi en strøm gjennom pn-overgangen. Settes spenningen andre veien, vil feltstyrken i overgangssonen bare bli større enn normalt, og da er det enda mindre sjanse for at elektroner skal finne veien fra n til p. Det er slike effekter som ligger bak at en halvleder (pn-overgang) kan brukes til en likeretterdiode, slik vi allerede så det i vår.

En solcelle består av de samme elementene som en halvlederdiode, og en skjematisk tegning av oppbygningen er vist i figur 2. Vi har et n-dopet område, og et p-dopet område på en og samme halvlederkrystall av silisium (eller annet materiale). Dette gjøres ved at silisiumkrystallen kuttes i ca. 0.5 mm tynne skiver av n-dopet silisium, og disse dopes så i et 2-3 μm tykt lag (folie) til det blir p-dopet silisium. I området mellom p og n (pn-overgangen) dannes overgangssonen vi beskrev ovenfor (også kalt det permanente elektrostatiske dipolsjiktet). Det elektriske felt er rettet fra n-siden til p-siden. (Det ytterste laget av silisiumdioksid er kun satt på for å beskytte de underliggende lag.)



Figur 2: Solcellen er som en halvlederdiode der lysinduserte elektron-hull-par separeres av et elektrisk felt E slik at det kan trekkes en strøm fra cellen.

En solcelle i mørke er i virkemåte identisk med en halvlederdiode. Men hva er det som finner sted når vi sender lys inn på en slik diode? For å forklare dette tar vi utgangspunkt i *vanlige* silisium-atomer i overgangssonen mellom de n og p dopete områdene. Alle elektronene er her knyttet til nærmeste kjerne, og kan ikke forflytte seg. Får imidlertid et av disse elektronene tilført nok energi (f.eks. ved at det absorberer et foton), kan det hoppe over til nabo-atomet. Dette vil så få et overskudd av elektroner, og lett kunne gi det fra seg igjen på samme måte som overskudds-elektroner i n-type halvledere. Mest sannsynlig vil det gi fra seg elektronet tilbake til den kjernen som opprinnelig hadde det, og vi er like langt. I en del tilfeller vil elektronet likevel vandre videre til neste kjerne. Sannsynligheten for at dette skal skje er faktisk ganske stor når elektroner hopper over til naboatomet i *overgangssonen*, for her har vi som sagt et elektrisk felt som vil påvirke elektronets bevegelse. Feltets retning virker slik at elektronene dras over til n området.

Men hva skjer med det atomet som mistet elektronet? Det vil ha et underskudd på elektroner (et hull), og dette hullet vil fylles igjen av et elektron fra naboatomet. På grunn av det elektriske feltet i overgangssonen, vil elektroner som fyller igjen hull helst bevege seg i motsatt retning av feltet. Hullet beveger seg derfor i retning p-området, og vil til slutt gå inn i dette.

p-området vil da etter hvert få overskudd på hull, og n-området overskudd på elektroner. Dette tilsvarer at det bygges opp en potensialforskjell (spenning) mellom n og p området (positivt på p-siden). Feltstyrken i overgangssonen synker da, og til slutt vil det ikke lenger bli noe netto transport av elektroner eller hull over sonen. Forbinder vi imidlertid p-området med n-området ved hjelp av en ytre ledning, vil elektroner fra n strømme over til p og der nøytralisere tilsvarende mange hull. Feltstyrken i overgangssonen vil da opprettholdes, og strømmen vil fortsette så lenge lys når solcellen.

Ikke alt lys har energi nok til å sparke et elektron løs fra det atomet det opprinnelig tilhørte. Minimum energi for silisium er $E_g = 1.12 \text{ eV}$ ¹. Denne energien svarer til lyskvanter med bølgelengde ca. 1100 nm. Det vil si at dersom et lyskvant med bølgelengde mindre enn 1100 nm blir absorbert i en silisium halvleder, så vil et elektron kunne få stor nok energi til å sparkes ut fra det atomet det opprinnelig "tilhørte". Vi sier at vi da danner et *elektron-hull par*.

Sammendrag om virkemåten:

Fotoner med bølgelengde mindre enn 1100 nm danner elektron-hull-par når de absorberes i halvlederen. De par som oppstår nær overgangssonen mellom n og p (også kalt dipolsjiktet), separeres av det elektriske feltet. Hullene beveger seg i retning av p-siden, mens elektronene går til n-siden. Når cellen koples til en motstand, vil det gå en elektrisk strøm fra p-terminalen til n-terminalen. Strømstyrken er proporsjonal med antall absorberte fotoner. Spenningen vil alltid være mindre enn E_g/e , hvor e er elementærladningen. Det vil si at spenningen fra solceller laget av silisium teoretisk sett alltid må være mindre enn 1.12 V.

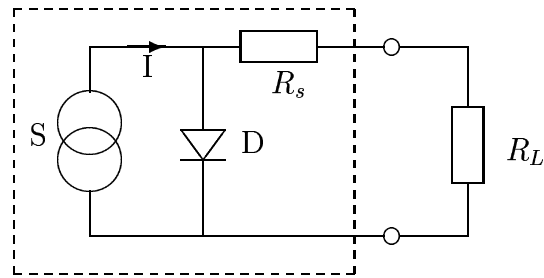
Noen karakteristiske trekk ved solceller

Halvlederdiodes som belyses vil alle virke slik som beskrevet ovenfor, men de kan utformes på flere forskjellige måter alt etter hvordan de skal benyttes. Det finnes små diodes, fotodiodes, som brukes til overføring av informasjon i optokoblere o.l. (som forklart i en annen av høstens øvelser). Solceller derimot, ser ikke mye ut som vanlige halvlederdiodes. Dette skyldes at vi stiller spesielle krav til solceller. De skal fange opp så mye sollys som mulig, og generere mest mulig energi. De er derfor ofte formet som flate skiver, gjerne 7 – 10 cm i diameter (eller tilnærmet kvadratiske).

Spenningen fra hver solcelle er vanligvis 0.4 – 0.6 V, og strømmen kan komme opp i ca. 2 A ved godt sollys. Effektiviteten til cellene (hvor stor del av effekten i sollyset som kan nyttiggjøres som elektrisk effekt) er gjerne 10 – 22 %, alt etter renhet i silisium materialet, temperatur m.m. Konsentreres sollyset ved hjelp av linser eller speil, kan effektiviteten komme opp i bortimot 30 %. Dersom en lager flere lag solceller *oppå hverandre*, utformet slik at de ulike lagene er følsomme i hver sine bølgelengdeområder, kan effektiviteten bli enda litt høyere (men produksjonskostnadene stiger da også ...).

En solcelle kan sammenliknes med en krets bestående av en strømkilde, en diode og en seriemotstand, slik som vist i figur 3. Vi sier at denne kretsen er en *ekvi-*

¹ E_g står for energigap mellom to *energibånd* for elektronet (valensbånd og ledningsbånd). Energibånd i metaller og halvledere vil bli behandlet i teorikursene.



Figur 3: *Ekvivalent-skjema for en solcelle. De to sirklene til venstre (S) symboliserer en strømkilde, strømmens retning er gitt med en pil (I). Serieresistansen R_s (solcellens utgangsimpedans) varierer med lysintensiteten. Solcellen leverer i dette diagrammet strøm til lastresistansen R_L .*

valentkrets til solcellen. Strømgeneratoren (helt til venstre) gir en strøm som er proporsjonal med lysintensiteten inn på solcellen. Strømmen går gjennom seriemotstand og lastmotstand, og det vil oppstå en spenning over disse som virker i lederetningen for dioden.

Når R_L øker, vil spenningen over D overstige “terskelverdien” for denne dioden. Strømmen vil da lettere gå gjennom dioden D i stedet for den ytre lastmotstanden R_L , og effekten som kan nyttiggjøres vil da ikke være optimal.

Merk at det i en solcelle vil gå en strøm fra p- til n- området *utenfor* cellen når solcellen brukes for energiproduksjon. Strømmen *inne i* cellen går da fra n- til p- området. Strømmen i den ytre krets blir da motsatt rettet av den vi normalt ville hatt dersom cellen ble byttet ut med en diode (pluss en separat spenningskilde). (“Solcellen gir strøm i sperreretningen.”)

Måling av lysinnstråling: Solarimeter.

Vi nevnte at en enkel solcelle slik vi kjenner den idag har en effektivitet på ca. 10%. For å komme fram til dette tallet, må den målte effekten fra cellen sammenliknes med effekten som stråler inn på cellen. Til dette trenger vi et referanseinstrument. I denne øvelsen benytter vi et såkalt “solarimeter” til bestemmelse av *irradiansen*, dvs. innfallende strålingseffekt pr. flate (enhet W/m^2).

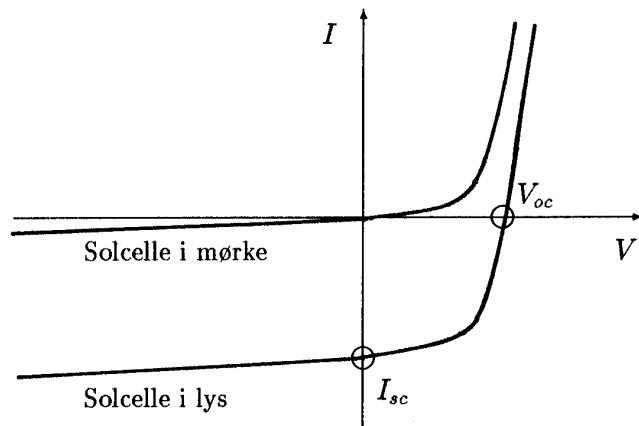
Det lysfølsomme element i solarimeteret er en sortmalt skive av Al_2O_3 . På denne skiven er det plassert 100 termoelementer i et rotasjonssymmetrisk arrangement

med de varme loddestedene nær sentret og de kalde langs randen, og randen har god termisk kontakt med solarimeterhuset.² Solarimeterets følsomhet α er oppgitt i $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$. Hvis irradiansen (effekt pr. flate) er 1000 W/m^2 , gir solarimeteret en spenning på 4-6 mV, som måles med et instrument med stor inngangsmotstand. Irradiansen må ikke overstige 4000 W/m^2 .

Oppgave 1 : Solcellen som halvlederdiode.

Vi har nevnt at solcellen er en halvleder. Strøm-spenning karakteristikken for solcellen i mørke minner svært mye om diodekarakteristikken du tok opp i vår, mens solcellen i lys gir et annet resultat. Figur 4 viser skjematisk hvordan karakteristikene ser ut.

Du skal i denne oppgaven ta opp strøm-spenning karakteristikken for en belyst solcelle, både når en trykker på en ytre spenning, og når solcellen får operere alene.



Figur 4: *Strøm-spennings karakteristikker for en solcelle. V_{oc} tilsvarer solcellens spenning med uendelig stor belastning (open circuit), og I_{sc} er den strømmen solcellen kan gi dersom den er kortsluttet (short circuit).*

NB: For å unngå å bruke alt for lang tid på oppgave 1a kommer vi med følgende formaninger: Studer detaljene i figur 4 nøye før du starter målingene slik at du vet sånn omtrentlig hvordan kurvene skal forventes å gå. Studer også koblingsskjemaene nøye, og forsøk å *forstå* disse. Vær nøye med oppkoblingene slik at strømretninger

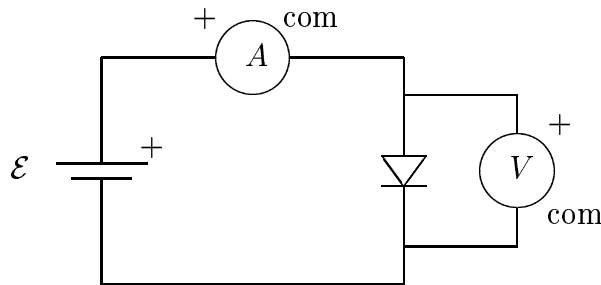
²Termoelementer består av to kontaktpunkter (loddesteder) mellom to forskjellige metaller. Det ene kontaktpunktet plasseres der temperaturen skal måles, og det andre kontaktpunktet festes til en "referanse" (temperaturmessig)

og fortegn på spenninger blir korrekte. (Vi har til og med gitt + og 'com' i skjemaene for å angi hvilken vei multimetrene skal kobles.)

a. Strøm-spennings karakteristikken for en belyst solcelle.

Når vi skal ta opp den første strøm-spenning karakteristikken for en solcelle, påtvinger vi den en ytre spenningskilde. Siden skal vi la solcellen arbeide på egen hånd.

Strøm-spenning karakteristikken baserer seg på sammenhørende verdier av strøm gjennom og spenning over solcellen. I prinsippet kunne vi brukt en oppkobling som vist i figur 5 (slik vi gjorde for dioder i vår) for å oppnå disse målingene. Når lys treffer solcellen og den begynner å produsere strøm selv, vil imidlertid ikke den tradisjonelle koblingen i figur 5 være velegnet. Vi bruker derfor koblingen gitt i figur 6.

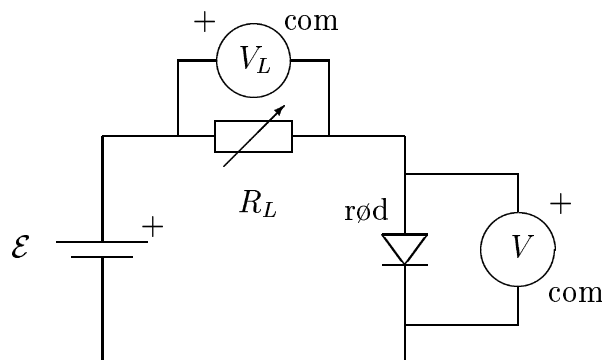


Figur 5: *Et tenkt, klassisk oppsett for måling av solcellens strøm-spennings karakteristik ved hjelp av en ytre spenningskilde \mathcal{E} . Oppsettet skal ikke brukes.*

Merk at kombinasjonen av resistansen R_L og voltmeteret V_L i praksis kan ansees som et amperemeter *der vi kan variere den indre motstanden* ($R_i \approx R_L$). Strømmen kan nemlig beregnes ut fra Ohms lov $I = V_L/R_L$. Dette trikset i oppkobling skal vi faktisk benytte i resten av øvelsen.

Trikset er meget nyttig fordi solcellen ofte krever en lavere belastningsmotstand enn den indre resistans i amperemeteret (multimeter i strøm-målingsfunksjon) for at cellen skal yte maksimalt.

Solcellen plasseres mekanisk sett i et stativ ca. en meter unna en lysbildeprojektor. Bruk samme optiske benk som skal brukes i oppgave 4, men fjern linse og blender fra lysveien! (NB. Pass på å unngå at solcellen får noe slag. Den kan knuses/brekkes.)



Figur 6: Oppsett for måling av solcellens strøm-spennings karakteristikk ved hjelp av en ytre spenningskilde \mathcal{E} . Oppsettet viser oppkobling for måling i lederetningen **NB:** For måling i sperreretning snus polariteten kun på \mathcal{E} .

Koble nå opp som vist på figur 6, men følg tipsene nedenfor. Når den positive pol av spenningskilden \mathcal{E} (via V_L og R_L) kobles til p- siden av solcellen (rød kontakt), vil du studere dioden i lederetningen (positiv strøm). Snu polariteten på spenningskilden (men ikke rør multimetrene eller solcellen!) for å ta opp karakteristikken også i sperreretningen (negativ strøm).

Selv om målingene som nå skal gjøres i prinsippet er enkle, har det vist seg at det likevel er fallgruber. Vi vil derfor gi et par tips for blant annet å redusere antall ødelagte spenningskilder, dekademotstander og sikringer i våre multimetre. Tipsene er:

1. Bruk av spenningskilden: Spenningskildene kan ikke levere store strømmer fra de variable spenningsuttakene. Siden vi bør kunne måle opptil et par hundre mA anbefales å bruke det faste 5V uttaket til alle målingene³.

2. For positiv strøm (“over x-aksen” i karakteristikken): Innstill lastmotstanden R_L på $100\ \Omega$, og koble dernest til spenningskilden. Positiv spenning må kobles til rød kontakt på solcellen (slik som vist i figur 6). Noter spenning over solcellen (V) samt V_L og R_L i vedlagte skjema, og beregn strømmen i kretsen I . Endre så R_L på en kontrollert måte slik at du får dekket strømmer mellom 5 og 150 mA. Fire-fem målinger er nok dersom disse velges bra. Unngå så små verdier på R_L at strømmen blir for stor for dekademotstand og/eller multimeter!

³Hvorvidt strømstyrken blir så stor at den overstiger de variable uttakens kapasitet, avhenger av lyskildens styrke og avstanden mellom lyskilden og solcellen. Det er OK å prøve med de variable uttaketene først. Da kan både \mathcal{E} og R_L varieres. En varsellampe på spenningskilden lyser hvis strømstyrken overstiger maksimalverdien. Gå isåfall over til fast 5V uttaket.

3. For negativ strøm (“under x-aksen” i karakteristikken): Innstill igjen lastmotstanden R_L på $100\ \Omega$. Koble negativ spenning til solcellens røde kontakt. Husk at du *kun* skal koble om de to bananpluggene som er koblet til spenningskilden, mens resten av oppkoblingen skal stå uberørt fra forrige måling. Noter V (over solcellen), V_L og R_L , og beregn I . Varier så lastmotstand R_L inntil du har fått definert grafen “under x-aksen” på en tilfredsstillende måte. Fem til åtte heldig valgte punkter klarer seg. Generelt kan vi opplyse at høye verdier for R_L gir målepunkter nær opp til x-aksen, mens lave gir målinger lenger vekk fra x-aksen. Ikke la *spenningen* over solcellen i sperreretningen bli lavere enn ca. $-5\ \text{V}$.

Måleresultatene fra denne oppgaven (og fra **b**) bør plottes mens du foretar målingene. Kurvene for **a** og **b** skal plottes i samme diagram. Velg aksene deretter (ofte kan det passe å la y-aksen gå fra -150 til $+150\ \text{mA}$).

MERK: Bruk aldri lavere verdi på R_L enn $0.5\ \Omega$. Begrunnelse: Det er alltid en del resistans i ledningsføring og bananpluggene. Du vil derfor lett kunne lure deg selv dersom du tror at R_L er så lav som det du leser av på dekademotstanden (f.eks. 0.1 eller $0.0\ \Omega$), mens den egentlig er en del høyere på grunn av lednings- og kontakt-resistanser. Dersom du ikke går lavere enn $0.5\ \Omega$ på dekademotstanden, er ikke forskjellen mellom virkelig og avlest resistans større enn at vi kan regne dem som like. *Denne regelen gjelder hele øvelsen!*

La solcelle og lys bli stående på uten noen forandring, da du skal benytte dette oppsettet også i deloppgave **b**.

b. Solcellen uten ytre spenningskilde

I **a** bestemte du den belyste solcellens karakteristikkk dersom du pådyttet en spenning over cellen. I denne deloppgaven skal du undersøke hvordan karakteristikken blir når solcellen får arbeide på egen hånd. Fjern spenningskilden \mathcal{E} ved å dra ut ledningene (bananpluggene) fra kilden og koble ledningene sammen. De to multimeter vil da vise samme verdi med motsatt fortegn. Verdien V_L brukes fortsatt til å beregne strømmen gjennom R_L (og dermed strømmen gjennom solcellen): $I = V_L/R_L$ (med fortegn!). Multimetreter V viser spenning over solcellen (med fortegn). (Som du vil se holder det egentlig med å lese av bare fra det ene voltmeteret.)

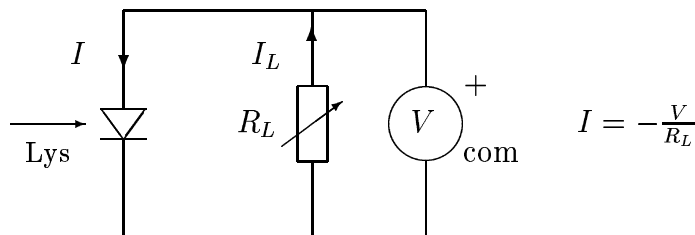
Varier R_L fra $0.5\ \Omega$ til dekademotstandens maksimale verdi, og les av spenningen over denne for disse ytterverdiene og to-tre andre verdier imellom. Måten du velger disse mellomliggende målepunktene er ganske avslørende for hvor modent du fungerer som eksperimentalfysiker! Det vi er ute etter er nemlig å fastlegge karakteristikken effektivt og nøyaktig. Selve *verdien* til R_L er da av sekundær interesse.

Tegn inn, i det samme diagrammet som ble brukt i **a**, karakteristikken til solcellen når den virker uten ytre spenningskilde. Pass på å bruke forskjellige symboler på de to datasettene for å unngå rot (og husk å fortelle hvilke symboler som tilhører hva). Kommenter resultatet!

Oppgave 2 : Solcellens optimale belastning

I denne oppgaven skal vi diskutere hvordan vi kan få mest mulig effekt ut av en belyst solcelle. I prinsippet skal du gjennomføre to måleserier nøyaktig som den i oppgave 1b, en med samme belysning som da, og en med en redusert belysning. Det er liten vits i å gjennomføre 1b om igjen, så vi foreslår at du bruker disse dataene videre i denne oppgaven. I tillegg gjør du en måleserie med redusert belysning.

Siden begge voltmetrene i oppgave 1b ga samme verdi men motsatt fortegn, kan vi sløyfe det ene multimeteret. Oppkoblingen blir da som vist i figur 7. Strømmen blir da $I = -V/R_L$ som du fort skjønner ved å studere figur 7 og/eller ved å sammenlikne med opplegget i oppgave 1b.



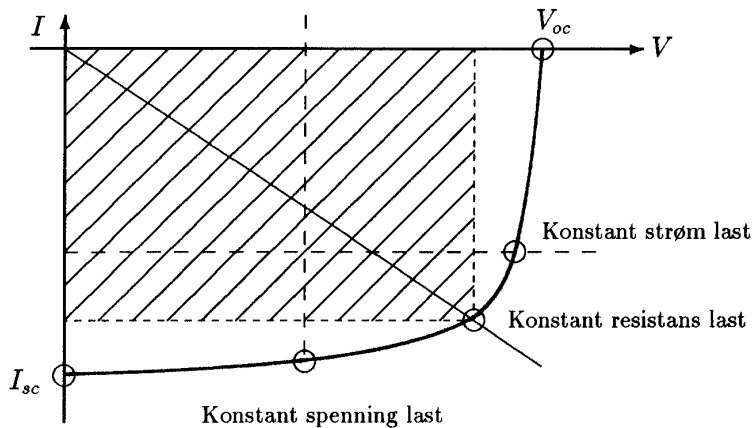
Figur 7: Oppkobling for å måle strøm-spenning kurven for en solcelle.

Redusert belysning oppnår du med å dreie solcellen ca. 60° om en loddrett akse. Strømmen ved meget lav R_L (0.5Ω) burde da være omtrent halvparten av hva den var i oppgave 1b. Varier R_L som i oppgave 1b, og noter måleresultatene i vedlagte tabell, og tegn strøm-spennings kurvene for solcellen mens målingene pågår (for å ikke ta unødvendig mange målinger).

Tegn til slutt strøm-spennings-kurven fra oppgave 1b i samme diagram.

Vi skal nå diskutere disse kurvene litt mer i detalj. En solcelle brukes for å levere mest mulig effekt. Men hvilken effekt leverer den? Du kan bestemme effekten ved å multiplisere strøm og spenning over lastmotstanden, dvs. $P = IV$. Gjør dette for de målepunktene du har i de to kurvene.

I figur 8 har vi tegnet inn et rektangel med et hjørne i strøm-spenning kurven. Arealet av dette rektangelet er proporsjonalt med $I \cdot V$, og dermed også effekten. Max effekt får vi når arealet på rektangelet er størst.



Figur 8: Strøm-spenning kurve for en solcelle. Med en konstant resistans last, finner vi solcellens arbeidspunkt (innsirklet) ved å ta skjæringspunktet mellom linjen (skrå) som svarer til denne lasten og strøm-spenning kurven. Arealet av det tilsvarende skraverte rektangelet er proporsjonalt med effekten som solcellen tilfører denne lasten. Solcellen kan også levere effekt ved konstant spenning eller konstant strøm, og eksempler på de tilsvarende arbeidslinjene er også inntegnet.

En beveger seg langs strøm-spenning kurven når lastmotstanden endres. Det vil si at effekten en kan få fra solcellen vil variere med lastmotstanden. Bestem lastmotstanden som ville gi maksimal effekt for solcellen med “full” belysning (oppgave 1b) og tilsvarende for redusert belysning (denne oppgaven). Er den optimale lastmotstanden den samme uansett lysintensitet?

Ut fra det du nå har sett, er det ikke særlig gunstig å la en solcelle belastes av en konstant resistans, uansett lysstyrke. Når en skal lage en reguleringskrets som forsøker å nyttiggjøre mest mulig effekt fra solceller, må vi altså velge andre fremgangsmåter. En mulighet ville være å la solcellen levere variabel strøm (alt etter belysning), men ved konstant spenning (som vi velger selv). En annen mulighet ville være å levere variabel spenning, men ved konstant strøm. Disse to mulighetene tilsvarer arbeidslinjer som er henholdsvis loddrette eller vannrette i strøm-spenning diagrammet (se figur 8). Hvilken av disse mulighetene synes du har mest for seg? Begrunn svaret. (Hint: Arbeidslinjen må være den samme selv om belysningen varierer.)

Oppgave 3 : Kombinasjon av enkeltsolceller til et solcellepanel

Solceller brukes gjerne til å lade opp en akkumulator (“batteri”). På den måten kan en trekke strøm også når solen ikke skinner. Bruker vi en 12 V akkumulator (vanlig bilbatteri), må vi ha tilgjengelig minimum 12 V for at ladning skal kunne finne sted. Som du så av strøm-spenning kurvene i forrige oppgave, var det ikke snakk om så store spenninger fra en enkelt solcelle. Vi må derfor koble flere sammen for å oppnå høyere spenning.

Ved å koble solceller sammen i serie, kan høyere spenning oppnås, og ved å koble dem i parallell, kan høyere strøm oppnås. I solcellepanel benyttes gjerne begge slags sammenkoblinger, alt etter ønsket ytelse og bruksområde. Men slike sammenkoblinger har sine svake sider, og vi vil i denne oppgaven se hva som skjer dersom deler av et panel kommer i skygge mens andre deler fortsatt har fullt lys.

Du skal i denne oppgaven bruke to solceller samtidig, og de bør plasseres i samme avstand fra lyskilden som i de forgående oppgavene. La solcellene peke rett mot lyskilden.

Vi ønsker i denne oppgaven å bestemme maksimal effekt vi kan få ut fra to solceller under forskjellige koblinger og lysforhold. I prinsippet burde en da utarbeide strøm- spenning karakteristikken, som vist i figur 8, for hver av disse tilfellene. Dette ville føre til mye “slavearbeid”, slik en student karakteriserte det hele et tidligere år.

For å redusere arbeidsmengden, vil vi benytte en raskere, men grovere framgangsmåte.

Vi har allerede sett (figur 8) at den maksimale effekten solcellen(e) kan gi er proporsjonal med arealet i det største rektangelet som kan innesluttet innenfor strøm-spenning karakteristikken. Dette arealet er mindre enn arealet av et rektangel som omslutter karakteristikken helt. *Forholdet* mellom disse arealene vil likevel ikke endre seg så mye under ulike forhold (sammenlikn de to kurvene du fant i oppgave 2). Det vi sier er altså:

$$\frac{P_{max}}{V_{oc}I_{sc}} \approx \textit{konstant} \quad (1)$$

for en solcelle under ulike belysninger.

Dersom vi begrenser oss til å studere *forhold* mellom effekter, kan vi derfor få en god pekepinn om dette ved å se på de tilsvarende forhold mellom rektanglene som omslutter karakteristikken. Vi får faktisk at:

$$\frac{(P_{max})_1}{(P_{max})_2} \approx \frac{(V_{oc}I_{sc})_1}{(V_{oc}I_{sc})_2} \quad (2)$$

I denne formelen kan indeksene 1 og 2 henseile på ulike belysninger, men faktisk også for å sammenlikne en solcelleoppkobling med en annen mer generelt (selv ved ulikt antall celler).

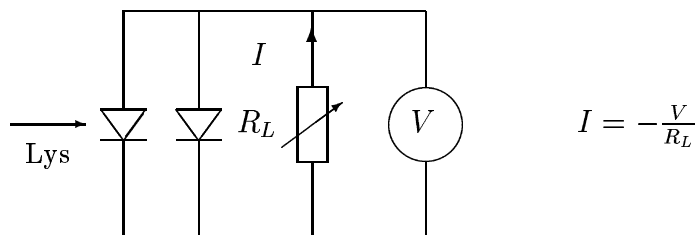
Men hva er hensikten med en slik vri? Denne prosedyren fører til en vesentlig forenkling av målingene da V_{oc} og I_{sc} (se figur 8) er langt enklere å bestemme enn det punktet på karakteristikken som leder til maksimal effekt (P_{max}).

Spenningen V_{oc} (“open circuit”) finner vi ved å gjøre R_L uendelig stor (kobles fra). Strømmen I_{sc} (“short circuit”) er noe vanskeligere å bestemme fordi dersom $R_L = 0\Omega$, ville også V være null volt, og I kunne ikke bestemmes. Størrelsen I_{sc} må derfor bestemmes som en grenseverdi for lavest mulig R_L . Motstanden R_L må allikevel være så stor at vi kan lese av spenningen V_L med brukbar nøyaktighet.

I praksis bestemmes I_{sc} ved at R_L settes lik 0.5Ω i starten, og en leser av V_L . Dersom denne spenningen da kan bestemmes med minst to gjeldende siffer, kan en bruke Ohms lov direkte for å beregne I . Dersom V_L ikke kan bestemmes med tilstrekkelig nøyaktighet, økes R_L inntil så skjer, og $I \approx I_{sc}$ kan bestemmes ut fra de da gjeldende R_L og V_L .

a. Parallellkoblede solceller

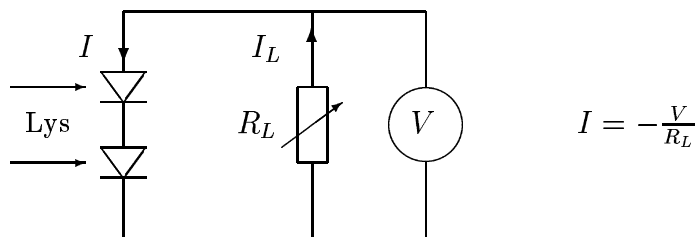
Koble opp kretsen med de to solcellene i parallell slik som vist i figur 9. Bestem V_{oc} og I_{sc} når begge solcellene er belyst. Dekk så til den ene av solcellene, og gjennomfør målingene på ny. Beregn (omtrentlig) forholdet mellom maksimal effekt fra parallellkoblingen i de to tilfellene. Gi en kommentar.



Figur 9: Oppkobling for å bestemme V_{oc} og I_{sc} for to parallellkoblede solceller.

b. Seriekoblede solceller

Koble opp kretsen med de to solcellene i serie slik som vist i figur 10. Bestem V_{oc} og I_{sc} . Dekk så til den ene av solcellene, og gjennomfør målingene på ny. Beregn (omtrentlig) forholdet mellom maksimal effekt fra seriekoblingen i de to tilfellene. Gi en kommentar. Vi håper du etter dette lett kan forstå at f.eks. et solcellepanel for hyttebruk bør plasseres slik at ikke deler av panelet lett kommer i skygge.



Figur 10: Oppkobling for å bestemme V_{oc} og I_{sc} for to seriekoblede solceller.

Dersom du har vært nøye i målinger og oppsett, skulle den maksimale effekten en kan få fra en seriekobling av to belyste solceller bli lik den maksimale effekten fra to parallellkoblede solceller. Denne effekten skulle videre være den dobbelte av maksimal effekt fra en enkel solcelle ved samme belysning. Hvordan stemmer dine data overens i så måte? Gi en kommentar.

Dataene fra oppgave 2 og 3 skulle gi et ganske godt bakgrunnsmateriale dersom du skulle lage et solcellepanel selv en gang i fremtiden!

♠ For de mest interesserte:

Du skulle nå ha tilstrekkelig kunnskap til å designe et solcellepanel selv. Ved å koble tilstrekkelig mange solceller i serie, skulle spenningen ved optimal belastning kunne komme opp i over 12 V (ved en gjennomsnittsbelysning). Hvor mange celler (omtrent) tror du det da måtte kobles i serie? Dersom disse ga strøm for å lade opp en 12 V akkumulator, måtte du ha en enkel reguleringskrets som koblet solcellene fra akkumulatoren dersom spenningen var lavere enn 12 V. Hvis ikke, ville akkumulatoren utlades gjennom solcellene når lyset ikke var kraftig nok til at ladning kunne forekomme. Dette skyldes at solcellene er koblet i lederetningen for spenning/strøm fra akkumulatoren.

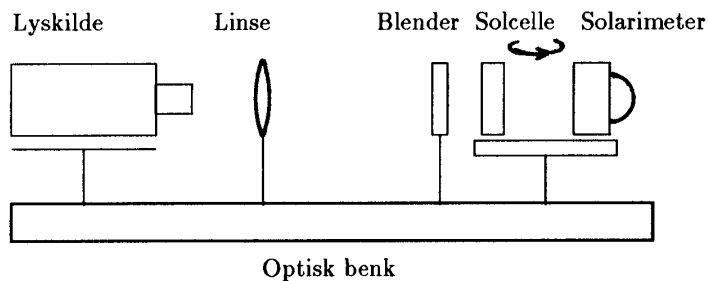
Oppgave 4 : Solcellens effektivitet.

Når vi har med enhver form for “transducer”⁴ å gjøre, vil vi gjerne vite hvilket område denne virker i, og hvor effektivt den virker innenfor dette området. Vi har sett at solcellen omsetter lys til elektrisk strøm, men er det bare synlig lys den reagerer på, og hvor effektiv er omsetningen innenfor det synlige området av elektromagnetisk stråling? Slike opplysninger er av stor interesse, og gjennom forskjellige forsøksoppstillinger kan en bestemme disse karakteristika.

I denne oppgaven skal du bestemme solcellens effektivitet i å omsette effekten i lysbildeprosjektorens lysstråle til elektrisk effekt. Vi benytter da en optisk benk (se figur 11) hvor vi kan veksle mellom solcellen og et solarimeter (pyranometer) uten at avstanden til lyskilden endres. Det er også plassert en konveks linse og en blender på den optiske benken. Med blenderen fjernet plasseres linsen slik at lysbunten er litt bredere enn solcellen på dennes plass (linsen vil da stå kun 10– 20 cm fra projektoren). Still deretter blenderen tett inn til solcellen. Mål diameteren d på det belyste området på solcellen, og beregn belyst areal $A = \pi(d/2)^2$.

Målingene gjøres da som følger: La først *solcellen* være vendt mot lyset. Mål spenning V når belastningsresistansen R_L varieres. Bestem maksimal effekt P_{ut} fra cellen. Dette kan du gjøre ved å lage en ny strøm-spenning kurve slik som i

⁴En transducer er en “omformer” som for eksempel omformer informasjon om lys, lyd, trykk osv. til elektriske signaler.



Figur 11: Optisk oppstilling for måling av solcellens effektivitet.

oppgave 2⁵, eller du kan nøye deg med å gi en tabell over målingene. Bruk tett nok med målepunkter i det aktuelle området til at du får bestemt maksimal effekt med brukbar nøyaktighet (ca. 10% eller bedre).

Snu deretter solarimeteret inn i lyset (må muligens flytte litt på eller fjerne blenderen først). Pass på at hele det svarte området er belyst. Vent en liten stund (10–20 sekund) inntil solarimeteret har stabilisert seg. Mål spenningen fra solarimeteret V_s (mellom rød og blå ledning) med et multimeter som har stor følsomhet. Du bør ha minst to gjeldende siffer! Noter også kalibreringskonstanten α (oppgitt i V/Wm^{-2}) som kalles solarimeterets følsomhet. Lysets effekt pr. flate blir da V_s/α .

Effekten som falt inn på solcellen må da ha vært:

$$P_{inn} = V_s A / \alpha$$

Fra dine direkte målinger på solcellen fant du den maksimale effekten P_{ut} for dette belyste arealet. Effektiviteten til solcellen er da:

$$\eta = \frac{P_{ut}}{P_{inn}} \cdot 100\%$$

Beregn denne og gi kommentarer til den verdien du kommer fram til.

Hvor stor effekt vil et solcellepanel på 1 m^2 maksimalt kunne gi ved en slik effektivitet? (Sollysets effekt etter å ha gått gjennom atmosfæren er gitt i innledningen til øvelsen.)

⁵**Tips:** Fra det du så i oppgave 2 vil du forstå at det er unødvendig å ta opp en *fullstendig* kurve.

Utstyrliste:

Spenningskilde, min 5 V

2 multimetre (I oppgave 4 kreves oppløsning 0.1 mV)

2 solceller

Pyranometer (solarimeter)

Dekademotstand, 0.1 – min. 1000 Ω

Optisk benk, m. linse og blender

Lysbildefremviser (brukes som lyskilde)

mm-papir

Målte verdier for strøm og spenning over en solcelle (oppgave 1).

1a. Belyst solcelle sammen med ytre spenningskilde

V (V)	V_L (V)	R_L (Ω)	I (mA)

V (V)	V_L (V)	R_L (Ω)	I (mA)

1b. Belyst solcelle som virker alene.

V (V)	V_L (V)	R_L (Ω)	I (mA)

V (V)	V_L (V)	R_L (Ω)	I (mA)

Oppgave:

$R_L(\Omega)$	$V(\text{mV})$	$I(\text{mA})$	$P(\text{mW})$

$R_L(\Omega)$	$V(\text{mV})$	$I(\text{mA})$	$P(\text{mW})$

Oppgave:

$R_L(\Omega)$	$V(\text{mV})$	$I(\text{mA})$	$P(\text{mW})$

$R_L(\Omega)$	$V(\text{mV})$	$I(\text{mA})$	$P(\text{mW})$

Oppgave:

$R_L(\Omega)$	$V(\text{mV})$	$I(\text{mA})$	$P(\text{mW})$

$R_L(\Omega)$	$V(\text{mV})$	$I(\text{mA})$	$P(\text{mW})$