

FYS 2150. SOLCELLEN

Fysisk institutt, UiO
(13.02.2017)

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.

I. Innledning

I dag har photovoltaiske (PV) solceller allerede blitt en main-stream kraftproduksjonsteknologi. Figur 1 viser den globale utviklingen av kumulativ installert PV-kapasiteter i 2000-2013 (Figur 1a), samt andel av PV-kapasitet i EU i 2013 sammenlignet med andre teknologier (Figur 1b).¹ I 2012 nådde for første gang installert PV 100 GW. Enda mer spennende, installasjon av nye PV- og vindgenerasjonskapasiteter i EU har overkommet

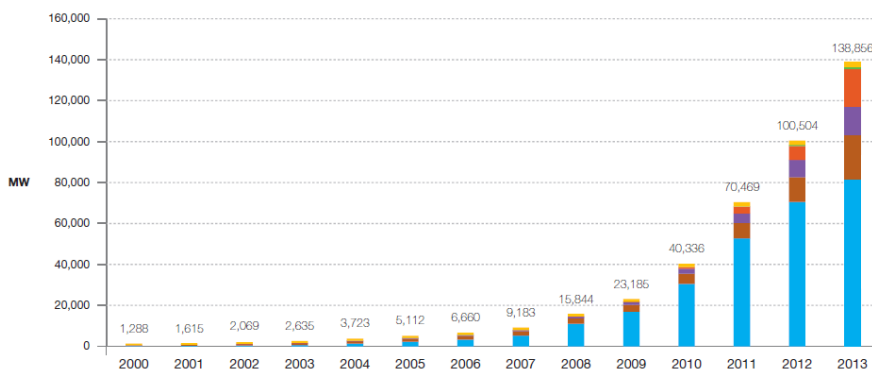


Fig. 1a Global PV kumulativ installert kapasitet i 2000-2013

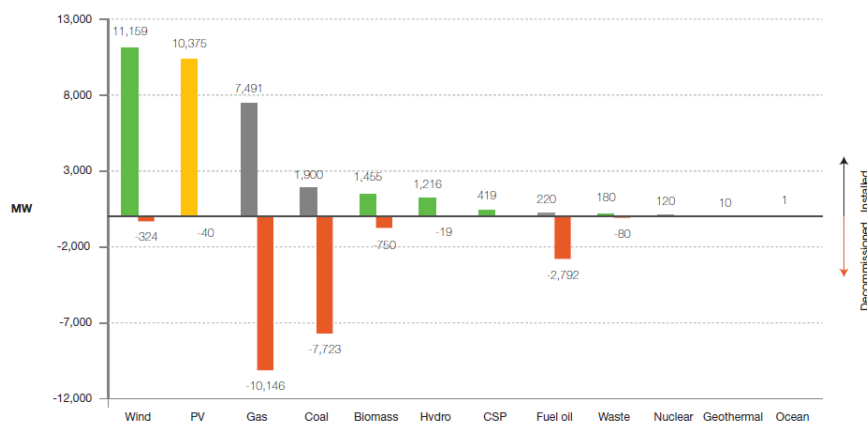


Fig. 1b Nye generasjonskapasiteter i EU i 2013

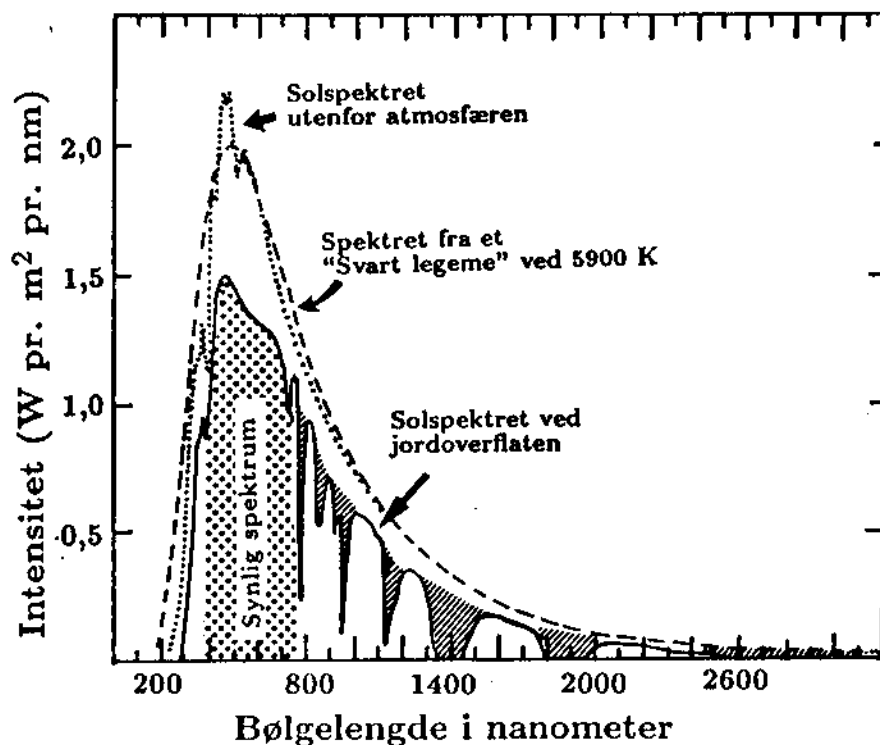
¹ EPIA • GLOBAL MARKET OUTLOOK FOR PHOTOVOLTAICS 2014-2018

alle andre "tradisjonelle" teknologier. Ja, det er flere nye solcellekraftverk bygget i EU enn for gass eller kull!

En solcelle omdanner synlig lys (og UV) direkte til elektrisk strøm. Dette er en stor fordel med solceller i forhold til mange andre energikilder. For eksempel, solceller kan skaleres ned til de minste "fornybare" strømkilder vi kjenner. Med det mener vi at det kan lages solcelleanlegg på mange kvadratmeter så vel 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 valget. Men det er noen få spilleregler du bør kjenne til, og dem 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 kortbølgede UV-strålene, og absorpsjon i vanddamp, karbondioksyd m.m. er også betydelig. De ulike absorberende stoffene i atmosfæren setter opp klare "hull" (spektralområder med relativt lav intensitet) i spekteret til lyset som kommer ned til jordoverflaten. Dette er illustrert i figur 2. Til tross for betydelige absorpsjon kommer det i middel fram ca. 950 W/m^2 til jordens



Figur 2: Spektralfordeling av solstrålingen. Strålingen ved havoverflaten er basert på at sola står i zenit (loddrett over oss), og at vanddamptrykket er 20 mm Hg. (Figuren er tatt fra Henriksen og Larsen: Ozonlaget og UV-stråling, 1989)

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? Allment tilgjengelige kommersielle solceller har en effektivitet i området 15% - 22%. Noe avanserte konsepter (tandem- eller «multijunction»-celler) kan nå en virkningsgrad på rundt 40%. Solcellene som brukes i denne øvelsen kan vise en virkningsgrad på rundt 10%. Du kan prøve å forklare en sånn lav verdi.

II. Teori

II.a. Halvledere

De vanligste solceller er laget av et halvledermateriale, og før vi går inn på oppbygning og virkemåte, kan det kanskje være nyttig å repetere eller å lære litt om halvledere generelt. Det finnes forskjellige måter å beskrive teorien på et forenklet nivå.²

Forenklet «klassisk» bilde

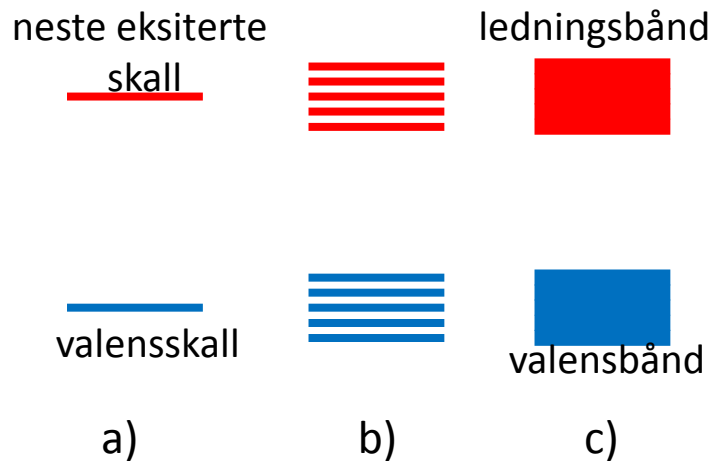
Vi tar da for oss halvledere basert på silisiumkrystaller. Silisium-atomene har fire valenselektroner hver som inngår i bindinger med naboatomene. Bindingene er organisert slik at silisium-atomene danner en krystall. Valenselektronene er bundet såpass kraftig til sitt atom (kjerne) at de ikke normalt kan flytte på seg. Ledningsevnen er derfor lav.

Får imidlertid et av elektronene tilført nok energi (f.eks. gjennom termisk eller optisk eksitering), kan det løsne og begynne å flytte fritt i krystallen. I silisium trenges det minst 1.12 eV for å løsne et elektron. 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. I andre ord, hullet flyttet til det andre atomet. Denne prosessen kan gjenta, og hullet kan migrere videre i krystallen. Jo flere elektroner som løsnes og hull dannes, dess bedre blir ledningsevnen.

Kvantummekanisk bilde

Elektroner i et atom befinner seg på elektronskall som tilsvarer hovedkvantetallet $n = 1, 2, 3, \dots$. Hvert hovedskall er oppdelt i n underskall gitt ved det azimutale kvantetallet $l = 1, 2, \dots, n-1$ som bærer de tilsvarende merkelappene s, p, d, f, ... I grunntilstanden til atomet hvor det har lavest energi, blir elektronene plassert på en slik måte i de forskjellige underskallene at det får minst energi. For eksempel, hydrogenatom har et elektron som befinner seg på 1s skall i grunntilstanden. Silisiumatom har 14 elektroner som sitter på 1s, 2s, 2p, 3s og 3p skall i grunntilstanden. Disse elektronkonfigurasjonene gir de fysiske og kjemiske egenskapene til atomene og grunnstoffene. Bindinger med andre atomer for å danne molekyler eller krystaller avhenger av elektronene i de ytterste skallene som vanligvis kalles for valensskallene.

² Man kan, for eksempel, finne flere Youtube-innlegg:
Band Theory of Solids: <https://www.youtube.com/watch?v=ots5zxb1UK>
Conductors: https://www.youtube.com/watch?v=5OZGuWYis_k
Insulators: <https://www.youtube.com/watch?v=K28nxmr7ZxY>
Semiconductors: <https://www.youtube.com/watch?v=YtX5FTJZfIw>



Figur 3. Energienivåer i et atom (a), et system med 5 atomer (b), og en krystall med ca. 10^{23} atom/cm³ (c).

Et elektron kan eksiteres til andre skall med tilføring av energi (med lys eller varme). Siden hvert skall i atomet har et bestemt energinivå, hopper elektronet til diskrete energinivåer ved eksitasjon. Men hva skjer med energinivåene hvis vi har et system med flere identiske atomer? Det viser seg at de opprinnelige energinivåene splittes til flere energinivåer. Jo flere atomer er i systemet, jo flere energinivåer. Med ca. 10^{23} atomer per cm³ i krystaller, splittes energinivåene til så mange nye tett-pakkete nivåer at de danner energibånd. Energibåndet som dannes fra valensskallet, i.e. det høyeste okkuperte båndet, kalles for *valensbånd*. Hvis båndet er fullt okkupert og ingen ledige tilstander finnes, kan elektroner ikke flytte og lage strøm mens de er i valensbåndet. Strøm blir mulig kun hvis elektronene er eksitert til det neste ikke-okkuperte energibåndet. Det neste energibåndet over valensbåndet kalles for *ledningsbånd*. Som regel, valensbånd og ledningsbånd er separert med et gap hvor ingen elektrontilstand er tillatt. Dette gapet kalles for *båndgap*. Båndgap i silisium er 1.12 eV ($E_g=1.12$ eV). Materialer med liknende elektroniske båndstrukturer kalles for halvledere.

Halvledere kan derfor virke som både ledere og isolatorer. Deres ledningsevner kan påvirkes av lys, varme eller doping med fremmede atomer.

II.b. Doping av halvledere

Silisium kan imidlertid “dopes” med fremmedatomer. Med dette mener vi at en svært liten del (ca. $1 / 10^6$) av silisium-atomene 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

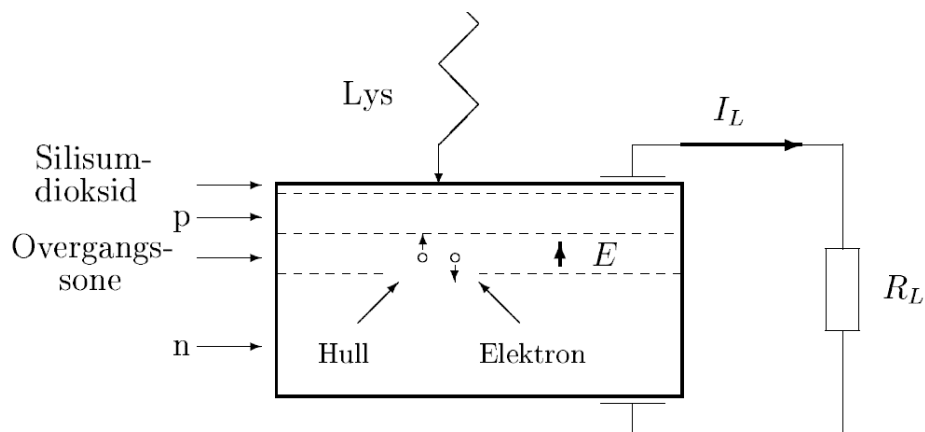
laget ved arsen-doping av silisium, sier vi er en *n-type* halvleder (n for negativ ladningsbærer).

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).

II.c. p-n overgang

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.

En solcelle består av de samme elementene som en halvlederdiode, og en skjematisk tegning av oppbygningen er vist i figur 4. 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



Figur 4: 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.

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 elektrostatisk 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.)

II.d. Effekt av belysning

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 silisiumatomer 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 løsnes og begynne å flytte i krystallen. Det er sannsynlig at elektronet kan falle tilbake til den kjernen som opprinnelig hadde det, og vi er like langt. I andre tilfeller vil elektronet likevel vandre videre. Sannsynligheten for at dette skal skje er faktisk ganske stor når elektroner befinner seg 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 $E_g = 1.12 \text{ eV}$. 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*.

Sammenheng 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.

III. Eksperimentelt

I denne øvelsen skal vi bruke følgende utstyr:

1. en lysprojektor
2. en optisk benk
3. en spenningskilde
4. to voltmetre
5. en dekademotstand
6. to solceller
7. et solarimeter
8. ledninger

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. Solarimeterets følsomhet a er oppgitt i $V/(Wm^{-2})$. 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 $4000 W/m^2$.

Usikkerhetene ved måling (viktig!)

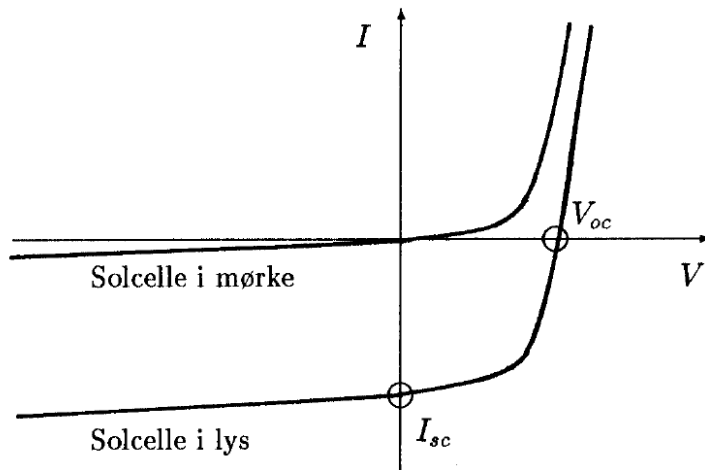
I løpet av målinger, skal dere kanskje se fluktuerende verdier på skjermene av voltmetre. Fluktuasjoner i verdiene kan komme fra ulike årsak: ustabiliteter i lysstyrke eller spenningskilden, ikke-ideelle koblinger, osv. I dette tilfellet, må dere beregne gjennomsnittsverdi og standardavvik for hvert eksperimentelt datapunkt. Det kan gjøres med å avlese tallene på skjermen flere ganger. Vanligvis, rundt 10 avlesninger per datapunkt er nok for å estimere gjennomsnittsverdien og usikkerheten.

I tillegg, kommer «device uncertainty» som er oppgitt i manualene eller tekniske spesifikasjoner for instrumentene. Hvis tekniske spesifikasjoner er utilgjengelig, kan vi estimere «instrumentusikkerhet» som den siste desimalen på skjermen.

IV. Oppgaver

Oppgave 1 : Solcellen som halvlederdiode.

Vi har nevnt at solcellen er en halvleder. Strøm-spenningskarakteristikken for solcellen i mørke minner svært mye om diodekarakteristikken, mens solcellen i lys gir et annet resultat.

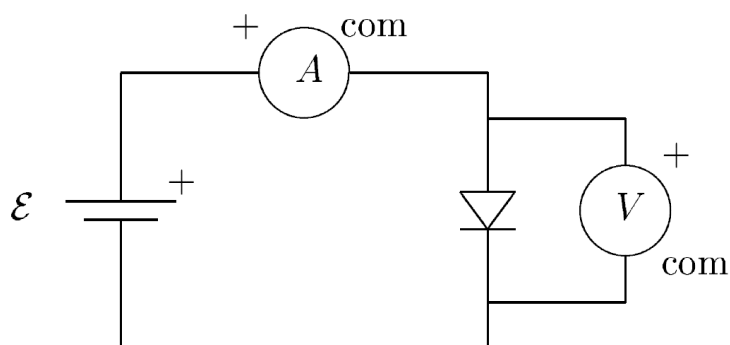


Figur 5: Strøm-spenningskarakteristikk for en solcelle. V_{oc} tilsvarer solcellens spenning med uendelig stor belastning (open circuit), og I_{sc} er den strømmen solcellen kan gi dersom den er kortsluttet (short circuit).

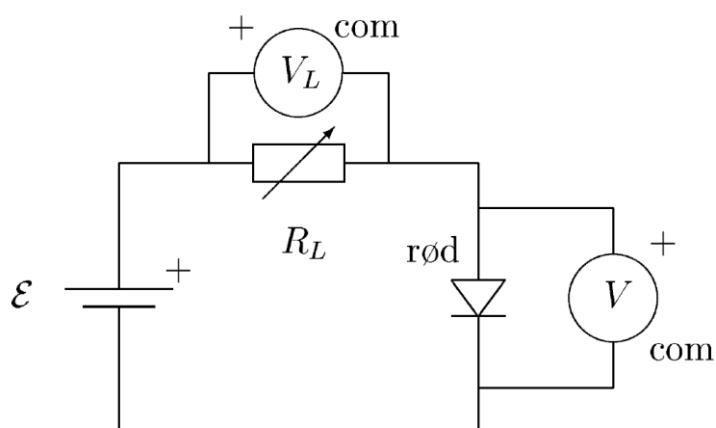
Figur 5 viser skjematisk hvordan karakteristikkene ser ut.

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

1.a. Strøm-spenningskarakteristikken for en belyst solcelle



Figur 6: Et tenkt, klassisk oppsett for måling av solcellens strøm-spenningskarakteristikk ved hjelp av en ytre spenningskilde \mathcal{E} . Oppsettet skal ikke brukes.



Figur 7: Oppsett for måling av solcellens strøm-spenningskarakteristikk ved hjelp av en ytre spenningskilde \mathcal{E} . Oppsettet viser oppkobling for måling i lederretningen. **NB:** For måling i sperreretning snus polariteten kun på \mathcal{E} .

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

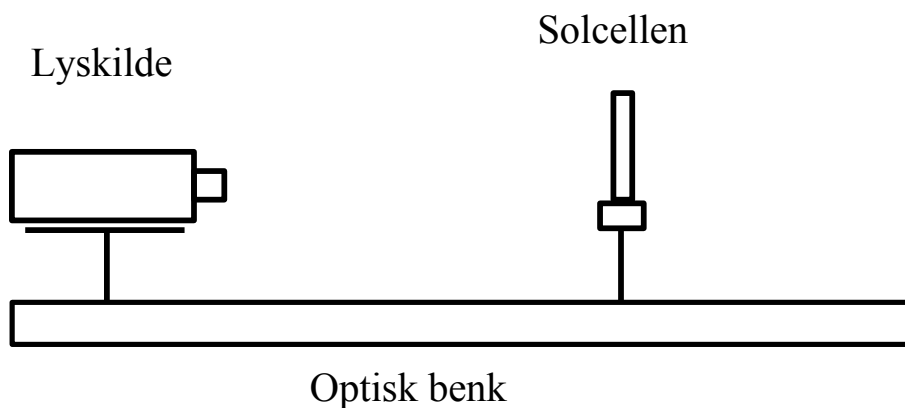
Strøm-spenningskarakteristikken baserer seg på sammenhørende verdier av strøm gjennom og spenning over solcellen. I prinsippet kunne vi brukt en oppkobling som vist i figur 6 for å oppnå disse målingene. Når lys treffer solcellen og den begynner å produsere strøm selv, vil imidlertid ikke den tradisjonelle koblingen i figur 6 være velegnet. Dette er fordi solcellen ofte krever en lavere belastningsmotstand enn den indre resistans i amperemeteret (multimeter i strøm-målingsfunksjon) for at cellen skal yte maksimalt. Vi bruker derfor koblingen gitt i figur 7.

Merk at kombinasjonen av resistansen R_L og voltmeteret V_L i praksis kan anses 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.

Plassering og kobling

Solcellen plasseres i et stativ på en optisk benk sammen med en lysbildeprojektor. Den samme optiske benken skal brukes i de neste oppgavene (Figur 8). Velg avstanden mellom solcellen og lysbildeprojektoren slik at du benytter lyset mest mulig. Husk også at vi skal måle på to solceller samtidig i enkelte oppgaver. Det kan bli lurt at avstanden holdes konstant for alle oppgavene. (NB. Pass på å unngå at solcellen får noe slag. Den kan knuses/brekkes.)



Figur 8: Optisk oppstilling for måling på solcellen.

Koble nå opp som vist på figur 7, 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):

- Mål V og V_L for fire-fem forskjellige R_L i positiv lederetning. Gjør ca. 10 avlesninger for hver R_L for å estimere usikkerheten.
- Snu polariteten på spenningskilden (men ikke rør multimetrene eller solcellen!) for å ta opp karakteristikken også i sperreretningen (negativ strøm).
- Mål V og V_L for fem-ti forskjellige R_L i negativ lederetning. Igjen, gjør ca. 10 avlesninger for hver R_L for å estimere usikkerheten.
- Plott I vs V med usikkerhetene.

Nyttige tips

1. Bruk av spenningskilden: Det anbefales å bruke det faste 5V uttaket til alle målingene.

2. For positiv strøm (“over x-aksen” i karakteristikken): Positiv spenning må kobles til rød kontakt på solcellen (slik som vist i figur 7). Avles og noter spenninger V og V_L , og motstand R_L i vedlagte skjema. Gjør 10 avlesninger for å estimere gjennomsnittsverdien

og usikkerheten for hvert målepunkt. Beregn strømmen i kretsen I med V_L og R_L . Endre så R_L på en kontrollert måte mellom 1 Ohm og 1000 Ohm. Fire-fem målepunkter er nok dersom disse velges bra.

3. For negativ strøm (“under x-aksen” i karakteristikken): Snu polariteten på spenningskilden. 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. Mål V , V_L og R_L , og beregn I . Husk å estimere usikkerhetene. 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.

Måleresultatene fra denne oppgaven (og fra **b**) bør plottes mens du foretar målingene. Resultater for **a** og **b** skal plottes i samme diagram. Husk å vise usikkerhetene i grafen.

MERK: Bruk aldri lavere verdi på R_L , enn 0.5 Ohm. Begrunnelse: Det er alltid en del resistans i ledningsføring og bananplugg. 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 Ohm), mens den egentlig er en del høyere på grunn av lednings- og kontakt-resistanser. Dersom du ikke går lavere enn 0.5 Ohm 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**.

1.b. Solcellen uten ytre spenningskilde

I **1a** bestemte du den belyste solcellens karakteristikk 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 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!). Multimetre V viser spenning over solcellen (med fortegn).

Varier R_L fra 0.5 Ohm til f.eks. 1000 Ohm, og les av spenningen for disse ytterverdiene og 5-7 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. Også husk å gjøre flere avlesninger (10 er anbefalt) av V og V_L per hvert målepunkt for å estimere usikkerheten.

Bestem I_{sc} og V_{oc} som er viktige parametre til solcellen. 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 $R_L = 0$ Ohm, ville også V være 0 V, 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.

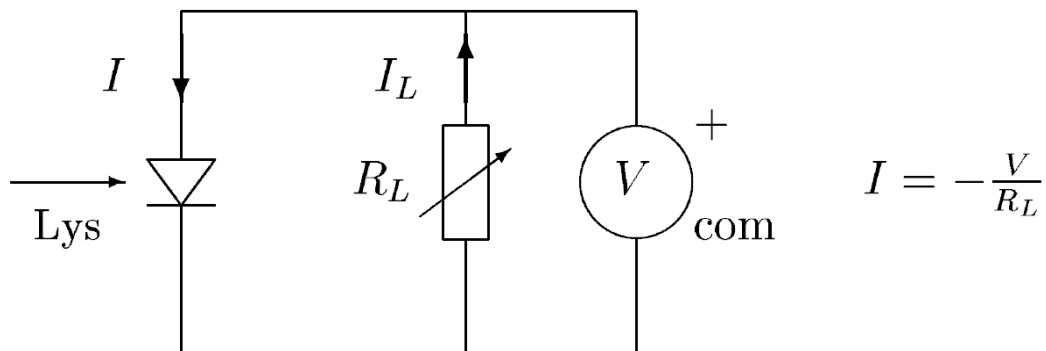
I praksis bestemmes I_{sc} ved at R_L settes lik 0.5 Ohm i starten, og en leser av V_L . Dersom denne spenningen da kan bestemmes med minst to gjeldende siffer, kan en bruke Ohms lov direkte for å beregne I . Dersom V_L ikke kan bestemmes med tilstrekkelig nøyaktighet, økes R_L inntil så skjer, og $I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

Tegn inn, i det samme diagrammet som ble brukt i **a**, karakteristikken til solcellen når den virker uten ytre spenningskilde. Husk å vise usikkerhetene. 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 9. Strømmen blir da $I = -V/R_L$ som du fort skjønner ved å studere figur 9 og/eller ved å sammenlikne med opplegget i **oppgave 1b**.



Figur 9: 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 (0.5 Ohm) 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-spenningskurvene for solcellen mens målingene pågår (for å ikke ta unødvendig mange målinger). For å spare tid, kan vi anta at usikkerhetene i denne oppgaven er like til usikkerhetene i **oppgave 1b**.

Tegn til slutt strøm-spenningskarakteristikkene de for fullt belyste og de redusert belyste solcellene i samme diagram.

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.

Du kan nå plote effekt P som funksjon av lastmotstanden R_L . 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?

I tillegg kan du nå finne optimale strøm (I_{max}) og spenning (V_{max}) som gir maksimal effekt

(P_{max}). Marker I_{max} og P_{max} i I-V grafen. Sammenlign I_{max} og V_{max} med I_{sc} og V_{oc} . Beregn forholdet $P_{max}/(V_{oc}I_{sc})$ for både full belyst solcelle og den med reduserte belysningen.

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 for hver av disse tilfellene. For å redusere arbeidsmengden, vil vi benytte en raskere, men grovere framgangsmåte.

Forholdet mellom P_{max} og $(V_{oc}I_{sc})$ har et eget navn: *fill factor* (på engelsk). Det er vanligvis antatt at *fill factor* (FF) er en karakteristikk av solcellen og ikke er avhengig av eksterne forhold (som belysningsintensitet, antall solceller i en panel). Det vi sier er altså:

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

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 $V_{oc}I_{sc}$. Vi får faktisk at:

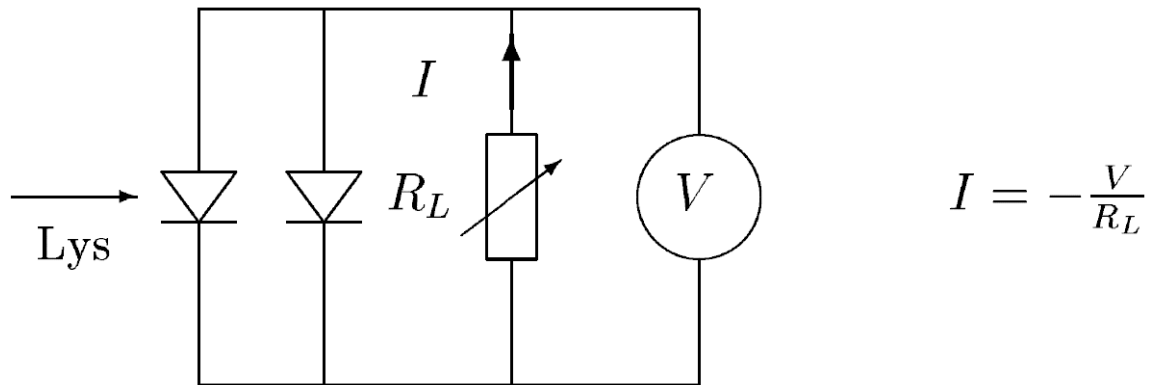
$$\frac{(P_{max})_1}{(P_{max})_2} \approx \frac{(V_{oc}I_{sc})_1}{(V_{oc}I_{sc})_2} \quad (2)$$

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).

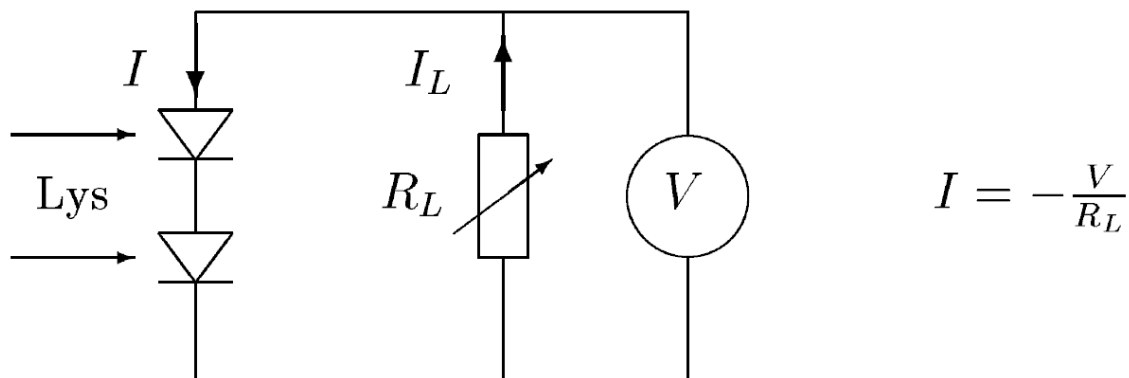
Men hva er hensikten med en slik vri? Denne prosedyren fører til en vesentlig forenkling av målingene da V_{oc} og I_{sc} er langt enklere å bestemme enn det punktet på karakteristikken som leder til maksimal effekt (P_{max}).

a. Parallellkoblede solceller

Koble opp kretsen med de to solcellene i parallell slik som vist i figur 10. Bestem V_{oc} og I_{sc} når begge solcellene er belyst. Dekk så til den ene av solcellene, og gjennomfør målingene av V_{oc} og I_{sc} på ny. Beregn (omtrentlig) forholdet mellom maksimal effekt fra parallellkoblingen i de to tilfellene. Gi en kommentar.



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



Figur 11: Oppkobling for å bestemme V_{oc} og I_{sc} for to seriekoblede solceller.

b. Serie-koblede solceller

Koble opp kretsen med de to solcellene i serie slik som vist i figur 11. Bestem V_{oc} og I_{sc} . Dekk så til den ene av solcellene, og gjennomfør målingene av V_{oc} og I_{sc} 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.

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!

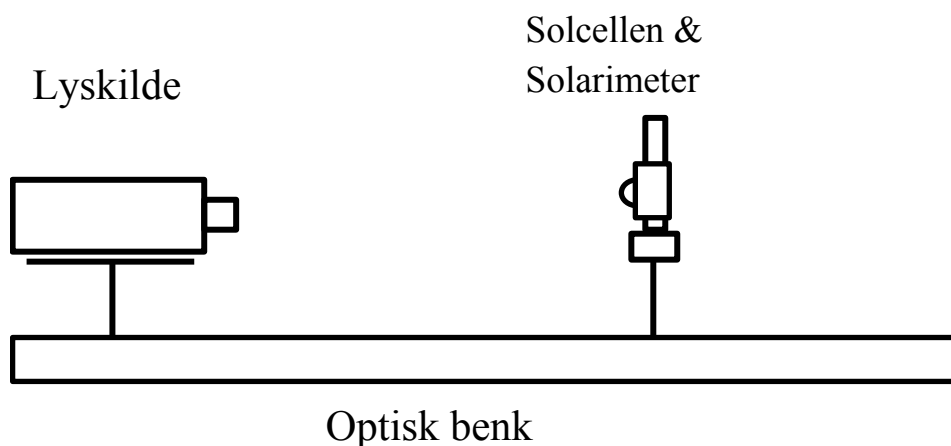
Oppgave 4 : Solcellens effektivitet

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 lysbildeprojektorens lysstråle til elektrisk effekt. Vi benytter da en optisk benk (se figur 12) hvor vi kan sette solcellen og et solarimeter (pyranometer) ved siden av hverandre.

Målingene gjøres da som følger: La *solcellen* stå som i tidligere oppgaver. Siden geometrien er den samme, kan du bruke strøm-spenningskarakteristikken fra **1b**.

Sett solarimeteret ved siden av solcellen. 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 a (oppført i V/Wm^{-2}) som kalles solarimeterets følsomhet. Lysets effekt pr. flate blir da V_s/a .



Figur 12: Optisk oppstilling for måling av solcellens effektivitet.

Effekten som falt inn på solcellen må da ha vært:

$$P_{inn} = V_s A / a$$

Fra dine direkte målinger på solcellen (**oppgaver 1b og 2**) fant du den maksimale effekten P_{max} . Effektiviteten til solcellen er da:

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

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.)

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

1a. Belyst solcelle sammen med ytre spenningskilde

$V (V)$	$V_L (V)$	$R_L (\Omega)$	$I (mA)$

$V (V)$	$V_L (V)$	$R_L (\Omega)$	$I (mA)$

1b. Belyst solcelle som virker alene

$V (V)$	$V_L (V)$	$R_L (\Omega)$	$I (mA)$

$V (V)$	$V_L (V)$	$R_L (\Omega)$	$I (mA)$

Oppgave 2-4

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

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

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

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

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

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