



LUNDS UNIVERSITET

# Solceller — En workshop för gymnasieelever

Eddie Profaska Dzankic

Kandidatuppsats

Fysiska institutionen

Avdelningen för fasta tillståndets fysik

Lunds Universitet

Handledare: Dan Hessman

Biträdande handledare: Magnus Borgström

Examinator: Carina Fasth

25 juni 2026

# Innehåll

<b>Abstract</b>	<b>3</b>
<b>1 Introduktion</b>	<b>4</b>
<b>2 Laborationshandledning</b>	<b>5</b>
2.1 Syfte . . . . .	5
2.2 Teori för gymnasieelever . . . . .	5
2.2.1 Halvledare . . . . .	5
2.2.2 Valensband och ledningsband . . . . .	6
2.2.3 Elektroner och hål . . . . .	7
2.2.4 Dopning . . . . .	8
2.2.5 pn-övergångar . . . . .	9
2.2.6 Absorption av fotoner . . . . .	11
2.2.7 Dioder . . . . .	12
2.2.8 Solceller . . . . .	12
2.3 Fördjupning av teorin . . . . .	13
2.3.1 pn-övergången i mörker . . . . .	13
2.3.2 Framspänning och backspänning . . . . .	13
2.3.3 Pn-övergången i ljus . . . . .	14
2.3.4 Diodekvationen . . . . .	15
2.3.5 Ferminivåer . . . . .	19
2.3.6 Luminans . . . . .	20
2.3.7 Solcellens verkningsgrad . . . . .	20
2.3.8 Tandemceller . . . . .	20
2.3.9 Solcellers roll i samhället . . . . .	21
2.3.10 Lysdioder . . . . .	21
2.4 Laborationsinstruktioner . . . . .	22
2.4.1 Koppling . . . . .	22
2.4.2 Mät spänningen vid öppen krets . . . . .	23
2.4.3 Mät kortslutningsströmmen . . . . .	23
2.4.4 Mät spänning och ström vid rumsbelysning . . . . .	24

2.4.5	Mät spänning och ström vid stark belysning . . . . .	24
2.4.6	Rita grafer . . . . .	24
2.4.7	Få en lysdiod att lysa med hjälp av solceller . . . . .	24
2.5	Extra labbinstruktioner vid mån av tid . . . . .	25
2.5.1	Skapa en graf för effekten . . . . .	25
2.5.2	Mätvärden i svag belysning . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Resultat</b>	<b>25</b>
3.1	Utförandet av laborationen . . . . .	26
3.2	Mätvärden och grafer . . . . .	28
3.2.1	Mät spänning vid öppen krets . . . . .	29
3.2.2	Mät kortslutningsströmmen . . . . .	29
3.2.3	Mät spänning och ström vid rumsbelysning . . . . .	29
3.2.4	Mät spänning och ström vid stark belysning . . . . .	30
3.2.5	Få en lysdiod att lysa med hjälp av solceller . . . . .	31
3.2.6	Skapa en graf för effekten . . . . .	31
3.2.7	Mätvärden i svag belysning . . . . .	33
3.3	Feedback från klassens lärare . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>34</b>
4.1	Diskussion om praktiska förbättringar . . . . .	34
4.2	Diskussion om innehållet . . . . .	35
4.3	Tack . . . . .	39
	<b>Referenser</b>	<b>40</b>

## Abstract

Most secondary school curriculums in the world don't include semiconductor physics. The fact that it is not included is considered a mistake by many physicists and engineers, considering it is a massive part of modern technology. Amongst these technologies are transistors, LED:s, screens and solar cells. This thesis attempts to use solar cells to give an example of how semiconductor physics can be included in the curriculums of secondary schools. In order to show that it can be done, and give inspiration to others to build their own material, a workshop was made. The workshop included a theory session and a laboratory session. The theory session went through the basics of semiconductors and specifically solar cells. After that a lab was held in which every student did measurements on real solar cells as well as used them as a voltage source. The workshop was tested at a secondary school in Skåne, Sweden. Some feedback was taken and observations were made to describe how this workshop went and which ways it might be improved and built upon.

# 1 Introduktion

Världen vi lever i är helt beroende av teknik. Större delen av den teknik som existerar är i sin tur beroende av halvledare. Lysdioder (LED), bildskärmar, solpaneler och i synnerhet transistorer är exempel på teknologi som består av halvledare. Den gren av fysik som kallas fasta tillståndets fysik beskriver hur halvledare fungerar och kan användas inom teknologin. Trots detta finns det minimal information om just fasta tillståndets fysik inom flera av de internationella läroplanerna på gymnasienivå. Det svenska skolverkets läroplan för fysik[1], internationella “A-levels” (IAL)-läroplanen[2, p. 10] och “international baccalaureate”-läroplanen (IBDP)[3] har alla det gemensamt. De saknar fasta tillståndets fysik och i synnerhet finns ingen halvledarfysik alls i läroplanerna. Halvledarfysik är den gren av fasta tillståndets fysik som hanterar halvledare. För tillfället finns halvledarfysik endast tillgängligt för gymnasieelever i kursen 'Fysik 3'. Denna kurs ges inte på alla gymnasieskolor och är inte med i det svenska skolverkets läroplan. Den fysik som finns i kurserna kallade 'fysik 1' och 'fysik 2' är dock med i den svenska läroplanen. Denna fysik inkluderar bland annat mekanik, elektricitet, våglära, kärnfysik, magnetism, kvantfysik och astrofysik. Målet med detta kandidatarbete är att det kan användas som en resurs av gymnasielärare för att inkludera halvledarfysik i undervisningen. Möjligtvis som ett tillägg till undervisningen i kursen 'fysik 2' eller kursen 'fysik 3' då materialet går djupare in i fysiken om solceller än det görs i 'fysik 3'. Alternativt skulle detta arbete kunna vara inspiration till andra laborationer och workshops som syftar till att få med halvledarfysik i undervisningen på gymnasiet.

Arbetet har resulterat i en workshop om halvledare för gymnasieelever. Workshopen antar en förståelse av kursen 'fysik 1'. Workshopen är uppdelad i två delar: en föreläsning och en laboration. Totalt förväntas den ta ungefär 3 timmar. Båda delar hanterar främst solceller. På så sätt ges både ett praktiskt och teoretiskt perspektiv på hur solceller fungerar. Även ellära och matematik, samt kopplingar till våglära från kursen i fysik 2, inkluderades i workshopen. Med tanke på att utvecklingen av förnybara energikällor, och i synnerhet solceller, sågs av Science Magazine[4] som “Årets genombrott” år 2025 så är solceller sannolikt en viktig teknologi för eleverna att lära sig om. För workshopens laboration rekommenderas det finnas åtminstone en lärare per 10 elever.

Koncept såsom dopning, halvledare, dioder, fotovoltaik och andra relaterade delar av halvledarfysik, är inkluderade i workshopen. Det är även värt att nämna att inspirationen till detta kandidatarbete är delvis tagen från Andrea Wongs kandidatarbete[5]. I hennes kandidatarbete inom fasta tillståndets fysik gör hon en works-

hop med fokus på lysdioder. Även en laboration om optokomponenter från kursen ESSF20 inom komponentfysik på Lunds Universitet[6] har varit till stor inspiration för workshopens laboration. Denna kursen ges bland annat för studenterna på Civilingenjörsprogrammet inom elektroteknik.

Rapporten är uppdelad på så sätt att laborationshandledningen, som eleverna fick utdelade under workshopen, är en ett eget kapitel och därefter finns resultat och diskussion om workshopen som separata kapitel.

## **2 Laborationshandledning**

### **2.1 Syfte**

Syftet med laborationen är att få en grundläggande förståelse av halvledarfysik, genom att laborera med solceller. En förståelse av hur solceller fungerar innebär en förståelse för koncept inom halvledarfysik. Bland dessa koncept är bandgap, ledningsband, valensband, dopning, pn-övergångar, utarmningsområdet, fria laddningar och dioder. Testa gärna er själva på om ni vet vad dessa begrepp betyder i laborationens slut. En förståelse av dessa begrepp är viktigt då all modern elektronik består av halvledare.

### **2.2 Teori för gymnasieelever**

#### **2.2.1 Halvledare**

Halvledare är ämnen som används i produktionen av modern elektronik. och även för att skapa solceller. Halvledarna är, som namnet tyder på, varken ledare eller isolatorer. De är ett mellanting. Ämnen som ligger i grupp 4 i det periodiska systemet, såsom kisel, är naturliga halvledare. Man kan även producera halvledare genom att kombinera material från olika grupper. Vanliga kombinationer som används är material från grupp 3 tillsammans med material från grupp 5, samt material från grupp 6 tillsammans med material från grupp 2. Det finns vissa skillnader i egenskaper beroende på vilka ämnen halvledaren består av. Detta kan till exempel innebära att vissa halvledare är bättre än andra på att absorbera specifika våglängder av ljus. Periodiska systemet syns i figur 1.

Groups																					
1																	8				
H																	He				
Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn										

Figur 1: Periodiska systemet med nummer på grupperna[7]

Ämnet kisel är i grupp 4 i det periodiska systemet och har därmed just fyra valenselektroner. Om man har en halvledare av kisel så består halvledaren av många kiselatomer. Dessa atomer bildar kovalenta bindningar med varandra så att alla kiselatomer omges av 8 valenselektroner, vilket är stabilt för atomerna.

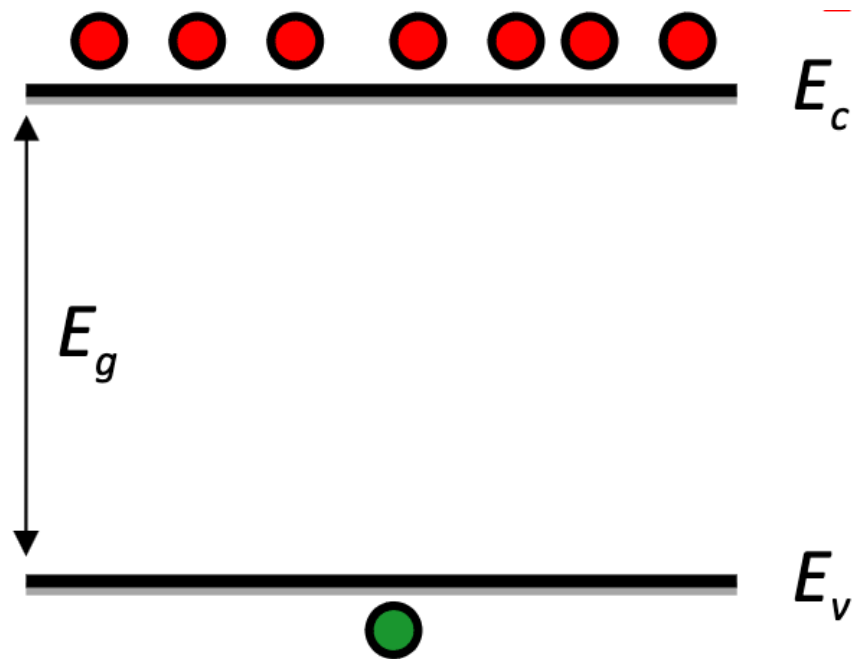
### 2.2.2 Valensband och ledningsband

Hos halvledare finns två energiband som elektronerna kan befinna sig i. Det lägre bandet är valensbandet, som är fullt och därmed kan elektronerna inte röra sig där. Därför kan dessa elektroner inte bidra till en ström. Det högre bandet är ledningsbandet, som normalt är tomt men om det finns elektroner där kan de röra sig och bidra till en ström.

Om en av elektronerna i en halvledare får tillräckligt med energi (till exempel genom att det lyser ljus på den) så kommer elektronen att hoppa upp till det högre energibandet. Den kommer att hamna i ledningsbandet där elektronerna kan bidra till en ström. Men det finns även andra sätt att bidra med energi nog för att elektroner ska hamna i ledningsbandet. Till exempel kan värme orsaka att elektroner hoppar upp till det högre bandet. Detta innebär att halvledare har olika ledningsförmåga i olika temperaturer. Ju kallare det är desto mindre elektroner finns i ledningsbandet, vilket innebär att halvledaren beter sig mer som en isolator. Ju varmare det är, desto fler elektroner hamnar i ledningsbandet och därmed beter sig halvledaren mer som

en metall.

Bandgap är ett begrepp för den minsta mängden energi som krävs för att flytta upp en elektron från valensbandet till ledningsbandet. Bandgapen varierar i storlek för olika halvledare. Detta kan man använda sig av för att till exempel skapa lysdioder som lyser i olika färger beroende på bandgapet som används. Bandgapet, ledningsbandet och valensbandet syns i figur 2.



Figur 2: En halvledare där valensbandet är benämnt  $E_v$  och ledningsbandet är benämnt  $E_c$ .  $E_g$  är bandgapets energi. Värt att notera är att det finns fler av de röda laddningarna (elektronerna) än de gröna (hål) i just denna halvledaren. Varför det är så framkommer i kapitlet om elektroner och hål, samt kapitlet om dopning.

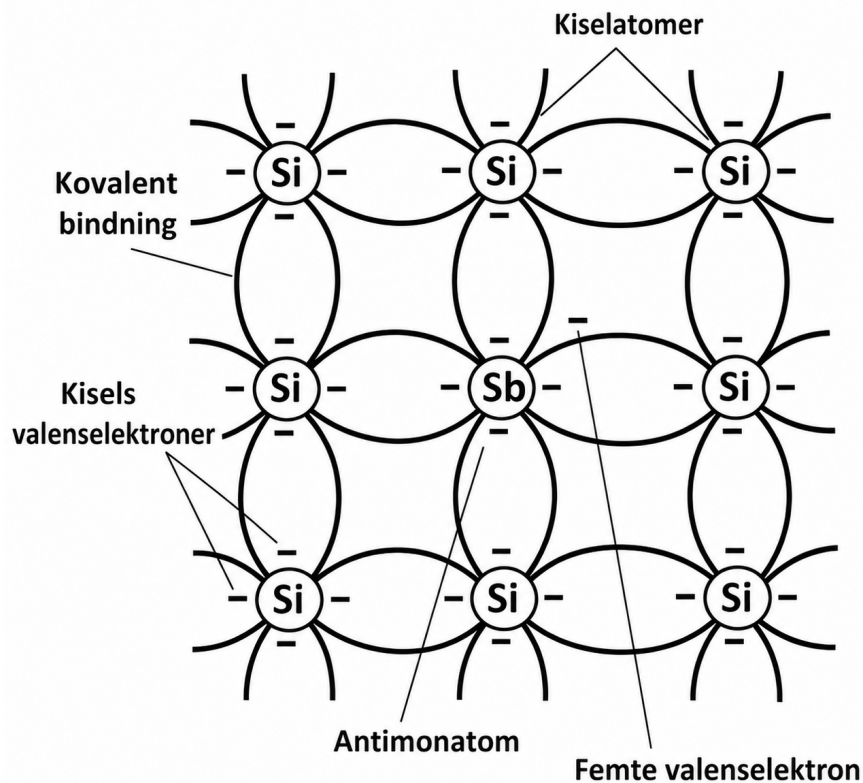
### 2.2.3 Elektroner och hål

När en elektron flyttar upp till ledningsbandet så kan det även ses som att det skapas ett hål, där elektronen tidigare var, i valensbandet. Hela processen kallas för elektron-hål generation. Detta hålet kan också ses som en positiv laddning som bidrar till ström på samma sätt som en elektron gör i ledningsbandet. Konceptet av hål kan begripas genom en analogi om bubblor. När bubblor rör sig i en vätska är det egentligen vätskan som rör sig, men det är enklare att beskriva det som att bubblorna (hål) rör sig åt motsatt håll som vätskan. På samma sätt kan man välja att se det som att ett hål rör sig åt motsatt håll som elektronerna i valensbandet, även om det egentligen är elektronerna som rör på sig.

### 2.2.4 Dopning

Det är sällan det bara används ett halvledarmaterial från grupp 4 i periodiska systemet, för att skapa solceller. Det som ofta sker istället är att man tar ett halvledarmaterial som exempelvis kisel från grupp 4 och tillsätter en liten mängd av ett ämne från grupp 5, i en process som kallas för dopning. Det nämnda fallet är en såkallad n-dopad halvledare. Det innebär att eftersom ämnen i grupp 5 har en mer valenselektron än de i grupp 4 så kommer det finnas en del elektroner över som blir fria när dessa ämnen kombineras. Därmed fås ett överflöde av fria och negativt laddade elektroner. Dopning kan dock också leda till att det skapas fler fria hål som då är positivt laddade. Det kallas för en p-typ halvledare. Det sker om man tar ett halvledarmaterial från grupp 4 och tillsätter en liten mängd av ett ämne från grupp 3.

Det som egentligen sker när man tillsätter en liten mängd av ett ämne är att vissa av halvledarmaterialets (från grupp 4) atomer plockas bort och byts ut mot antingen atomer från grupp 5 (vid n-dopning) eller atomer från grupp 3 (vid p-dopning). Därmed får vi antingen en ökning av fria elektroner eller fria hål som kan flytta sig fritt mellan alla atomer. De fria laddningarna är de laddningarna som kan bidra till att materialet leder ström. I figur 3 syns ett exempel på hur en extra fri elektron blir till vid dopning av halvledare.

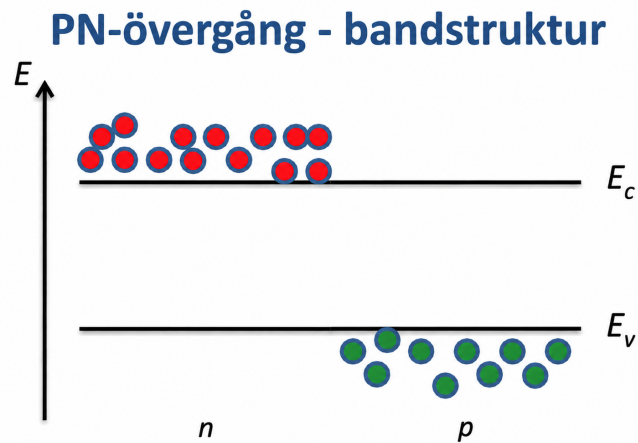


Figur 3: Ett exempel på N-typ dopning av kisel (Si), där dopningsmaterialet är Antimon (Sb). I det här fallet har alltså en kisel-atom bytts ut mot en antimonatom, varpå en extra fri elektron fås. De svarta linjerna mellan atomerna visar kovalenta bindningar. Denna figur var från wikimedia men är modifierad med hjälp av AI[8].

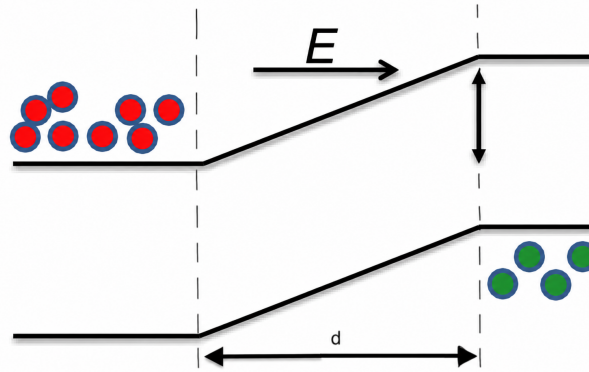
### 2.2.5 pn-övergångar

Om en p-dopad halvledare sätts ihop med en n-dopad halvledare skapas en så kallad pn-övergång. På grund av att den n-dopade delen har fler lösa elektroner så kommer dessa elektroner att flöda över till p-sidan i en process som kallas diffusion. På samma sätt kommer överflödet av hål på p-sidan att leda till att några av dessa flyttar över till n-sidan. Dock sker inte diffusionen tills koncentrationen av hål och elektroner är samma på båda sidor, utan processen slutar innan dess. Det är på grund av att det bildas ett elektriskt fält som motverkar diffusionen. Den här fältet är resultatet av att fria elektroner gått över från n-sidan till p-sidan. Samtidigt har många fria hål gått motsatt håll. De laddningar som på grund av diffusion går över till motsatt sida av pn-övergången rekombinerar, det vill säga en elektronen från ledningsbandet åker ner i valensbandet och fyller upp ett hål, varpå hålet försvinner. På grund av att vissa av hålen har gått över till n-sidan och rekombinerat så lämnar de nu en brist på positiva laddningar (hål) på p-sidan. Det skapas även en brist av

elektroner på n-sidan av de elektroner som gått över till p-sidan och rekombinerat. Detta ger upphov till en liten negativ laddning på p-sidan och en liten positiv laddning på n-sidan. Tillsammans skapar dessa laddningar ett elektriskt fält över det så kallade utarmningsområdet[6]. Utarmningsområdet bemärks  $d$  i figur 5. I figur 4 syns pn-övergången innan diffusionen har börjat och i figur 5 visas pn-övergången efter att utarmningsområdet är färdigbildat. Det elektriska fältet visas i figur 5 som höjdskillnaden mellan p-sidan och n-sidan. Värt att nämna är att diffusionen i en pn-övergång ger upphov till en diffusionsström. Samtidigt ger det elektriska fältet över utarmningsområdet upphov till en driftström. Driftströmmen går i motsatt riktning till diffusionsströmmen och om de är lika stora är pn-övergången i jämvikt. Alltså finns det ingen ström eller spänning då.



Figur 4: I figuren är pn-övergången visualiserad innan utarmningsområdet har hunnits bildas av laddningarnas diffusion.  $E_c$  är undre kanten av ledningsbandet och  $E_v$  är övre kanten av valensbandet.  $E$  står i denna figur för energi. n-sidan och p-sidan är markerade med respektive bokstav.



Figur 5: I figuren har utarmningsområdet bildats och diffusionen har stannat av. Notera att  $E$  står för elektriskt fält i denna figur, vilket skiljer sig från  $E$  i figur 4 där  $E$  står för energi.

### 2.2.6 Absorption av fotoner

När fotoner träffar halvledare kan 3 olika scenarion ske. Vilket scenario det blir beror på energin som fotonen har, samt hur stort halvledarens bandgapsenergi är. Nedan står  $E_g$  för bandgapsenergin och  $E_f$  står för fotonenergin:

- $E_g > E_f$ : Det första är att fotonenergin är mindre än bandgapets energi och då passerar fotonerna rakt igenom materialet utan att absorberas.
- $E_g = E_f$ : Det andra scenariot är om fotonenergin är lika med bandgapets energi. Då absorberas fotonen utan att någon energi slösas. Alltså går då all energi till att skapa ett elektron-hål par. Då åker en elektron upp från valensbandet till ledningsbandet och den blir därmed en fri elektron. Samtidigt skapas ett fritt hål i valensbandet.
- $E_g < E_f$ : Det tredje scenariot är att fotonenergin är större än bandgapets energi. Då absorberas fotonen och skapar ett elektron-hål par. Dock kommer det att bli en överskottsenergi då energin som krävs för att skapa elektron-hål paret är mindre än fotonenergin. Denna överskottsenergi kommer att släppas ut som värme.[9]. Denna energiförlust är en fundamental sådan inom solcellsteknik.

Energien  $E$  för en foton av en specifik våglängd  $\lambda$  kan beräknas med ekvation 1 och 2.  $C$  är ljusets hastighet på 300000 km/s,  $f$  står för frekvens och  $h$  är Plancks konstant som är ungefär  $6,26 * 10^{-34}$  Js :

$$E = h * f \tag{1}$$

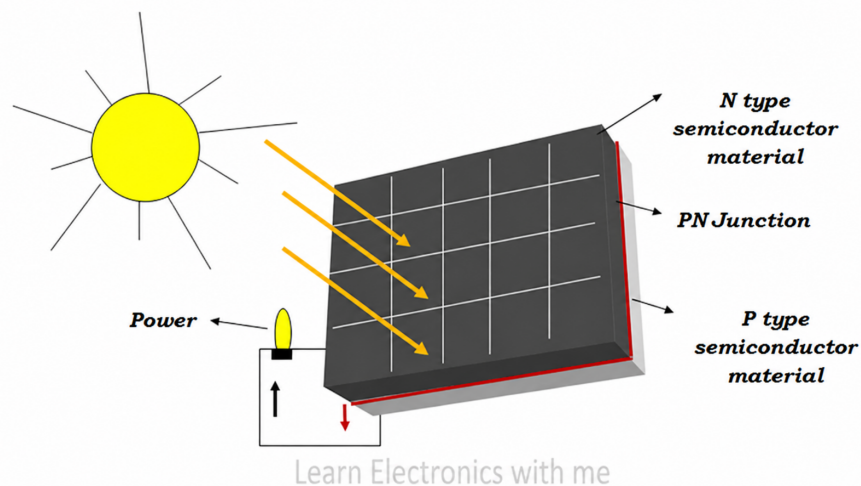
$$f = \frac{c}{\lambda} \tag{2}$$

### 2.2.7 Dioder

En diod är en komponent som endast leder ström åt ett håll. Dioder är ofta en p-dopad halvledare ihopsatt med en n-dopad halvledare, d.v.s som den tidigare nämnda pn-övergången. Dioder kan ha flertalet användningsområden. Bland annat kan de användas för att likrikta en växelström, för detektion av ljus, samt för emission av ljus. Även transistorer kan skapas med hjälp av dioder. Anledningen till att dioderna endast kan leda ström åt ett håll är just det elektriska fält som tidigare nämnts skapas över utarmningsområdet i en pn-övergång.

### 2.2.8 Solceller

En av diodens funktioner är som solcell. När ljus når en pn-övergång så sker den fotovoltaik som beskrevs tidigare. Ett elektron-hål par genereras och beroende på var det genereras i pn-övergången så kan det bli en del av en ström. Om elektronen genereras i utarmningsområdet kommer den kunna bidra till en ström. Att fotone energi omvandlas till elektricitet på detta vis kallas för fotovoltaik. Om elektronen genereras utanför utarmningsområdet kommer endast rekombination att ske. Alltså åker elektronen ner i valensbandet igen och fyller ett av hålen. Ju mer solljus (fotoner) som träffar pn-övergången med rätt energi, ju mer fria elektroner och hål kommer att genereras på rätt ställe i pn-övergången. Det leder i sin tur till mer ström om man gör pn-övergången till en sluten krets enligt figur 6[10]. Elektronerna som genereras i utarmningsområdet dras över till n-sidan och kan sedan åka genom en extern sladd för att komma till p-sidan. När elektronen väl kommer över från n-sidan till p-sidan så hamnar den i valensbandet där den rekombinerar med ett hål. Den har därmed hamnat i ett lägre energitillstånd. Finns det en last mellan n och p-sidan så kommer en effekt att genereras. Exempelvis skulle denna last kunna vara en lysdiod.



Figur 6: En solcell där en sluten krets har skapats genom att koppla ihop p och n-delarna. Strömmen illustreras genom att lampan lyser.

## 2.3 Fördjupning av teorin

Följande teori är för lärare som vill förstå mer av vad det är som sker under workshopen. Även nyfikna elever kan läsa denna fördjupning.

### 2.3.1 pn-övergången i mörker

Om pn-övergången inte belyses så kommer mycket få elektroner att exciteras upp från valensbandet till ledningsbandet. Detta innebär att det uppstår väldigt få fria elektroner och hål som kan leda ström. I mörker finns både en diffusionsström och en driftström. De är av samma storlek i motsatt riktning och tar ut varandra. Därmed hamnar pn-övergången i så kallad jämvikt och ingen ström eller spänning bildas.

### 2.3.2 Framspänning och backspänning

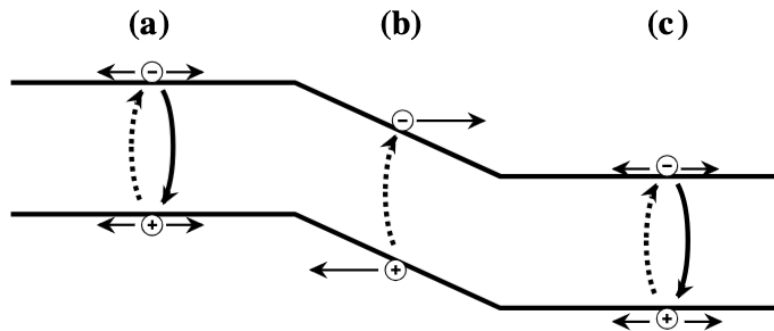
Framspänning innebär att en utomstående spänning, som motverkar det elektriska fältet över utarmningsområdet, läggs på pn-övergången[11]. Att en utomstående spänning läggs på kallas även för biasering. Denna utomstående spänning minskar utarmningsområdet. När utarmningsområdet blir mindre så är det enklare för diffusion att ske eftersom utarmningsområdets elektriska fält, som motverkar diffusionen, alltså har minskat.

Motsatsen till framspänning är backspänning. Vid backspänning så läggs en utomstående spänning på som förstör det inbyggda elektriska fältet över utarmningsom-

rådet. Utarmningsområdet blir större. Därmed blir det ännu svårare för elektroner att diffundera över utarmningsområdet.

### 2.3.3 Pn-övergången i ljus

Diffusion beskrevs i rubrik 2.5 'PN-övergångar' som att elektroner sprider sig från där det är en stor koncentration av elektroner till där det är en mindre koncentration elektroner. Diffusionen leder, som tidigare nämnt, till att pn-övergången får ett utarmningsområde med ett inbyggt elektriskt fält. Om en foton av tillräcklig energi träffar en solcell kommer en elektron att exciteras upp till ledningsbandet. Om denna elektron exciteras upp inom just utarmningsområdet (scenario b i figur 7) i ledningsbandet så kommer elektronen att 'åka ner för lutningen' till n-sidan där elektronen kan bidra till en ström. Lutningen illustrerar faktumet att det elektriska fältet över utarmningsområdet leder elektronerna till n-sidan. Om p och n-sidan är kopplade genom en sladd kan elektronerna sedan åka över genom sladden till p-sidan varpå de rekombineras med ett hål. Den här strömmen är, på grund av att den genererats av elektriska fältet i utarmningsområdet, en såkallad driftström. Ett antal elektroner kommer statistiskt sett att ta sig från n-sidan, emot kraften från det elektriska fältet, över till p-sidan. Denna diffusion kommer att motverka driftströmmen. Detta syns tydligt i diodekvationen.



Figur 7: Tre scenarion på vad som kan ske vid excitering av en elektron i en pn-övergång. I scenario a) hamnar elektronen på p-sidan och rekombinerar utan att bidra till någon ström. Samma sak sker i scenario c) fast på n-sidan. Det önskade scenariot är scenario b) där elektronen hamnar i utarmningsområdet och kan åka ner till n-sidan där den kan bidra med en ström. Figuren är tagen från kurskompendiet till kursen ESSF20 på Lunds Universitet[12].

### 2.3.4 Diodekvationen

Diodekvationen visar sambandet mellan strömmen och spänningen i en diod. Ekvationen ser ut enligt ekvation 3 när dioden inte är belyst.

$$I = I_S \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (3)$$

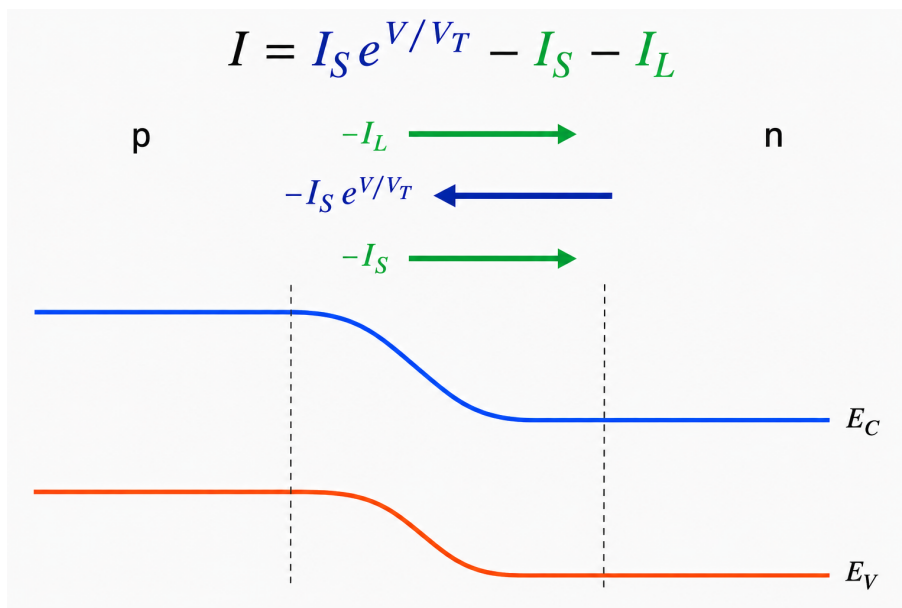
Samma ekvation kan även skrivas enligt ekvation 4.

$$I = I_S e^{\frac{V}{V_T}} - I_S \quad (4)$$

Variabeln  $V$  står för spänningen över dioden.  $V_T$  är den termiska spänningen vilket är samma sak som  $kT/e$ . Där är  $k$  Boltzmanns konstant,  $T$  är temperaturen och  $e$  är elementarladdningen för en elektron.  $I_S$  är driftströmmen i mörker. Notera att en solcell är en pn-övergång precis som en diod och därmed gäller diodekvationen även för solceller. Dock behövs en till term,  $I_L$ , för att få med driftströmmen som bildas av att fotoner absorberas i halvledaren och skapar ett elektron-hål par i utarmningsområdet. Diodekvationen för en belyst diod eller solcell ser alltså ut enligt ekvation 5. Det kan även skrivas om till ekvation 6.

$$I = I_S \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) - I_L \quad (5)$$

$$I = I_S e^{\frac{V}{V_T}} - I_S - I_L \quad (6)$$



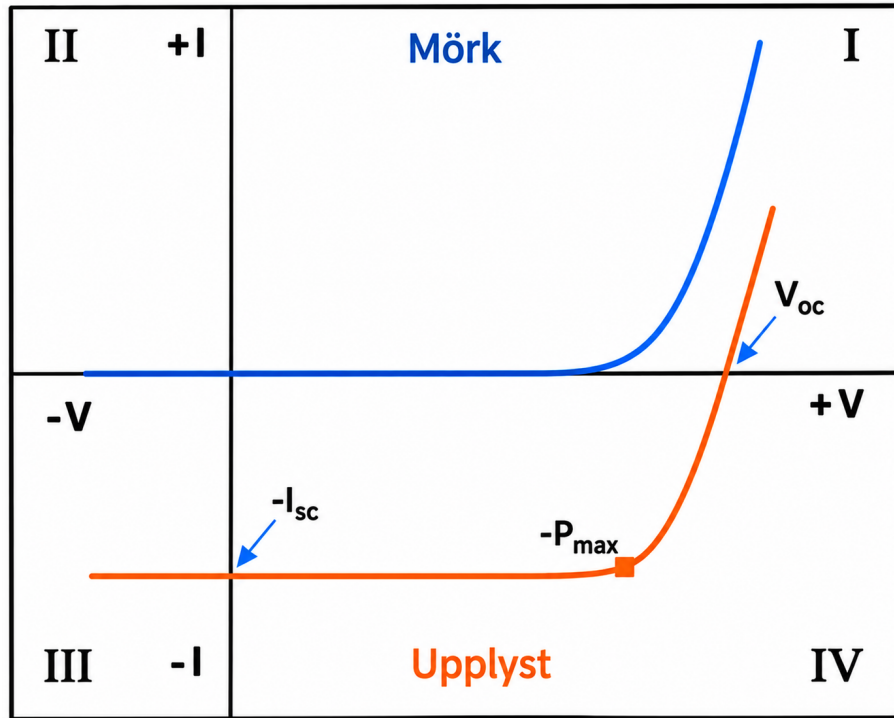
Figur 8: Pn-övergången och dess elektronflöden demonstrerade med pilar. Notera att dessa flöden har motsatt riktning till strömmarna eftersom elektronerna är negativt laddade. Ledningsbandet benämns  $E_C$ , valensbandet benämns  $E_V$ .  $I_L$  är driftströmmen som resulterar från infallande ljus.  $I_S$  är driftströmmen som finns även vid mörker.  $I_S * e^{\frac{V}{V_T}}$  är diffusionsströmmen. Figuren är helt och hållet skapad med hjälp av AI.

I ekvation 6 syns det att det finns två negativa termer och en positiv term. De negativa termerna visar gemensamt den totala driftströmmen. Vid mörker blir termen  $I_L = 0$ . Detta innebär att  $I = I_S * (e^{\frac{V}{V_T}} - 1)$ . I mörker är det alltså endast en väldigt liten driftström  $I_S$  som är ett resultat av att ett fåtal elektroner kommer att exciteras upp till utarmningsområdet utan att något ljus infaller på dioden. Den andra strömmen som finns i mörker är diffusionsströmmen och den representeras i ekvation 6 av den positiva termen. Att diffusionen motverkar driftströmmen syns i att diffusionen är positiv till skillnad från den negativa driftströmmen. Både diffusionsströmmen och driftströmmen syns i figur 8. Spänning-ström relationen i mörker syns i figur 9. Där syns det att ingen negativ ström fås i mörker vilket har att göra med bristen på elektroner som exciteras upp till ledningsbandets utarmningsområde för att bidra till driftströmmen. Om det istället finns infallande ljus på dioden så beskrivs den ström som resulterar från fotonerna med  $I_L$ .  $I_L$  är en driftström som resultat av fotoner som träffat solcellen och exciterat en elektron upp i ledningsbandets utarmningsområde. I figur 8 går det att se att denna driftström ger en ström i negativ riktning, vilket också går att observera på den orangea linjen i figur 9. Vilken ström som ses som positiv och negativ kan skilja sig i olika texter, men i denna text valdes det sätt som är skrivet i ekvation 5 och 6 för att det ska vara

konsekvent med graferna i rapportens resultat.

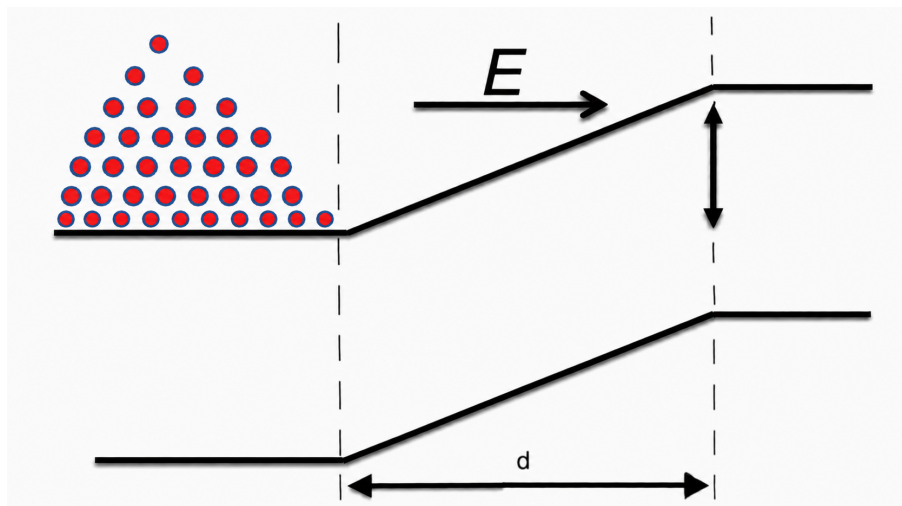
I figur 9 syns skillnaden på ström-spänning förhållandet mellan en diod i mörker och en diod som är belyst. Om antagandet görs att det finns infallande ljus på pn-övergången finns det dock ett par extremfall:

- Ett av extremfallen är när strömmen  $I = 0$  och då blir  $V = V_{oc}$ , som kallas tomgångsspänning. Detta scenario är markerat på den orangea linjen i figur 9. Anledningen till att tomgångsspänningen fås just när  $I = 0$  kan förklaras av att när det inte går någon ström (till exempel om p och n-sidorna inte kopplas ihop) samlas elektronerna upp så att elektronkoncentrationen blir relativt hög på n-sidan. Samma sak sker för hålen på p-sidan utan att dessa fria laddningar har någon utgångsväg och därmed byggs det upp en framspänning mellan p och n-sidan. Denna process leder till ett förminskat utarmningsområde och även en förminskad spänning över utarmningsområdet. Detta beror på att elektronerna som samlas på n-sidan diffunderar över till utarmningsområdet och fyller de platser där det tidigare fanns fria elektroner, innan utarmningsområdet hade skapats. Samma sak gäller för hålen på p-sidan. Ett förminskat utarmningsområde leder i sin tur till en större diffusionsström vilket motverkar driftströmmarna.
- Det andra extremfallet är när spänningen  $V = 0$ . Detta innebär att en ström av elektroner kan flöda från n-sidan till p-sidan utan att möta någon resistans. Därmed blir strömmen lika med kortslutningsströmmen. Alltså  $I = I_{sc}$ . Detta är alltså en kortslutning mellan pn-övergångens sidor och är också markerat i figur 9 på den orangea linjen. I diodekvationen innebär  $V = 0$  att  $I = -I_L$ . Alltså genereras all ström från de infallande fotonerna, i detta fallet. Om en last kopplas mellan p och n-sidorna så kommer en spänning att byggas upp. Beroende på lastens resistans så kommer spänningen att ändra värde och således även strömmen. Om resistansens värde skiftas kommer det leda till att värdena ändras i enlighet med den orangea linjen i figur 9. Denna justering av resistansvärdet är i princip vad laborationen av workshopen går ut på och det kan även användas för att hitta den punkt där maximal effekt,  $P_{max}$ , fås ut av solcellen.



Figur 9: En graf med ström på y-axeln och spänning på x-axeln för en hypotetisk diod. Den blåa linjen visar beteendet för en diod i mörker. Den orangea linjen visar beteendet av en diod som har infallande ljus på sig. Även kortslutningsströmmen  $I_{sc}$ , tomgångsspänningen  $V_{oc}$  och maximala effekten  $P_{max}$  är markerade. Utöver det är kvadranterna också numrerade[13]. Figuren är modifierad med hjälp av AI.

När en spänning-ström graf (även kallad I-V graf) ritas för en solcell så förväntas en exponentiell kurva. Den exponentiella kurvan är förväntad eftersom diodekvationen har en exponentiell term. Anledningen till att den exponentiella termen finns har att göra med att koncentrationen av elektroner minskar exponentiellt ju högre upp i energinivåer man kommer. Därmed ökar koncentrationen (eller snarare sannolikheten av att hitta en elektron) exponentiellt ju lägre ner i energi man kommer. Om man då framspanner dioden så justeras det elektriska fältet över utarmningsområdet vilket minskar höjdskillnaden på utarmningsområdet. Detta har en exponentiell påverkan på strömmen genom dioden tack vare att exponentiellt fler elektroner kan diffundera över utarmningsområdet, vilket som sagt går att förklara av att sannolikheten att hitta elektroner ökar exponentiellt ju lägre energinivån är. Att sannolikheten att hitta elektroner är större hos lägre energinivåer demonstreras i figur 10.



Figur 10: En pn-övergång där det demonstreras att det är större sannolikhet att hitta fler elektroner i lägre energitillstånd. Hålen har exkluderats för enkelhetens skull. Figuren är modifierad med hjälp av AI.

I figur 9 är kvadranterna markerade med siffror. I kvadrant 4 kan dioden producera effekt. Detta har i sin tur att göra med att tecknen skiljer sig på strömmen och spänningen. Detta ger en negativ effekt vilket innebär att effekt produceras och kan användas för att tillföra energi till exempelvis en elektronisk komponent.

### 2.3.5 Ferminivåer

Energien  $E_F$  kallas Fermi-nivån och definieras som den energinivå där sannolikheten är 50 procent att hitta en elektron med just den energin [12]. Detta är dock under förutsättning att det finns ett energitillstånd för en elektron just där. Ferminivåer är ett viktigt koncept för pn-övergångar och därmed också för solceller. Anledningen till dess betydelse är att ju större skillnad det är på ferminivån på n-sidan jämfört mot ferminivån på p-sidan, desto större spänning är det mellan de två sidorna. Ferminivå-skillnaden är nämligen spänningsskillnaden mellan de två sidorna. Alltså behövs en skillnad i ferminivåer för att få ut en effekt ur solcellen. Dock är det värt att nämna att strömmen i till exempel en solcell är mindre ju större skillnaden är på ferminivåerna. Det är alltså en avvägning mellan strömmen och spänningen som görs när skillnaden i ferminivåer bestäms. Ferminivån kan justeras genom att biasera dioden. Vid belysning går det även att justera ferminivåerna genom att justera resistansen på en last kopplad mellan n och p-sidorna. Det är det som görs i ett av momenten i laborationen. Ju fler elektroner som finns i ledningsbandet på n-sidan desto högre ferminivå kommer det att vara på n-sidan. På samma vis går det att säga att ju fler hål det finns i valensbandet desto lägre ferminivå kommer det

att vara på den sidan av pn-övergången där hålen befinner sig (p-sidan). Fermivåer skulle sammanfattningsvis kunna ses som ett sätt att visualisera spänningsskillnaden och skillnaden i antal fria elektroner, mellan de två sidorna.

### 2.3.6 Luminans

Luminans är en storhet som skulle kunna sägas visa hur mycket ljus som kan observeras från en yta[14]. Mer exakt så är det ljusintensiteten från en viss yta i riktning av mätinstrumentet som mäts. Därmed blir SI-enheten för luminans candela per kvadratmeter. Candela är SI-enheten för ljusstyrka.

### 2.3.7 Solcellens verkningsgrad

Verkningsgrad är en egenskap som visar hur effektiv en solcell är. Det är den främsta egenskapen som används för att jämföra olika solceller. Det mäts genom att dividera genererad effekt av solcellen med effekten från ljuset som infaller. Verkningsgraden omvandlas ofta till procent. Ekvationen för att beräkna verkningsgraden syns i ekvation 7.

$$e = \left( \frac{P_{ut}}{P_{in}} \right) * 100 \quad (7)$$

Värt att nämna är att verkningsgraden typiskt mäts vid 25 grader celsius och att alla solceller belyses med likadana spektrum av ljus när mätvärdet tages. Den övre teoretiska gränsen för exempelvis en kisel-cells verkningsgrad är 29 procent.

### 2.3.8 Tandemceller

Det finns möjligheter att göra effektivare solceller. Ett av dessa sätt är genom att skapa något som kallas för tandemceller. Tandemceller går ut på att flera solceller placeras ovanpå varandra. Dessa solceller har olika bandgap, där den med störst bandgap hamnar högst upp och sedan blir bandgapen mindre för de solceller som ligger längre ner. Dessa solceller kommer på grund av sina olika bandgap att absorbera olika våglängder olika väl. Den solcellen med störst bandgap absorberar mer energirika våglängder, medan de våglängder som inte är tillräckligt energirika för att bli absorberade går rakt igenom till nästa solcell. Denna solcell kanske har ett litet nog bandgap för att absorption ska ske. Om inte absorberas våglängden möjligtvis av en solcell som ligger ännu längre ner bland tandemcellerna. På så sätt absorberas

fler av fotonerna i en solcell med större bandgap vilket ger mindre förluster i form av värme. Alltså kan en större effekt genereras per ingående effekt och verkningsgraden blir därmed större.

### 2.3.9 Solcellers roll i samhället

Förnybar energi spelar en allt större roll inom energiförsörjningen av våra samhällen.[15, p. 232]. Detta är på grund av den rådande klimatkrisen. Då fossila bränslen inte är ett hållbart alternativ så installeras mycket solceller i länder som bland annat Tyskland. År 2024 fanns en installerad effekt av 1,8TW från solceller över hela världen[16] och om fem år väntas denna effekt ha tredubblats. Dock fås mindre producerad effekt (effekten som faktiskt går att använda) per installerad effekt, för solceller gentemot andra energikällor. Installerad effekt är den effekt som kan genereras i optimala förhållanden, det vill säga att det är konstant starkt solljus i solcellernas riktning. På grund av brist på solljus kan inte alltid solcellerna producera lika mycket energi som under dess optimala förhållanden. Solceller är en energikälla där det inte går att välja när energin ska komma till användning, om inte batterier används för att spara energin till senare användning. Men att bygga sådana batterier i stor skala kräver stora resurser. Med detta sagt är solceller en energikälla som anses som viktig för att lösa klimatkrisen[17]. Framförallt kisel har varit ett ämne som varit viktigt inom solceller. Det beror bland annat på att kisels bandgap är effektivt på att absorbera solljusets spektrum[18].

### 2.3.10 Lysdioder

En lysdiod består precis som solcellen av en pn-övergång. Dock kräver en lysdiod en extern spänning för att fungera. Då en extern framspänning läggs på minskar utarmningsområdet. Ett förminskat utarmningsområdet innebär en mindre spänning över utarmningsområdet. Det är den spänning som förhindrar diffusion och därmed kommer fler elektroner att diffundera över till p-sidan av pn-övergången. När dessa elektroner har kommit över till p-sidan är de såkallade minoritetsladdningsbärare. Det innebär att det finns fler hål på den sidan än vad det finns elektroner. Dessa extra elektroner på p-sidan kommer att rekombinera med hålen i valensbandet. Som ett resultat av rekombinationen så hamnar elektronen på en lägre energinivå. Differensen i energi mellan ledningsbandet och valensbandet har då omvandlats till en foton av en våglängd som motsvarar just den energin.

För lysdioder används i allmänhet halvledare som inkluderar ett ämne från grupp 3 i periodiska system och ett ämne från grupp 5. Denna mix av ämnen bör inte

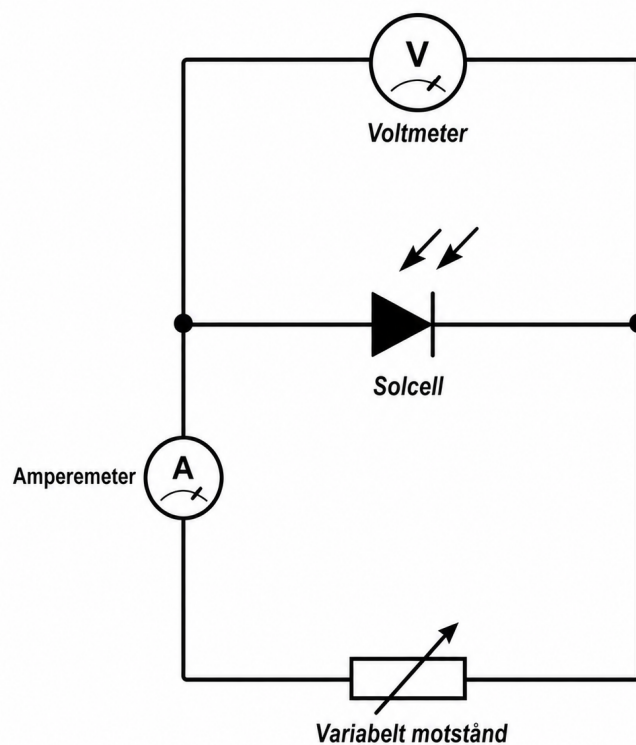
förväxlas med dopning.

## 2.4 Laborationsinstruktioner

labbinstruktionerna: ***OBS! Alla mätvärden ska skrivas in i ett kalkylark! Använd till exempel Google Kalkylark på era datorer.***

### 2.4.1 Koppling

Ta fram multimetrar (2 stycken), en solcell, en potentiometer, samt 5 sladdar för att koppla ihop komponenterna. Kopplingarna görs enligt figur 11. Även figur 12 visar hur kopplingarna ska se ut. Försök lista ut hur man kopplar själva först och be sedan om hjälp ifall det behövs.



Figur 11: Kretsen som ska kopplas ihop. Ammetern och voltmetern kan bytas ut mot multimetrar i verkligheten. Resistorn är en variabel resistor (också kallad potentiometer). Figuren är genererad med hjälp av AI.



Figur 12: Kretsen som ska kopplas. Längst upp är två multimetrar. Längst ned till vänster syns potentiometern och till höger syns en svart solcell bredvid tre andra solceller. Följ sladdarna.

#### 2.4.2 Mät spänningen vid öppen krets

Koppla bort solcellen från ammetern och från potentiometern tillfälligt för att mäta tomgångsspänningen. Tag mätvärde på spänningen.

#### 2.4.3 Mät kortslutningsströmmen

Koppla in solcellen till ammetern och potentiometern igen. Sätt nu potentiometern på dess lägsta värde. Tag ett mätvärde på kortslutningsströmmen.

#### 2.4.4 Mät spänning och ström vid rumsbelysning

Vid vanlig rumsbelysning, mät spänning och ström genom kretsen. Tag totalt 15 mätvärden. Börja med  $500\ \Omega$  potentiometern och sätt den på  $0\ \Omega$ . Skruva sedan upp den med  $50\ \Omega$  per mätvärde. När vi har nått maximal resistans, byt ut  $500\ \Omega$ -potentiometern mot  $10\ \text{k}\Omega$  potentiometern. Tag sedan 5 mätvärden med den potentiometern för att nå upp till 15 mätvärden totalt. För  $10\ \text{k}\Omega$  potentiometern ökar vi med  $100\ \Omega$  per mätvärde.

#### 2.4.5 Mät spänning och ström vid stark belysning

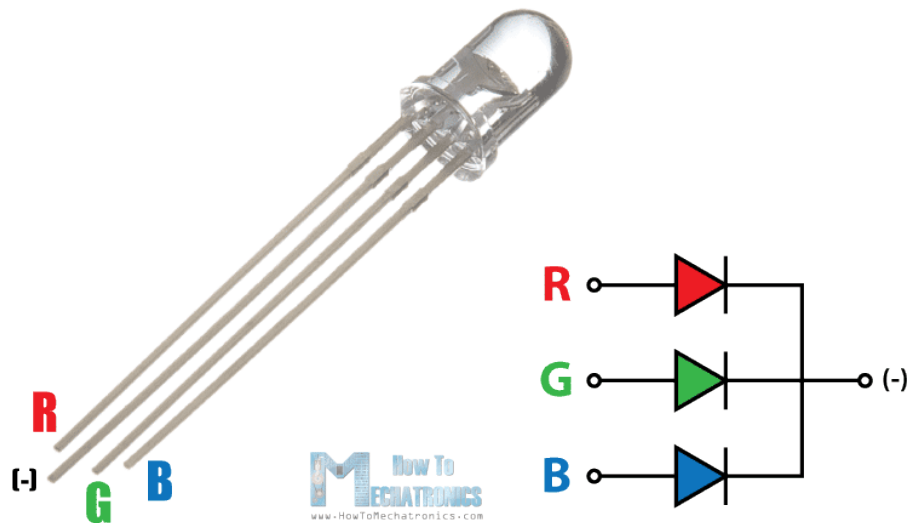
Belys solcellerna med en glödlampa (alternativt ficklampan i mobilen eller en annan LED-lampa). Tag nu 10 nya mätvärden var för spänning och ström fast med  $500\ \Omega$  potentiometern. Börja på  $0\ \Omega$  och addera på  $50\ \Omega$  för varje mätvärde.

#### 2.4.6 Rita grafer

Rita två I-V grafer i kalkylarket. En för mätvärdena för stark belysning och en för vanlig rumsbelysning. Spänningen ska vara på x-axeln och strömmen på y-axeln. Kolla efter maxvärdena för spänningen och strömmen, samt hur kurvan ser ut. Fundera på varför ni ser vad ni ser på era grafer. Visa dessa grafer för läraren när ni är färdiga.

#### 2.4.7 Få en lysdiod att lysa med hjälp av solceller

Koppla ur solcellerna ur kretsarna (**OBS! Om de andra inte är färdiga med steg 2.5, hoppa till nästa steg. Detta steget kan endast göras när alla grupper är färdiga med steg 2.5**). Tag alla 5 solceller och seriekoppla dem med varandra med hjälp av sladdar. Testa sedan att koppla in den fyrbenta lysdioden (lysdiod med 3 olika LED-lampor i sig) i serie med alla solceller och se vilka färger ni kan få. Lysdiodens 4 ben funkar enligt figur 5. Testa sedan samma sak med 4 solceller och även med 3. Lyckas ni få samma färger? Varför? Vid vilka spänningar ungefär verkar olika färger börja lysa? Tänk på hur många solceller ni använt eller koppla möjligtvis in en multimeter om ni vill ha mer noggranna spänningsvärden.



Figur 13: Fyrbenta lysdioden[19] . Det långa benet ska kopplas till minus från solcellerna. Beroende på vilket av de kortare benen som kopplas till plus fås olika färger. Den fyrbenta lysdioden består som figuren visar av 3 lysdioder, varpå den kan lysa i 3 olika färger beroende på hur kopplingarna görs.

## 2.5 Extra labbinstruktioner vid mån av tid

### 2.5.1 Skapa en graf för effekten

Beräkna effekten för varje resistor-värde i rumsbelysning, genom formlerna:

$$P = U \cdot I \quad (8)$$

$$R = \frac{U}{I} \quad (9)$$

Rita sedan en graf med resistansen på x-axeln och effekten på y-axeln. Använd denna graf för att bestämma ungefärligt för vilken resistans som effekten är som störst.

### 2.5.2 Mätvärden i svag belysning

Släck takbelysningen i rummet. Tag sedan 10 mätvärden var för både spänning och ström med 10 kΩ potentiometern. Börja på 0 Ω och öka med 1000 Ω per mätvärde.

## 3 Resultat

Resultatet av arbetet var främst laborationshandledningen samt en genomförd workshop på en gymnasieskola. Hur resulterande tabeller och grafer ungefärligt bör se ut

syns under rubriken 3.2 'Mätvärden och grafer'. Dessa grafer, samt datan de är baserade på, är tagna av författaren och alltså inte av elever. Det bör även förtydligas att datan för dessa grafer inte alltid är tagen på precis samma sätt som laborationsinstruktionerna instruerar. När det skiljer sig och hur det skiljer sig står i så fall i texten tillhörande den grafen. Hur det gick till i praktiken vid laborationstillfället beskrivs i rubrik 3.1 "Utförandet av laborationen".

### 3.1 Utförandet av laborationen

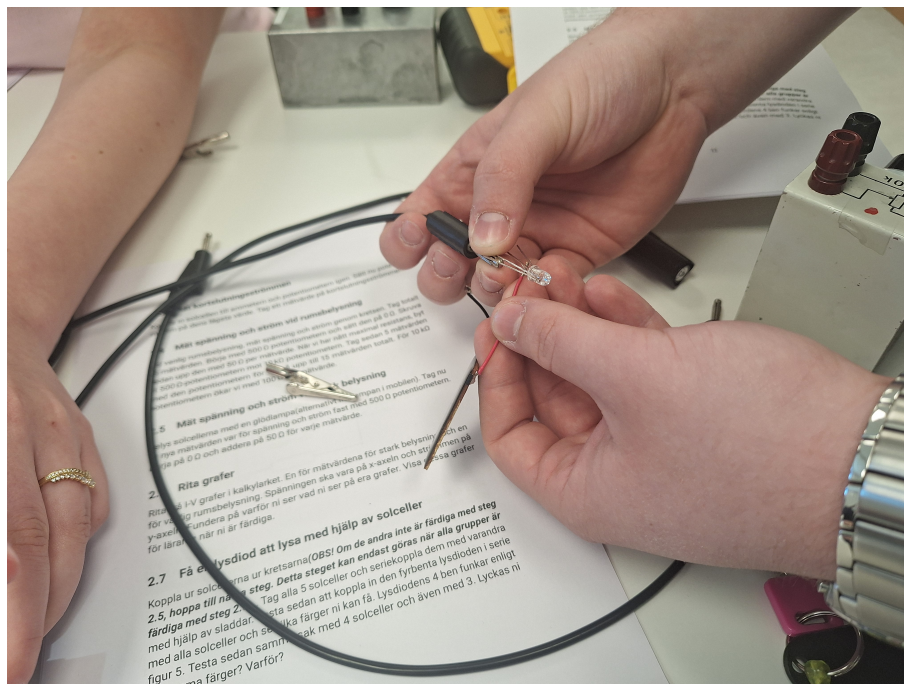
Workshopen utfördes på gymnasieskolan Nils Fredriksson gymnasium i Svedala. Där höll läraren, Vilma Zela, i en specialiseringskurs i fysik med sina elever från tredje året på gymnasiet. Fokuset på denna specialiseringskurs var just halvledarfysik. Därmed hade eleverna en basal bakgrund inom innehållet för workshopen. Tack vare detta kunde en relativt kort teori-föreläsning hållas på ungefär tio minuter. Då repeterades dels kort om vad halvledare, bandgap, hål och elektroner, och pn-övergångar är för något. Detta gjordes i enlighet med teori-delen av laborationshandledningen. Att en pn-övergång kan användas som en solcell var det sista som sades innan laborationsmaterialet förklarades. Även några frågor kom upp angående hur det är att studera på universitetet och i synnerhet hur det är att studera till ingenjör. Efter dessa frågor gavs laborationsinstruktionerna ut, varpå laborationen påbörjades. Workshopen pågick under ungefär 70 minuter totalt, vilket visade sig inte vara tillräckligt med tid för att genomföra alla laborationsmoment. Därmed lades fokuset på att göra de moment som ansågs mest givande. Dessa moment var 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3, 4.1.4, 4.1.6, samt 4.1.7.

Det första momentet gick ut på att koppla ihop kretsen. Alla komponenter, förutom sladdar och multimetrar, lånades av fysiska institutionen på Lunds Universitet. Resten lånades av Nils Fredriksson gymnasium. Eleverna behövde hjälp för att koppla ihop kretsarna. Dels var detta för att eleverna inte var helt bekanta med alla komponenter. Till exempel var potentiometern en okänd komponent. Dessutom fanns ingen riktig vana för hur multimetrar skall användas. Att voltmätningen skulle göras i en parallellkoppling medans strömmätningen skulle göras i en seriekoppling var inte heller koncept som alla deltagande elever var vana vid. Dock verkade de som initialt inte hade koll på dessa kopplingar ha hört dessa koncept innan eftersom de snabbt förstod vid förklaring vad som syftades på. Därefter mättes korstlutningsströmmen och spänningen vid öppen krets. Eftersom laborationsmoment 4.1.5 inte hanns med så mättes spänning och ström endast vid rumsbelysning. På grund av tidsbrist kunde alltså inte samma mätningar göras vid starkare belysning. Dock demonstrerades

för eleverna hur ljusintensiteten påverkade effekten ut ur solcellen, genom att täcka för solcellen med handen och läsa av spännings och ström-värden. Dessa värden kunde sedan jämföras med samma sorters värden utan att solcellen är täckt med handen. Det vill säga utan att man skapar någon sorts skugga över solcellen. Det som märktes då var att både spänningen och strömmen sjönk i absolutvärde när ljusstyrkan var mindre. Detta var förväntat och kunde kopplas till att färre fotoner träffade solcellen vilket ledde till färre fria elektroner i ledningsbandet som kunde ge en spänning och ström.

En I-V graf ritades av grupperna med hjälp av google kalkylark. Därmed observerade eleverna den exponentiella I-V kurvan för en solcell. En sådan kurva finns att se i figur 16. Slutligen användes en fyrbent lysdiod för att demonstrera att om man seriekopplade solcellerna så kunde lysdioden emittera ljus. Vilka färger som gick att emittera berodde på hur stor spänning som fanns. Det berodde i sin tur på hur många solceller som var med i seriekopplingen. På så sätt märkte eleverna själva att blå färg krävde störst spänning och att grönt krävde mer än rött. Detta faktum kopplades sedan till att blått ljus är av en kortare våglängd. Därmed består dess fotoner av mer energi än rött och grönt ljus. Detta kopplades även till att det är ett större bandgap som elektronerna ska ta sig ner för, när de rekombinerar med hålen för att fotoner av blå våglängd ska emitteras. Detta labbmoment gav alltså en förståelse för våglängder, bandgap, samt seriekopplingar. Efter laborationsmomentet med den fyrbenta lysdioden fanns ingen tid kvar till att göra de resterande laborationsmomenten och självfallet fanns då ingen tid till de moment som är till för ifall det blir tid över.

I figur 14 syns en bild från workshop-tillfället på Nils Fredriksson gymnasiet.



Figur 14: En bild från workshopen där eleverna lyckats få en blå lysdiod att svagt lysa, med hjälp av spänningen från fem seriekopplade solceller.

### 3.2 Mätvärden och grafer

När begreppet rumsbelysning används i denna uppsats så menas att takbelysningen var på i rummet och inga gardiner blockerade eventuellt solljus utifrån. Därmed kom det alltså in en del ljus utifrån också. När "stark belysning" nämns så innebär det att en glödlampa lyste på solcellen från en distans av ungefär 10 centimeter. Med "svag belysning" menas att gardinerna drogs för och alla lampor släcktes i rummet. För att få en mer vetenskaplig mätning av hur ljust det var användes en mobilapplikation vid namn phyphox[20]. Phyphox kan mäta luminansen med hjälp av mobilens kamera. Referensmätningar gjordes med phyphox och dessa värdena är alltså inte från workshop-tillfället utan från författarens egna mätningar i separat laborationshall. Nit är enheten för illuminans. Referensmätningarna gav:

- Stark belysning = 10 nit
- Rumsbelysning = 2,8 nit
- Svag belysning = 0,3 nit

Nedan finns exempel på mätvärden och grafer ungefärligen borde fås under laborationen, för alla laborationsmoment där mätvärden togs. Alla mätvärden är tagna

från den krets som syns i figur 6, förutom de mätvärden som presenteras i kapitel 4.4.5. De mätvärdena är tagna från en krets endast bestående av ett antal seriekopplade solceller och en lysdiod. Precis hur många solceller som är seriekopplade i varje scenario står i kapitel 4.4.5. Det bör dock nämnas att de värdena som visas i detta kapitel är referensvärden tagna av författaren och alltså inte av elever. De är inte heller alltid tagna i enlighet med laborationsinstruktionerna. När det skiljer sig från laborationsinstruktionerna så står det i texten kopplad till grafen.

### **3.2.1 Mät spänning vid öppen krets**

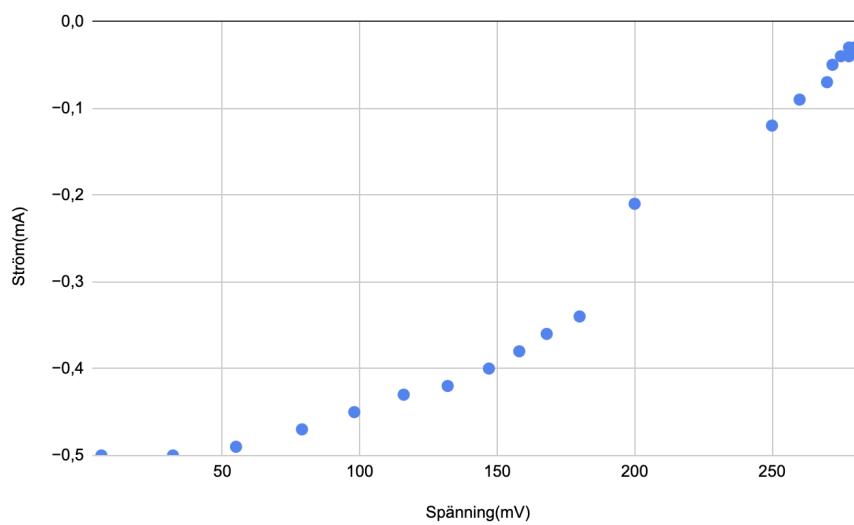
I rumsbelysning var spänningen vid öppen krets ungefär 280 mV. Detta värde fås genom att endast ha solcellen kopplad till en voltmätare och inga andra komponenter.

### **3.2.2 Mät kortslutningsströmmen**

I rumsbelysning uppmättes kortslutningsströmmen till  $-0.52$  mA. Detta mättes genom att byta ut resistorn mot en vanlig sladd.

### **3.2.3 Mät spänning och ström vid rumsbelysning**

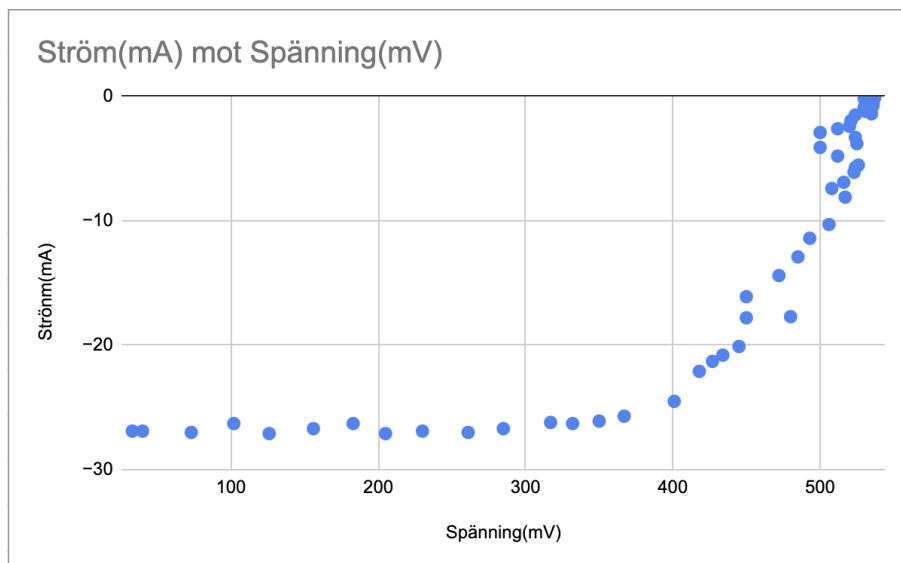
I figur 15 syns de mätvärden som togs i rumsbelysning. Mätvärdena togs i enlighet med figurbeskrivningen och även i enlighet med laborationshandledningen.



Figur 15: Ett diagram som visar ström på y-axeln och spänning på x-axeln. Mätvärdena är från rumsbelysning. resistansen gick först från  $0\ \Omega$  till  $500\ \Omega$  i steg om  $50\ \Omega$ . Sedan skiftades till  $10\ 000\ \Omega$  potentiometern. Då togs värden när resistansen gick från  $1000\ \Omega$  till  $10\ 000\ \Omega$  i steg om  $1000\ \Omega$ . Alltså är det totalt 21 mätvärden.

### 3.2.4 Mät spänning och ström vid stark belysning

I figur 16 syns de referensmätvärden som togs i stark belysning. Mätvärdena är inte tagna enligt laborationsinstruktionerna. Det togs istället 65 mätvärden där fokus var på att inkludera värden så att hela den exponentiella kurvan syntes till. Detta innebar mindre justeringar av resistansen. Stundtals justerades resistansen med 1 ohm per mätvärde.



Figur 16: Ett diagram som visar ström på y-axeln och spänning på x-axeln. Mätvärdena är tagna under stark belysning. Resistansen går från  $0\ \Omega$  till  $500\ \Omega$  i steg av okonsekvent storlek. Totalt är det 65 mätvärden.

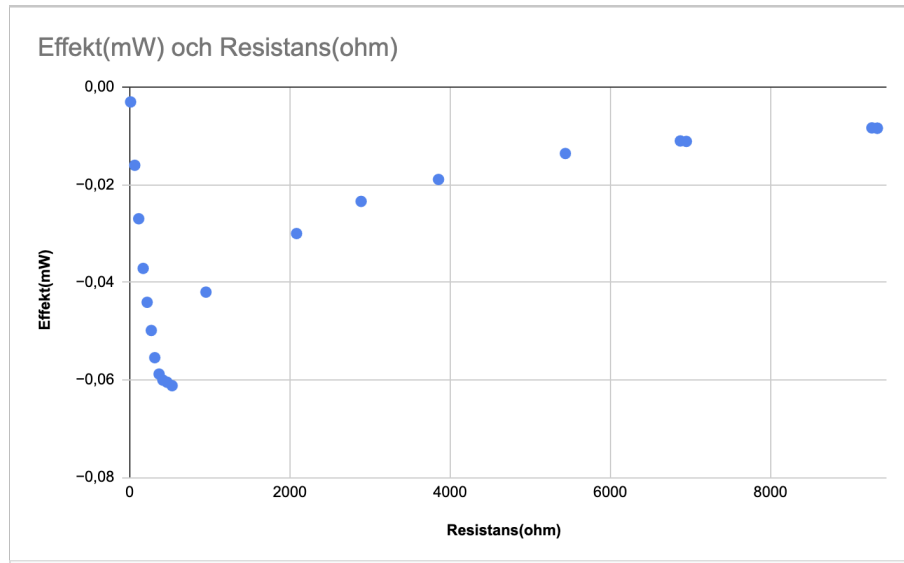
### 3.2.5 Få en lysdiod att lysa med hjälp av solceller

För att få den fyrbenta lysdioden att lysa så krävs olika spänningar beroende på vilken färg som ska emitteras. Dessa är uppmätta mätvärden för minsta möjliga spänning då ljus emitteras för specifika färger. Spänningskällan ficks med hjälp av ett spänningsaggregat men en mindre noggrann mätning kan göras med seriekopplade solceller som spänningskälla. Mätningen kan även göras noggrant med en voltmeter som i referensmätningarna, eller mindre noggrant genom att anta en viss spänning från varje solcell och räkna hur många solceller som är seriekopplade för att summera spänningarna.

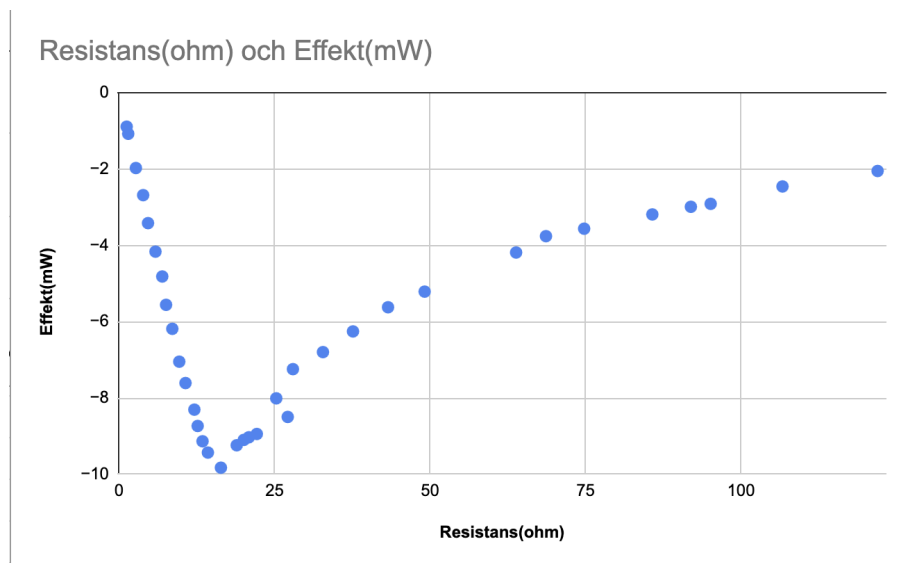
- Blå = 2,3 V
- Grön = 2,0 V
- Röd = 1,5 V

### 3.2.6 Skapa en graf för effekten

I figur 17 syns beräknad effekt på y-axeln och beräknad resistans på x-axeln. Dessa beräkningar är gjorda med spänning och ström-värdena från rumsbelysning i enlighet med laborationsinstruktionerna. I figur 18 syns motsvarande effekt och resistans för stark belysning.

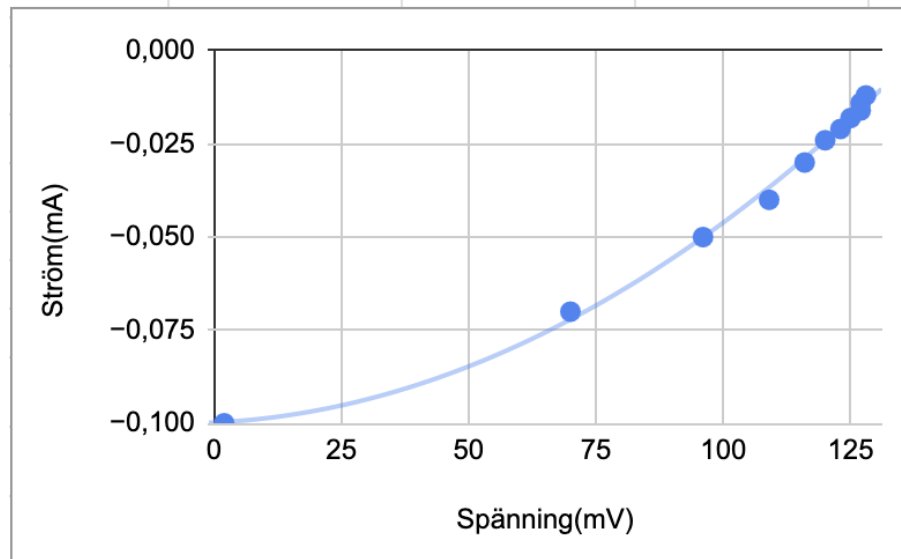


Figur 17: Effekten för rumsbelysning beräknad från mätvärdena ur figur 15. Effekten syns på y-axeln i enheten milliWatt. Resistansen syns på x-axeln i enheten  $\Omega$ . Det är totalt 21 mätvärden. Denna grafen kan användas för att få en uppskattning av vilket resistor-värde som ger störst effekt.



Figur 18: Effekten för stark belysning beräknad från mätvärdena ur figur 16. Effekten syns på y-axeln i enheten milliWatt. Resistansen syns på x-axeln i enheten  $\Omega$ . Vissa effektvärden för större resistanser exkluderades i syfte att tydligt demonstrera vad maxvärdet på effekten var. Denna grafen kan användas för att få en grov uppskattning av vilket resistor-värde som ger störst effekt.

### 3.2.7 Mätvärden i svagt belysning



Figur 19: Mätvärden tagna för spänning och ström i svagt belysning. Strömmen är på y-axeln i mA medans spänningen är på x-axeln i mV. Resistansen går från  $0 \Omega$  till  $10\,000 \Omega$  i steg om  $1000 \Omega$ . Alltså är det totalt 11 mätvärden.

### 3.3 Feedback från klassens lärare

Workshopen testades på en klass som gick tredje året på Nils Fredriksson gymnasiet i Svedala. Vilma Zela var läraren till klassen som testade workshopen. Hon hade följande feedback på hur workshopen gick till och dess innehåll:

- Laborationen gick i sin helhet bra.
- Laborationsdelen behövde mer tid, förslagsvis så hade ett 90-minuters passat bättre för att hinna med alla moment.
- En rekommendation till lärare som i framtiden ska använda denna laboration är att förbereda klassen ordentligt teoretiskt inför workshopen. Med det sagt var det bra att en teorigenomgång hölls i början av workshopen.
- I teorin hade det föredragits om fram och backs-pänning av pn-övergången var inkluderat. Detta för att förklara utseendet av diodens I-V kurva. I-V kurvan hade även kunnat användas för att förklara till exempel varför en diod används för att omvandla växelström till likström.
- Delen med lysdioden gick mycket bra och uppskattades extra mycket av eleverna. Detta laborationsmoment kan med fördel användas av fysiklärare inom

till exempel kursen fysik 2 på gymnasiet. Inom fysik 2 görs kopplingar mellan färger, våglängder och fotoners energi. Detta kan med fördel kopplas till lysdiod-momentet i laborationen.

## 4 Diskussion

Baserat på feedback från elever, lärare, handledare, samt erfarenheten av att hålla i workshopen så har vissa förbättringsmöjligheter identifierats. Dessa diskuteras i detta kapitel, uppdelat i vad som hade kunnat ändras teorimässigt och vad som kan ändras praktiskt om workshopen skulle hållas igen.

### 4.1 Diskussion om praktiska förbättringar

En del praktiska justeringar behöver utföras för en mer effektiv workshop. Hur materialen fungerar och används behöver förklaras och demonstreras innan laborationen påbörjas. Hur potentiometrarna fungerar och vilka resistorvärden de ger bör visas upp. Hur multimetrarna används för spännings och ström-mätningar behöver även demonstreras i grupp. Att koppla ihop kretsen gick relativt smidigt för eleverna med hjälp av lärare och instruktionerna i laborationshandledningen. En demonstration där man visar en färdig uppställning av laborationen och tar några mätvärden för att visa precis hur man ska göra hade möjligtvis kunnat hjälpa med tydligheten. Även en genomgång av hur grafer görs och hur mätvärden tas i google kalkylark (eller annan mjukvara som används) hade varit i behov. En annan förbättringsmöjlighet är att ändra hur mycket resistansen varierar mellan två mätvärden. Fokus kan istället vara på spänningvärdena och att ta så många värden av spänningen som behövs för att hela IV-grafen ska synas. Precis hur många mätvärden detta innebär och hur laborationsinstruktionerna ska justeras för att tydliggöra detta för eleverna, är en fråga som bör undersökas inför nästa iteration av denna workshop.

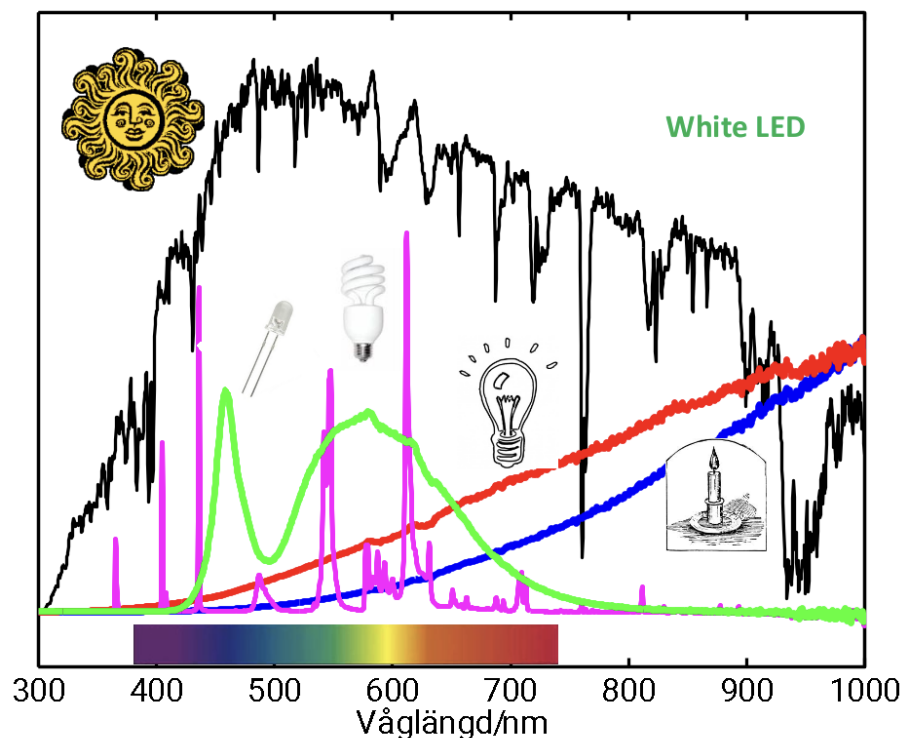
Det är även värt att nämna att laborationsmomentet med lysdioden kräver fem solceller. Detta innebär att alla solceller som fanns tillgängliga krävdes och alla grupper fick samlas för att göra detta laborationsmomentet tillsammans. En lösning är att fler solceller köps in. Det är inte ett alternativ att leta upp solceller med större verkningsgrad då 0,5 volt är ungefär det som alla kisel-solceller ger i genererad maxspänning. Alltså hade endast marginala förbättringar uppnåtts. Den solcell som användes i workshopen var köpt från butiken Conrad[21]. Potentiometerna som användes är några sorters flerväriga variabla motstånd med maxvärde  $500\ \Omega$  respektive  $10\ \text{k}\Omega$ . Dessa finns vanligtvis inte tillgängliga på gymnasieskolor. En

ersättning hade exempelvis varit att använda sig av flera vanliga resistorer istället för variabla resistorer. Det skulle dock sannolikt varit en enklare lösning att seriekoppla två potentiometrar som har olika stora maxvärden för att justera till den önskade resistansen. Detta är en tänkbar lösning då billigare potentiometrar[22] ofta finns tillgängliga på gymnasieskolor även om just de flervarviga som användes under workshopen inte finns tillgängliga.

## 4.2 Diskussion om innehållet

Innehållet i laborationen hade kunnat justeras med målet att förbättra relevansen av materialet samt hur förståelsen av halvledarfysik främjas. En del av feedbacken från läraren var att teoridelen för laborationen borde kompletteras med teori om backspänning och framspänning. Detta har lagts till i teorin i efterhand som feedbacken kom in. Dock hade det kunnat finnas med i teorin för eleverna och inte endast i den utökade teorin som det ser ut idag. Även solcellernas roll i samhället hade kunnat vara ett relevant ämne att gå djupare inom i denna workshop. På så sätt fås en starkare koppling till verkligheten vilket sannolikt engagerar eleverna bättre. Det kom även feedback på att förklara varför dioder till exempel används för att omvandla växelström till likström. Detta är relevant då det kopplar workshopen till det eleverna lär sig inom kursen fysik 2.

Kopplingar till det eleverna har lärt sig tidigare i fysik 1 och 2 är generellt en möjlighet till förbättring inom workshopen. Framförallt hade laborationsmomentet där en fyrbent lysdiod användes kunnat skrivas mer om i teori-kapitlet. Där hade det främst kunnat skrivas om ljus, våglängder och dess koppling till energi och färg. Vad eleverna hade för förkunskaper verkade skilja sig. Dock är ett rimligt antagande att de förstår materialet i fysik 1 och 2, men kan behöva en repetition för att minnas delar av materialet. Exempelvis hade en jämförelse kunnat göras mellan hur solcellens effekt skiljer sig när den är belyst med en glödlampa gentemot en mobils ficklampa. Det kan sedan leda till en diskussion om glödlampans infraröda ljus och mobillampans brist av infrarött ljus, eftersom de emitterar olika spektran. Skillnaden i spektrum syns i figur 20. För att kunna jämföra glödlampor och ledlampor är det också viktigt att båda lyser med samma ljusintensitet.



Figur 20: Spektrum för olika sorters ljuskällor. I grönt syns ett exempel på en vit lysdiods spektrum. I rött syns ett exempel på en glödlampas spektrum. I svart syns solens spektrum. I rosa syns exempel på spektrum från ett lysrör. I blått syns spektrumet för ett värmeljus.

Eftersom kisel har ett bandgap på 1,1 eV så kan alla våglängder med denna energi, eller större energi, absorberas. Det är våglängder upp till 1100 nm som absorberas av kisel[23]. Det visas i figur 20 att lysdioden inte emitterar våglängder över 800 nm, medans glödlampan gör det. Detta skulle kunna innebära att glödlampan ger bättre effekt ur solcellen än lysdioden. Det togs dock ingen data för att mäta detta under arbetets gång, men det hade som nämnts kunnat vara ett sätt att bygga vidare på workshopen.

Workshopens material hade även kunnat kompletteras med ett quiz eller någon sorts tävling relaterad till ämnet för större engagemang bland eleverna.

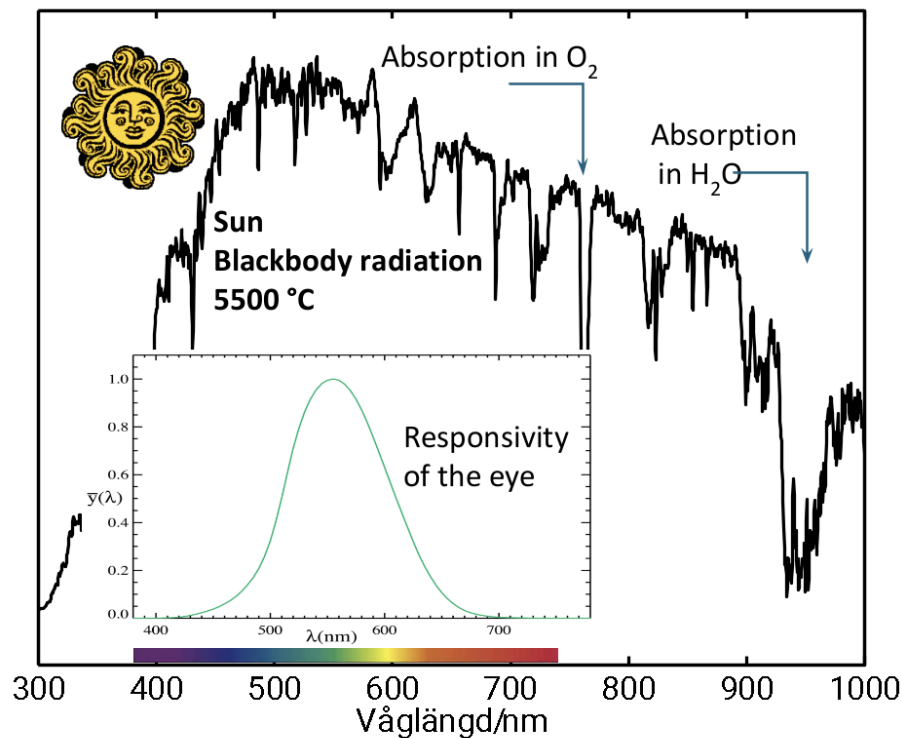
Läraren hade förberett klassen med två lektioner om halvledare på 75 minuter var. Workshopen hölls på en tid av 70 minuter. Detta visade sig vara för kort tid och därmed behövs antingen en förlängning av tiden eller en förminskning av workshopens moment så workshopen kräver kortare tid. Under workshopens första utförande gjordes ett val, på grund av tidsbrist, att inte göra mätningar i svag belysning. Denna mätning ansågs minst givande då en jämförelse mellan olika ljusstyrkor på solcellerna ficks av mätningarna i rumsbelysning och stark belysning. Dessutom är den

exponentiella naturen av IV-kurvan svårare att observera i svag belysning. I brist av tid rekommenderas därmed att utesluta laborationsmomentet med mätningar i svag belysning. Möjligtvis kan denna del exkludera helt från laborationshandledningen eller bytas ut mot annat material.

IV-kurvornas exponentiella form var svår att observera i de ljusintensiteter som mätningarna gjordes i, utöver mätningarna i stark belysning. Även i rumsbelysning syntes inte den exponentiella kurvan särskilt väl. Dock fås en tydlig exponentiell kurva vid mätning i stark belysning. Möjligtvis hade det med fördel kunnat finnas en förklaring på vilken sorts IV-kurva som förväntades fås, i teori-kapitlet. Nackdelen med detta är att de inte får upptäcka kurvans form själva i det fallet. Däremot fanns ett annat problem med tagandet av mätvärden. Det var att det krävdes en relativt liten justering av resistansen för att se en stor förändring i spänningen. Därmed syns inte kurvorna alltid i sin helhet, utan en interpolation får göras av någon sort där en kurva anpassas till mätvärdena. Dock är mätvärdena mestadels som nämnts i de högre spännings-värdena och det saknas en del lägre spänningsvärden. Det syns exempelvis i figur 19. Detta hade kunnat åtgärdas med mindre steg av resistansändringar per mätvärde. Det program som användes för att rita grafer var google kalkylark. Då användes även polynom-funktionen som interpolerar in värden genom att approximera grafen till ett polynom. Detta anses som ett rimligt vis att visa upp den exponentiella naturen av grafen. Problemet med en icke-exponentiell graf ligger sannolikt i bristen på mätvärden och inte i polynom-funktionen som används. Dock hade en exponentiell kurva kunnat anpassas till datan istället, möjligtvis med hjälp av AI, för att få en mer korrekt interpolation. visualiseringen av datan kunnat simplificeras med program som Labview[24]. Problemet med tillgång till detta program är ofta kostnaden av licenser, vilket gör det osannolikt att en gymnasieskola skulle få tillgång till mjukvaran.

För att få någon sorts estimering av hur många fotoner som träffade solcellerna så användes applikationen 'phyphox' på en mobiltelefon. Denna applikation var endast kapabel till att mäta luminans. Luminans förklaras i teori-sektionen av uppsatsen och är proportionell med antal infallande fotoner. Anledningen till att antal infallande fotoner var av intresse var för att försöka se kopplingen mellan antal infallande fotoner och spänningen som genererades i solcellen. Luminansen var ett värde som togs med en mobilkamera. Den kameran är sannolikt inte designad för att observera icke-synliga våglängder av ljus. Även om kameran skulle vara byggd för att upptäcka alla sorters våglängder så är luminans ett fotometriskt värde att samla in. Det innebär att värdet är viktat för synligt ljus. Ett bättre mätvärde hade möjligtvis varit ett radiometriskt sådant. Radiometriska mätvärden är inte viktade för synligt

ljus. Vilket ljus som är synligt syns i figur 21.



Figur 21: Solens spektrum syns i svart. Ögats relativa känslighet för olika våglängder syns i grönt.

Det finns även andra metoder för att estimeras antal infallande fotoner. Bland dessa är beräkningen som visas i ekvationer 10 och 11. Där estimeras ett minimum på antalet fotoner som träffar solcellen med hjälp av kortslutningsströmmen. Anledningen till att ekvationerna 10 och 11 leder till ett minimum-värde på antal infallande fotoner, är att vissa fotoner inte absorberas av solcellen och därmed inte bidrar till beräkningen. I ekvation 10 och 11 står  $i_{sc}$  för kortslutningsströmmen,  $Q$  står för en summa av laddningar som bidrar till en ström,  $t$  står för tid och  $e$  är elementarladdningen. Ekvationerna går ut på att ström är laddningar som rör sig över en viss areaenhet per tidsenhet. Om detta divideras med elementarladdningen fås hur många elektroner som rör sig över den nämnda arean. Med tanke på att  $e$  är ett känt tal och  $i_{sc}$  är ett värde som mäts under workshopen, så blir det triviale att beräkna ett minimumvärde på infallande fotoner.

$$i_{sc} = \frac{Q}{t} \quad (10)$$

$$N_{fotoner/sekund} = N_{elektroner/sekund} = \frac{i_{sc}}{e} \quad (11)$$

De delar av workshopen som inte hinns med hade en lärare med fördel kunnat spara till en senare lektion. Exempelvis kan elevernas data användas för att göra effektberäkningar och resistansberäkningar på nästkommande fysik-lektion. Även övningsuppgifter relaterade till workshopen kan vara ett sätt att utveckla workshopen på. Exempelvis skulle en beräkning av antal infallande fotoner kunna vara en beräkning som del av en övningsuppgift. Ett annat exempel på en övningsuppgift hade varit att beräkna hur mycket spänningen över en diod förändras om strömmen blir dubbelt så stor. Då kan diodekvationen användas för härleda ett uttryck för hur mycket spänningen då ändras. Det är en övning som ger eleverna möjligheten att träna på sin matematik och i synnerhet på logaritmlagarna.

Gymnasiekursen fysik 3 innehåller en del halvledarfysik och har även ett fåtal sidor om solceller. Dock är detta en kurs som endast ges på ett fåtal gymnasieskolor i Sverige. Baserat på workshopens goda feedback från lärare och elever dras slutsatsen att halvledarfysik mycket väl hade kunnat implementeras i läroplanen för alla natur och teknik-elever på gymnasiet. Speciellt med tanke på relevansen i dagens samhälle, då så många produkter innehåller halvledare, så kan det anses viktigt att alla får en basal förståelse för hur halvledarprodukter fungerar.

### 4.3 Tack

Jag vill rikta ett stort tack till alla som har hjälpt mig under arbetets tid. I synnerhet vill jag rikta ett tack till Vilma Zela för möjligheten att utföra labben på er skola, men även för hennes vänlighet och generositet. Jag vill även tacka mina handledare Dan Hessman och Magnus Borgström för all inspiration och feedback under arbetets gång.

## Referenser

- [1] Skolverket, *Fysik – Naturvetenskapsprogrammet (GY25)*, Accessed: 2026-05-24, 2025. URL: <https://www.skolverket.se/undervisning/gymnasieskolan/program-och-amnen-i-gymnasieskolan/gymnasieprogrammen-gy25/nationella-program/programs/NA25/FYSK>.
- [2] Cambridge International Education, *Cambridge International AS & A Level Physics 9702 Syllabus for Examination in 2025, 2026 and 2027*, Accessed: 2026-05-24, 2022. URL: <https://www.cambridgeinternational.org/Images/664565-2025-2027-syllabus.pdf>.
- [3] International Baccalaureate Organization, *Physics*, Accessed: 2026-05-24, 2026. URL: <https://ibo.org/programmes/diploma-programme/curriculum/sciences/physics/>.
- [4] Science Magazine, “Breakthrough of the Year 2025: The unstoppable rise of renewable energy,” *Science*, 2025, Accessed: 2026-03-19. URL: <https://www.science.org/content/article/breakthrough-2025>.
- [5] A. Wong, *Integration of Solid State Physics in Secondary School Education*, Bachelor’s thesis, Lund University, 2025. URL: <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/9198624>.
- [6] D. Hessman, *Optokomponenter: Laborationshandledning*, ESSF20 Komponentfysik, 2025.
- [7] FuseSchool - Global Education, *What Are Periods & Groups In The Periodic Table?* [Online video]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=7mLPC74GHMo>. [Accessed: May 28, 2026], 2018.
- [8] VectorVoyager, *Silicon Doping – Type P.svg*, [Online image]. Wikimedia Commons. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Silicon\\_doping\\_Type\\_P.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Silicon_doping_Type_P.svg). [Accessed: May 28, 2026], 2024.
- [9] PV Education. “Absorption of Light,” hämtad 25 maj 2026. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/absorption-of-light>.
- [10] Learn Electronics With Me, *Solar Cell, Construction, Working, V-I Characteristics and Applications*, [Online]. Available: <https://www.learnelectronicswithme.com/2020/cell-construction-working-v-i.html>. [Accessed: May 28, 2026], 2020.
- [11] PV Education, *Bias of PN Junctions*, [Online]. Available: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/bias-of-pn-junctions>. [Accessed: May 28, 2026], 2026.

- [12] A. Gustafsson, *Komponentfysik – En introduktion*, 7. utg. Fasta tillståndets fysik, Lunds Tekniska Högskola, 2011.
- [13] *Illuminated and dark current-voltage (I-V) curves with their characteristic points*, [Online image]. ResearchGate. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Illuminated-and-dark-current-voltage-I-V-curves-with-their-characteristic-points\\_fig2\\_349510261](https://www.researchgate.net/figure/Illuminated-and-dark-current-voltage-I-V-curves-with-their-characteristic-points_fig2_349510261). [Accessed: May 28, 2026], 2021.
- [14] International Commission on Illumination (CIE), *17-21-050: Luminance*, CIE S 017:2020 ILV: International Lighting Vocabulary, 2nd edition, 2020. hämtad 20 maj 2026. URL: <https://cie.co.at/eilvterm/17-21-050>.
- [15] R. Alphonse, S. Pilström och H. Rydén, *Heureka! Fysik Kurs 3*, 1. utg. Natur & Kultur, 2012.
- [16] Our World in Data. “Installed Solar Energy Capacity.” Data source: IRENA (2025), processed by Our World in Data, hämtad 12 juni 2026. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/installed-solar-pv-capacity>.
- [17] SolarPower Europe. “IPCC Report on Mitigating Climate Change.” Accessed: 2026-05-27. URL: <https://www.solarpowereurope.org/news/ipcc-report>.
- [18] Solcellsfakta. “Varför används just kisel i de flesta solceller?” Hämtad 12 juni 2026. URL: <https://solcellsfakta.se/faq/varfor-anvands-just-kisel-i-de-flesta-solceller/>.
- [19] *Light-emitting diode RGB color model Arduino Lead*, [Online image]. Available: <https://www.cleanpng.com/png-light-emitting-diode-rgb-color-model-arduino-lead-zwpwp9/>. [Accessed: May 28, 2026], 2026.
- [20] RWTH Aachen University, *phyphox*, <https://phyphox.org/>, Accessed: 2026-05-27, 2026.
- [21] TRU Components, TC-13341232 Mini Solar Cell, 0.05 W, 0.5 V, Datasheet, Product no. 3335308. [Online]. Available: <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/en/003335303DS00/datablad-3335308-tru-components-tc-13341232-mini-solcell-005-w-05-v.pdf>. [Accessed: May 28, 2026], 2025.
- [22] CNC Profi, *Potentiometer 10 K Ohm*, Accessed: 2026-05-28, 2026. URL: <https://www.cncprofi.eu/de/POTENTIOMETER-10-K-Ohm.html>.
- [23] PV Education. “Optical Properties of Silicon.” Accessed: Jun. 12, 2026. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/materials/optical-properties-of-silicon>.

- [24] NI, *LabVIEW*, Accessed: 2026-05-28, 2026. URL: <https://www.ni.com/en/shop/labview>.