

downshifting

Optimering af solcellers udnyttelse af højenergi fotoner

FORSKERSPIRE 2020, NAT

BERTIL COLD – AUREHØJ GYMNASIUM

Indholdsfortegnelse:

Indledning:.....	2
Problemformulering og Afgrænsning:.....	2
Metode:.....	3
Teori:	3
Solceller:.....	3
Quantum dots:	4
Quantum Efficiency:	4
Refleksion:.....	5
Matematisk modellering:	6
Quantum Dot båndgab:	7
Forsøg:.....	8
Opmåling af solens spektrum ved jordoverfladen.....	8
Opmåling af Quantum Efficiency for en solcelle.....	8
"Proof of concept": Påvisning af nedkonvertering	9
Budget	9
Diskussion.....	10
Konklusion	10
Tak til:.....	10
Litteraturliste:	11

Indledning:

Klimakrisen og den globale opvarmning er det moderne samfunds største udfordring. Der forskes verden over i forskellige løsninger, til hvordan vi kan sænke vores CO₂-udledning, og vi får brug for mange løsninger, hvis vi vil redde planeten. En løsning er at skabe en grøn, bæredygtig, global energiforsyning. Der findes mange forskellige grene af bæredygtig energi, og i mit projekt har jeg valgt at fokusere på solenergi. Som klimaentusiast og fysik-matematiknørd er dette emne, noget jeg brænder for.

I mange år har man omdannet energien fra solens lys til elektrisk energi. Effektiviteten af denne omdannelse er blevet bedre over tiden, dog er der for ”klassisk opbyggede” siliciumsolceller en grænse for hvor meget af sollysets energi, der kan omdannes til elektrisk energi. Denne grænse kaldes Shockley-Queisser (SQ) grænsen, og blev for første gang udregnet i 1961. SQ-grænsen ligger på 33.7% for solceller med et båndgab på 1.34eV¹. Denne grænse skyldes flere faktorer, blandt andet at solcellerne ikke kan udnytte hele det elektromagnetiske spektrum til at skabe elektrisk strøm.

De fleste kommercielle solceller har en effektivitet omkring 15-20%². Der er altså stadigvæk et langt stykke vej til SQ-grænsen. En af måderne hvorved man kan forhøje effektiviteten af solcellerne, er ved at nedkonvertere høj-energi fotoner. Denne proces er før blevet påvist, men er endnu ikke optimeret tilstrækkeligt, til at det kan betale sig i kommercielt fremstillede solceller³.

Problemformulering og Afgrænsning:

Nedkonvertering af blå lys kan opnås på forskellige måder. I mit projekt vil jeg undersøge quantum dots (QDs) som middel til nedkonvertering. QDs nedkonverterer lys ved at absorbere en foton med en vilkårlig bølgelængde og udsende en foton med en specifik bølgelængde.

En udfordring ved nedkonvertering er den manglende kontrol af det emitterede lys retning. Når lyset nedkonverteres og udsendes fra QDs, emitteres lyset i alle retninger, både mod og væk fra solcellen hvilket leder til et indirekte energitab. Dette tab kan mindskes ved at forhøje brydningsindekset (n) for det medie, hvori nedkonverteringen foregår. På den måde skabes totalrefleksion. En forhøjelse af n medfører dog også et tab af energi ved refleksion af udefrakommende lys. Dette problem påpeges gentagende gange i artikler omhandlende nedkonvertering af lys, dog uden dybere refleksion over dette problem^{3,4}.

Formålet med mit projekt er at finde de optimale forhold, hvorved nedkonvertering med QDs er mest effektiv.

Min problemformulering lyder således:

Kan Quantum Dots bruges som et effektivt middel til nedkonvertering af lys med henblik på optimering af solcellers energiudnyttelse af blå og UV lys, og hvordan kan det indirekte energitab forårsaget af nedkonvertering mindskes ved ændring af brydningsindekset?

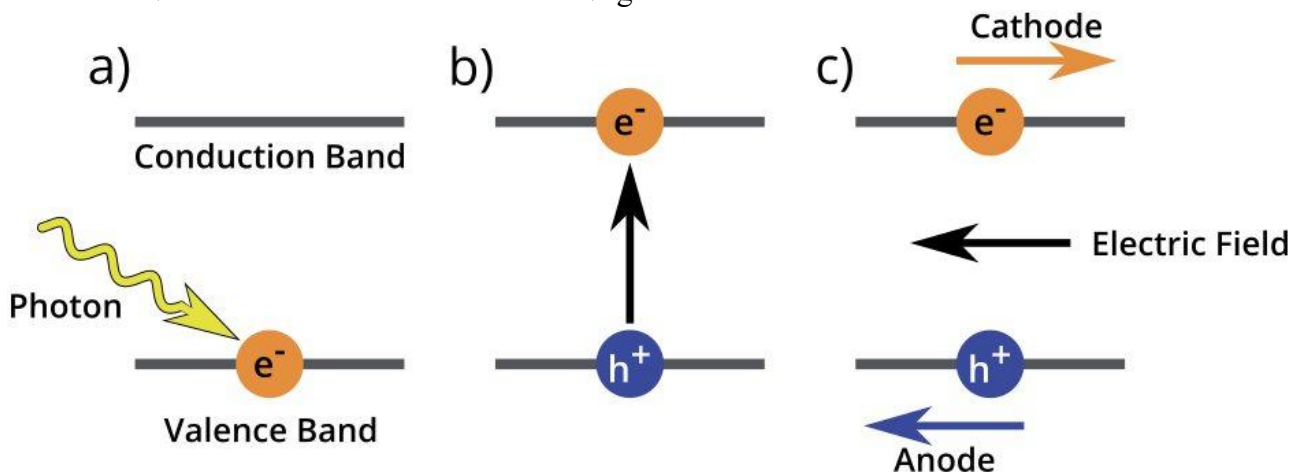
Metode:

For at finde svar på min problemformulering vil jeg arbejde deduktivt. Ud fra kendte formler og ligninger fra fysik (optik) vil jeg opstille en matematisk model, som beskriver energitabene ved nedkonverteringen ved forskellige brydningsindeks. Jeg vil udføre nogle kvalitative pilotforsøg for at underbygge min model og præcisere den.

Teori:

Solceller:

Solceller skaber elektrisk strøm ved absorption af fotoner. Fotonerne skal have en minimumsenergi svarende til solcellens båndgab, E_g ⁵. E_g er energiforskellen mellem solcellematerialets valensbånd og ledningsbånd, hvilket er de to stadier, som elektroner hovedsageligt befinder sig i, i en solcelle. Når en foton med denne energi absorberes, dannes der et elektron-hul-par, og der skabes en elektrisk strøm. Processen kan forstås ud fra følgende illustration:

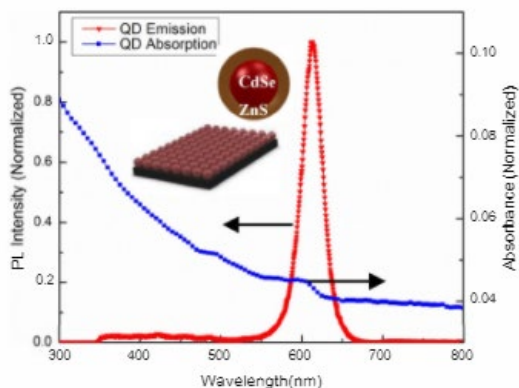


Figur 1: Energistadier for elektroner i en solcelle
 Figur er adapteret fra Ossilla⁶

I **Figur 1** ses en foton med energien svarende til E_g , der exciterer en elektron og derved skaber en elektrisk strøm. I de fleste tilfælde er fotonens energi højere end E_g , og derfor vil noget energi gå tabt som varme. Normale silicium solceller har et lavt "blue response", hvilket betyder at blåt og UV-lys er dårligt til at generere strøm⁷. Dette skyldes at kortbølget lys har en høj absorptionskoefficient i solceller, så det absorberes i solcellens øverste lag, hvor elektron-hul-parret ofte når at rekombinere, inden det skaber en elektrisk strøm⁸.

Quantum dots:

QDs er kompakte krystaller i nanometerstørrelse bestående af semileder materialer. På grund af deres størrelse, der typisk er omkring 5-6nm, har kvantemekanik stor betydning for deres fysiske egenskaber, og deraf kommer navnet quantum dots. Den vigtigste af deres fysiske egenskaber er deres nøjagtige emissionsspektrum. Ved at styre deres kemiske sammensætning samt størrelsen af krystallerne, kan man bestemme hvilken bølgelængde de udsender⁹. Energien for denne bølgelængde kaldes også båndgabet, E_g . QDs vil altid udsende ca. denne bølgelængde, uanset hvilke bølgelængder de absorberer. Dette er beskrevet i **Figur 2**.



Figur 2: Absorption og emissions spektrum for QDs bestående af CdSe/ZnS
 Figur er adapteret fra Sadeghimakki et al.⁴

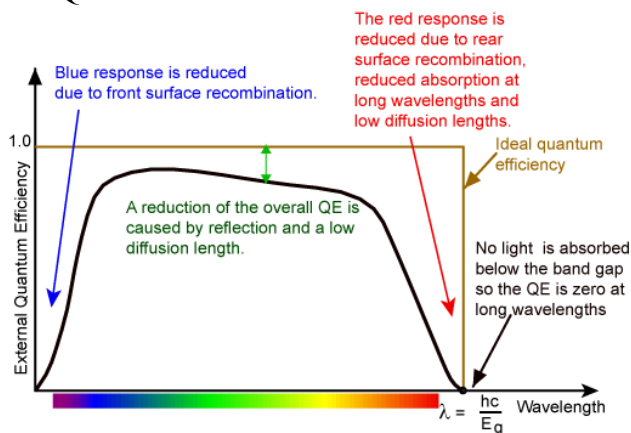
QDs kan altså nedkonvertere blå og ultraviolet lys til lys, som solcellerne bedre kan omdanne til elektrisk energi. På grafen ses det at QDs absorberer fotoner med en større bølgelængde end emissionsbølgelængden. Dette skyldes urenheder i materialet.

Quantum Efficiency:

Quantum efficiency (QE) er et mål for hvor mange strømførende elektroner der skabes pr. foton absorberet i en solcelle⁷ og beskrives ved følgende ligning:

$$QE = \frac{\text{strømførende elektroner}}{\text{fotoner absorberet}}$$

For fotoner med energien $E_f < E_g$ gælder at: $QE = 0$. For fotoner med energien $E_f \geq E_g$ gælder at: $1 > QE > 0$:



Figur 3: QE i en klassisk silicium solcelle for forskellige bølgelængder af lys
 Figur er adapteret fra PV Education⁷

Figur 3 illustrerer et lavt QE for blåt lys, samt for bølgelængden svarende til E_g . QE er højest ved overgangen fra grønt til blåt lys, hvorefter den aftager markant. Dette fald i QE skyldes klassiske solcellers lave "blue response". Den lave QE omkring E_g skyldes rødt lys' lave absorptionskoefficient i solceller. Nogle røde fotoner vil derfor absorberes længere bagud i solcellen, hvor de dannede elektron-hul-par hurtigt rekombineres⁷.

For QDs er QE et mål for, hvor mange fotoner der emitteres pr. absorberet foton og kaldes også quantum yield⁹. Som for solceller, er absorptionskoefficienten for E_g meget lav for QDs. Dette er illustreret i **Figur 2**. QDs absorberer og nedkonverterer derfor fotoner med energien $E_f > E_g$, mens fotoner med energien $E_f \leq E_g$ i højere grad transmitteres.

Refleksion:

En af de store udfordringer ved nedkonvertering af lys, er lysets emission i alle retninger. Når QDs udsender fotoner i alle retning går meget energi tabt. Ved at placere QDs i et medie med et højt brydningsindeks (n) vil mange af de nedkonverterede fotoner blive reflekteret ved grænsen mellem mediet og luften, på grund af totalrefleksion, og blive sendt tilbage til solcellen. Følgende formel beskriver den minimale indfaldsvinkel, hvorved totalrefleksion sker, som funktion af brydningsindekset, n : (se afsnit 2 i bilaget)

$$\theta_i = \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right) \quad (1)$$

Et højt brydningsindeks medfører også, at mange af fotonerne, som kommer udefra, vil blive reflekteret væk fra solcellen. En længere række af ligninger kaldet Fresnel-ligningerne beskriver lysets refleksion i forskellige polarisationsretninger¹⁰: (se afsnit 3 i bilaget)

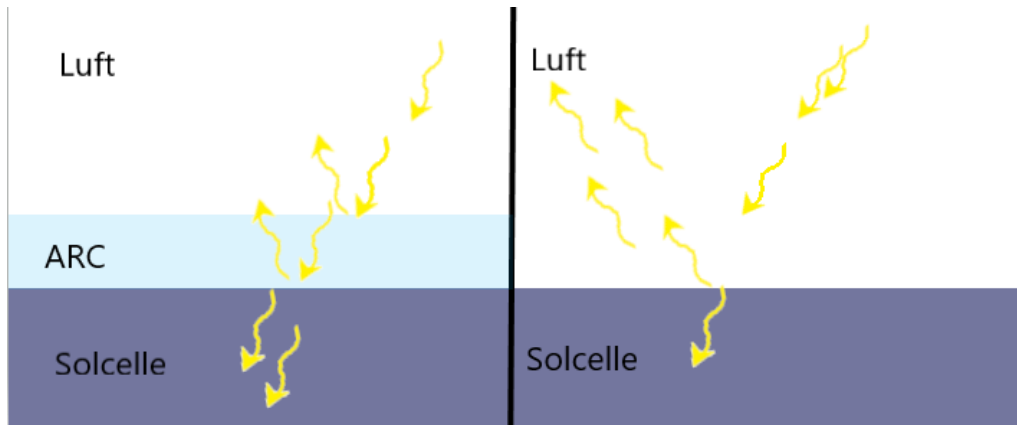
$$R_{\parallel}(n) := \left(\frac{\tan(\theta_i - \theta_t(n))}{\tan(\theta_i + \theta_t(n))} \right)^2 \quad (2)$$

$$R_{\perp}(n) := \left(-\frac{\sin(\theta_i - \theta_t(n))}{\sin(\theta_i + \theta_t(n))} \right)^2 \quad (3)$$

Overfladereflektionen kan mindskes ved at indføre en anti-reflection coating (ARC). ARC består af en tynd film med et specifikt brydningsindeks, som kan udregnes fra følgende formel¹¹: (se afsnit 4 i bilaget)

$$n_{ARC} = \sqrt{n_0 * n_1} \quad (4)$$

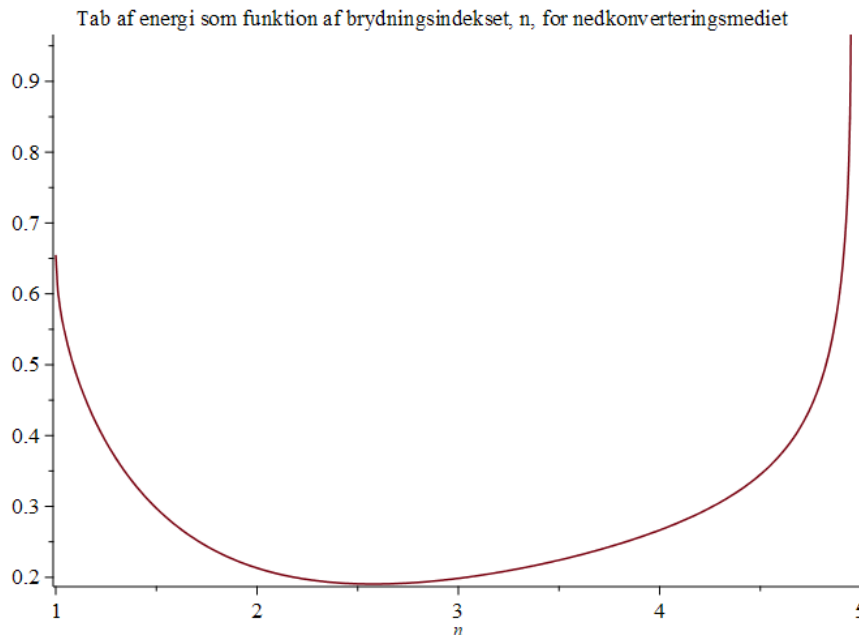
n_0 er brydningsindekset for det medie, hvorfra lyset kommer (typisk luften), og n_1 er brydningsindekset for nedkonverterings mediet. Ved at påføre ARC, bliver den totale refleksion fra de to grænseflader mindre, da refleksionen er afhængig af forskellen mellem brydningsindeksene for medierne i grænsefladen. **Figur 4** illustrerer virkningen af ARC:



Figur 4: Illustration af ARC

Matematisk modellering:

Forskellige artikler om nedkonvertering af blå lys nævner problemstillingen ovenover; brydningsindekset for det medie, hvori nedkonverteringen foregår, har både en positiv og negativ indvirkning på den totale energieffektivitet^{4,3}. Med udgangspunkt i Fresnel-ligningerne (2 og 3) og i ligningen for den minimale indfaldsvinkel for totalrefleksion (1), samt med påførelse af ARC, har jeg opstillet en model, som beskriver det totale energitab som følge af overfladerefleksion og QDs emission i tilfældige retninger: (se afsnit 5 i bilaget)

Figur 5: Model over energitab ved ændring af n , $\theta_i = 45^\circ$

Denne model bygger på flere antagelser, men følgende overvejelser mangler stadig at blive præciseret, før modellen afspejler virkeligheden:

1. Hvilken båndgabsenergi skal QDs have?

Figur 5 er opstillet således at mængden af fotoner, der **kan** reflekteres ved overfladen, er den samme, som mængden af fotoner der **kan** totalreflekteres. Dette afspejler ikke virkeligheden, da det kun er de nedkonverterede fotoner, som **kan** totalreflekteres. Ved at vælge nogle specifikke QDs og undersøge deres absorptionsspektrum, kan dette sammenlignes med solcellens absorptionsspektrum, og tallet for mulige totalreflekterede fotoner kan justeres.

2. Hvad er indfaldsvinklen for lyset der rammer solcellen?

Som det ses i (2) og (3) er indfaldsvinklen, θ_i , et input for Fresnel ligningerne. I **Figur 5** er den gennemsnitlige indfaldsvinkel sat til 45° , men dette tal er blot en antagelse og repræsenterer ikke lysets indfaldsvinkel i virkeligheden.

Quantum Dot båndgab:

I bestemmelsen af et båndgab til QDs er der flere faktorer, som spiller ind. Hvis QDs og solcellens båndgab er for tæt på hinanden, absorberer QDs fotoner med en høj QE for solcellen, og der sker et tab af energi da mange af de nedkonverterede fotoner mistes ved emission i forskellige retninger. Hvis QDs båndgab er langt væk fra solcellens båndgab, vil QDs absorbere fotoner, som har en lav QE for solcellen. De emitterede fotoner fra nedkonverteringen har dog også en lav QE for solcellen, og man vil derfor ikke få en forøgelse af elektrisk energi.

For at finde det optimale båndgab for QDs er det nødvendigt at kende til følgende parametre:

1. Antallet af fotoner med forskellige bølgelængder i sollysets spektrum ved jordoverfladen
2. QE for de relevante QDs
3. De forskellige bølgelængders QE for den specifikke solcelle.

Figur 3 viser QE af forskellige bølgelængder for en silicium solcelle. Denne figur er ment som et middel til at forstå begrebet Quantum Efficiency, og ikke en videnskabelig graf som kan bruges til beregninger. For at forbedre den matematiske model vist i **Figur 5**, bør QE af forskellige bølgelængder for solcellen, der arbejdes med, undersøges.

Kendskab til disse parametre muliggør udregningen af mængden af nedkonverterede fotoner og deres QE for solcellen. Dette sammenlignes med QE af de fotoner, som absorberes af QDs, for solcellen – altså sammenlignes effektiviteten af kortbølget lys for solcellen med og uden et nedkonverteringslag af QDs. Da mængden af nedkonverterede fotoner, som rammer solcellen, er afhængig af mængden af fotoner, der totalreflekteres, og dermed afhængig af brydningsindekset for det medie hvori nedkonverteringen foregår, skal disse beregninger laves i samspil med beregningerne lavet til **Figur 5** (se afsnit 6 i bilaget).

QE for de QDs modellen tager udgangspunkt i ligger omkring 60-70%¹². QDs med højere QE kan fremstilles, men er ikke kommercielt tilgængelig⁴.

Forsøg:

To pilotforsøg skal udføres før en matematiske model kan opstilles og et optimalt brydningsindeks for nedkonverteringsmediet, samt det optimale båndgab for QDs, kan findes.

Opmåling af solens spektrum ved jordoverfladen

Forsøget kræver et spektrofotometer og en skyfri dag. Sollysets spektrum vil blive målt ved hjælp af spektrofotometeret, behandlet i et databehandlingsprogram og resultater plottes i en x-y graf. Enheden på Y-aksen omdannes til fotoner $\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}\cdot nm^{-1}$, i stedet for $W\cdot m^{-2}\cdot nm^{-1}$, som er den typiske enhed for intensitet af elektromagnetisk stråling i sådanne spektre. Denne omdannelse sker med følgende formler:

$$\frac{W}{m^2\cdot nm} = \frac{J\cdot s^{-1}}{m^2\cdot nm} = J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot nm^{-1} \quad (5)$$

Energien for en foton ud fra bølgelængden er givet ud fra formel (6). Ved at bruge Plancks konstant med enheden $J\cdot s$, fås resultatet i J pr foton:

$$E_{foton} = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (6)$$

Til sidst sættes de to formler sammen:

$$\frac{J}{E_{foton}} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot nm^{-1} = \frac{J}{h\cdot\frac{c}{\lambda}} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot nm^{-1} \quad (7)$$

Opmåling af Quantum Efficiency for en solcelle

Opmålingen af QE sker ved at belyse en solcelle med forskellige LED-pærer (med lys af forskellige bølgelængder) og måle strømstyrken genereret af cellen. Samtidig skal intensiteten af lyset udsendt af LED-pæren opmåles med et spektrofotometer. Strømstyrken, I , måles i ampere, A (C/s). Ved at dividere strømstyrken med elementarladningen, e , omdannes strømstyrken til elektroner pr. sekund, og dermed beregnes antallet af exciterede, strømførende elektroner:

$$A = \frac{C}{s} = C \cdot s^{-1} \quad (8)$$

$$\frac{A}{e} = \frac{A}{1.602\cdot 10^{-19} \frac{C}{elektron}} = \frac{elektron}{s} \quad (9)$$

Intensiteten af LED-lyset konverteres til fotoner pr. sekund pr. m^2 pr. nm og ganges med arealet af solcellen for at finde antallet af fotoner, der rammer solcellen hvert sekund.

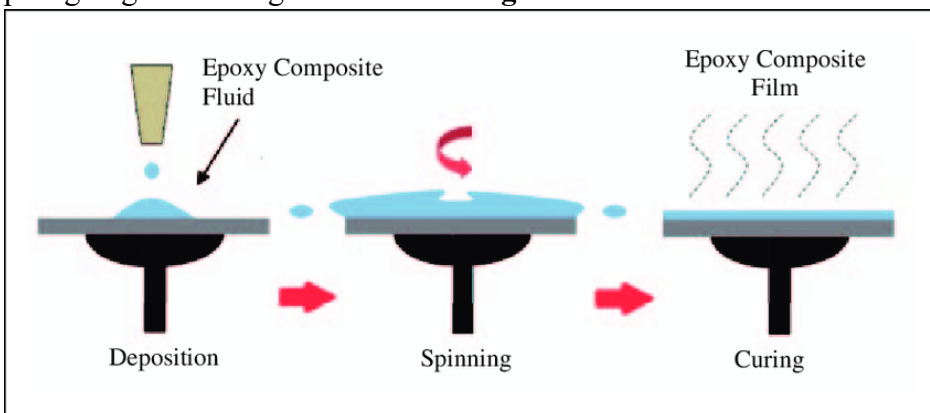
Antallet af fotoner pr. sekund og antallet af strømførende elektroner sammenlignes nu, og QE findes. Dette gentages med LED-pærer, som udsender forskellige bølgelængder af lys.

Disse to forsøg vil generere pålidelige resultater, som kan bruges i det videre arbejde med den matematiske model. Til sidst opstilles et forsøg, som skal være et "proof of concept". Med dette forsøg vil det undersøges, om den præsenterede teori holder vand. Forsøget vil blive udført uden en solcelle for at mindske antallet af variable, som kan have indflydelse på forsøget.

”Proof of concept”: Påvisning af nedkonvertering

Som forberedelse til forsøget vil der først fremstilles en glasplade med en tynd film af QDs i et medie med et optimalt brydningsindeks fundet ved hjælp af de ovenstående forsøg og model. I form af en tynd film vil ARC bliver påført QD-mediet.

Filmene tilføjes på en glasplades overflade via metoden kaldet Spin-coating. Spin-coating foregår ved at pipetterer en lille dråbe af sit materiale, i dette tilfælde væsken med QDs, på midten af en plade, hvorefter pladen snurres rundt med høj hastighed så væsken breder sig ud til siderne. Tykkelsen af mediet kontrolleres ved at variere spin-hastigheden¹³. Ved at hæve temperaturen fordamper uønskede molekyler og efterlader en tynd film med QDs. Denne metode bruges også til pålægning af ARC og er illustreret i **Figur 6**.



Figur 6: Spin Coating

Figuren er adapteret fra ResearchGate¹⁴

Under forsøget vil glaspladen blive belyst med forskellige LED-pærer og spektret af lys på begge sider af glaspladen i forhold til lyskilden vil blive undersøgt. Med disse spektre bør det tydeligt kunne observeres, hvilke bølgelængder der absorberes af QDs, og hvilke der emitteres. Dermed undersøges det om værdierne bestemt i den matematiske model stemmer overens med virkeligheden. De målte værdier, som efterfølgende analyseres, er absorptions- og emissionsspektret for QDs og refleksionen af lyset. Formålet med forsøget er at verificere antagelserne lavet i forbindelse med modellen. Forsøgene udføres med en kontrolgruppe bestående af en glasplade med ARC uden QDs.

Budget:

Til pilotforsøgene er den eneste udgift indkøb af LED-pærer med forskellige bølgelængder. Disse kan købes på Amazon til en pris på ca. 200 dkk¹⁵. Alt andet der skal bruges til pilotforsøgene, har jeg gennem min forskerkontakt fået lov til at låne fra DTU.

Til mit ”proof of concept”-forsøg går udgifterne til indkøb af QDs og ARC. QDs kan købes til mange forskellige priser. Man kan købe QDs med en QE på 60-70% for ca. 400kr pr. mL over internettet¹². Da der skal købes ca. 10-20mL af disse bliver prisen i alt 4.000kr. Men da jeg endnu ikke kan være sikker på båndgabets for QDs, er det svært at prissætte.

Prisen på ARC kan variere fra ca. 280kr til 600kr på briller¹⁶. Den ARC, jeg skal bruge, kan være svær at prissætte, fordi jeg endnu ikke ved, hvad brydningsindekset for den skal være. Men ud fra prisen på ARC på briller, vurderer jeg, at der nok skal være plads til det i mit projekt. Derudover vil noget af mit budget også gå til løn til DTU ansatte, når de skal hjælpe med opsætning og udførsel af forsøg.

Diskussion:

Den matematiske model jeg opstiller som produktet af mit projekt, er en teoretisk model. Den indebærer mange antagelser, såsom lysets indfaldsvinkel. Derudover er det en model, som tager udgangspunkt i en situation, hvor materialer kan fremstilles til at opfylde de optimale kriterier brugt i modellen. En udfordring kunne være at fremstille et medie med et perfekt brydningsindeks.

Min model skal derfor mest af alt forstås som en metode til optimering af nedkonvertering ved brug af QDs – ikke som det endelige svar. Nedkonvertering med QDs er før blevet påvist og beskrevet i flere artikler, men uden refleksion over varierende brydningsindeks og emissionsbølgelængder for QDs indvirkning på effektiviteten af solcellen. Min model forsøger at beregne de optimale, teoretiske værdier for disse egenskaber.

Konklusion:

Ved brug af kendte formler og ligninger har det været muligt at deducere mig frem til en matematisk model, som beskriver energitabene ved nedkonvertering af lys ved brug af QDs. Matematikken bygger på mange antagelser, hvoraf flere af dem kan korrigeres ved udførsel af de beskrevne pilotforsøg. Med den færdige model forventer jeg at kunne beregne det optimale båndgab for de nedkonverterende QDs samt det optimale brydningsindeks for nedkonverteringsmediet, hvilket vil kunne øge effektiviteten af solceller. Et andet muligt udfald kunne være at den endelige model viser, at nedkonvertering af lys ved brug af QDs ikke forøger solcellens totale energieffektivitet, hvilket vil udelukke QDs som brug til nedkonvertering.

Tak til:

Denne synopsis er skrevet med vejledning fra Peter Christian Kjærgaard Vesborg, Professor ved DTU, Institut for Fysik – min forskerkontakt. Tusind tak!
Og tak til Sigrid Cold, for hjælp med akademisk sprog og layout.

Litteraturliste:

1. Byrnes, S. *The Shockley-Queisser limit*.
2. EnergySage. Solar Panel Efficiency: What Panels Are Most Efficient? | EnergySage. <https://news.energysage.com/what-are-the-most-efficient-solar-panels-on-the-market/>.
3. Taniguchi, M. M. *et al.* Glass engineering to enhance Si solar cells: A case study of Pr³⁺-Yb³⁺ codoped tellurite-tungstate as spectral converter. *J. Non. Cryst. Solids* **526**, (2019).
4. Sadeghimakki, B., Gao, Z. & Sivoththaman, S. Proof of down-conversion by CdSe/ZnS quantum dots on silicon solar cells. in *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2014* (2014). doi:10.1109/PVSC.2014.6925376.
5. Band Gap | PVEducation. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/band-gap>.
6. Solar Cells: A Guide to Theory and Measurement | Ossila. <https://www.ossila.com/pages/solar-cells-theory>.
7. Quantum Efficiency | PVEducation. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/quantum-efficiency>.
8. Collection Probability | PVEducation. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/collection-probability>.
9. The Quantum Yield of Quantum Dots. <https://avantama.com/quantum-yield-quantum-dots/>.
10. Fresnell's Equations: Reflection and Transmission. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/freseq.html>.
11. Anti-Reflection Coatings | PVEducation. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/design-of-silicon-cells/anti-reflection-coatings>.
12. Perovskite Quantum Dots | Buy Low Price Quantum Dots | Ossila. <https://www.ossila.com/products/perovskite-quantum-dots?variant=31691447599200>.
13. Spin Coating - an overview | ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/spin-coating>.
14. Spin coating process. | Download Scientific Diagram. https://www.researchgate.net/figure/Spin-coating-process_fig2_270904848.
15. Amazon.com: DiCUNO 100Pcs (10 Colors × 10Pcs) 5MM Pre Wired 12V LED Diodes, 9.4 Inch/24CM Ultra Bright Light Emitting Diodes Assorted Color Kit Box for Circuit Science Experiment, DIY Lighting Projects: Home Improvement. https://www.amazon.com/DiCUNO-Emitting-Assorted-Experiment-Lighting/dp/B07VCJWFBK/ref=pd_di_sccai_1/141-8361515-2929166?_encoding=UTF8&pd_rd_i=B07VCJWFBK&pd_rd_r=ae577c02-1fde-4dd6-b183-92bb2f478f61&pd_rd_w=G091r&pd_rd_wg=9wiEO&pf_rd_p=5415687b-2c9d-46da-88a4-bbcfe8e07f3c&pf_rd_r=3V39QRFTEZ7Z6PJ5XT58&psc=1&refRID=3V39QRFTEZ7Z6PJ5XT58.
16. Anti-Reflection (AR) Coatings | Edmund Optics.

<https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/lasers/anti-reflection-coatings/>.