

VOPcCl<sub>16</sub> som  
sensibilisator til TTA  
fotonopkonvertering i  
solceller

Forskerspirer 2019, NAT

Malli Segoli  
Roskilde Gymnasium

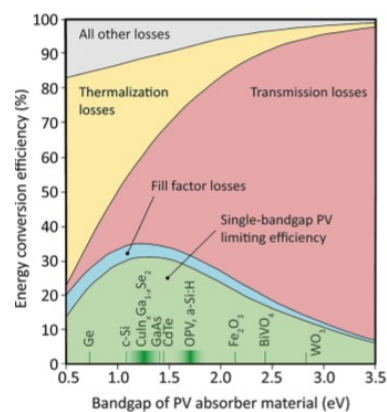
# Indhold

---

1	Indledning.....	2
2	Afgrænsning og problemformulering.....	3
3	Teori og metode .....	4
3.1	Fotonopkonvertering i solcellen .....	4
3.2	Triplet-triplet annihilation opkonvertering .....	4
3.3	Sensibilisator .....	6
3.4	Emitter.....	6
3.5	Metode.....	7
3.5.1	Måling af film.....	7
3.5.2	Måling i opløsning .....	9
4	Fremgangsmåde .....	9
4.1	Fremstilling af prøver .....	10
4.1.1	Syntese af <b>VOPcCl16</b> .....	10
4.1.2	Fremstilling af opløsning.....	10
4.1.3	Fremstilling af film.....	10
4.2	Dataindsamling .....	11
4.3	Databehandling .....	11
4.4	Budget.....	12
5	Konklusion og perspektivering .....	12
6	Tak til .....	13
7	Litteratur.....	13
7.1	Anvendt litteratur .....	13
7.1.1	Artikler.....	13
7.1.2	Bøger .....	14
7.1.3	Websteder.....	14
7.2	Øvrig litteratur .....	15
7.2.1	Artikler.....	15
7.2.2	Bøger .....	15

# 1 INDLEDNING

En af de største udfordringer for nutidens samfund er den globale opvarmning, der har store konsekvenser for klima, økosystemer og vores levevis. Den globale opvarmning kommer af en øget udledning af drivhusgasser såsom CO<sub>2</sub>, og det er derfor nødvendigt at skære ned på dette.<sup>1</sup> En af årsagerne til CO<sub>2</sub>-udledning er vores elproduktion. I 2017 kom 36,3% af energien i den danske elforsyning fra afbrænding af fossile brændstoffer såsom kul, olie og naturgas<sup>2</sup>, hvilket er problematisk, da der ved afbrænding af dette udledes CO<sub>2</sub>.<sup>3</sup> Der skal altså skæres ned på forbruget af disse, men da vores nuværende levevilkår afhænger af adgang til energi, er det nødvendigt at benytte alternative energikilder. Et af disse alternativer er solceller, der dog har den problematik, at de ikke kan udnytte den energi, de modtager fra solen til fulde. For 'klassisk'<sup>4</sup> opbyggede solceller gælder det at de ikke kan udnytte mere end ~30% af den energi, der rammer dem. Årsagen til dette er primært, at det ikke er muligt for dem at udnytte hele det elektromagnetiske spektrum (figur 1.1). Årsagen til dette er, at solcellen producerer energi ved, at molekylerne i den bliver exciteret af fotoner. Det kræver dog en bestemt mængde energi for, at de bliver exciteret, kaldet båndgab,  $E_g$ . Hvis fotonens energi,  $E_f$ , er under dette båndgab, bliver den ikke absorberet, og dens energi kan dermed ikke blive udnyttet.<sup>5</sup> En metode for at udnytte lavenergifotoner er fotonopkonvertering, hvor lavenergifotoner absorberes, og deres energi gennem en række reaktioner kombineres og emitteres som en foton med højere energi.<sup>6</sup>



Figur 1.1 Årsager til energitab i solcellen i forhold til deres båndgab, det grønne område angiver den maksimale effekt af 'klassisk' opbyggede solceller (Pedrini et al., 2018, s. 3)

<sup>1</sup> Klimaforandringer, faktalink, 2018

<sup>2</sup> Energistyrelsen, 2018, s. 3, her regnet som den energiproduktion, der ikke var baseret på vedvarende energikilder

<sup>3</sup> Klimaforandringer, faktalink, 2018

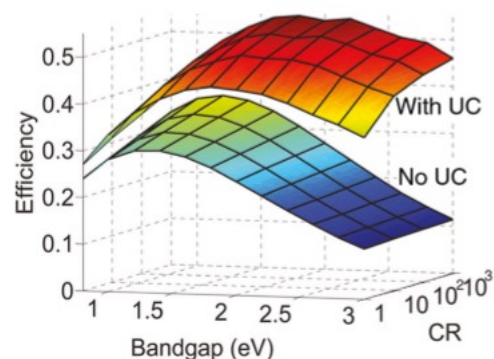
<sup>4</sup> Med dette menes der solceller med et enkelt båndgab, hvor der ikke er noget til at udvide det brugbare lys

<sup>5</sup> Bisquert, 2018, kap. 3.1, s. 43

<sup>6</sup> Bisquert, 2018, kap. 11.1, s. 203-205

## 2 AFGRÆNSNING OG PROBLEMFORMULERING

Formålet med dette projekt er at optimere solceller. Dog vil jeg ikke direkte arbejde med solceller for at begrænse mængden af variabler. I stedet arbejder jeg ud fra en simplificeret solcellemodel med det bratte båndgab  $E_g = 2,0 \text{ eV}$ , da det er solceller med båndgab omkring dette, der vil kunne opnå den højeste effektivitet ved implementering af fotonopkonvertering (figur 2.1). Målet er dermed at opkonvertere lys fra  $\lambda \in (800\text{nm}; 650\text{nm})$  til  $\lambda < 620\text{nm}$ .



Figur 2.1 Sammenligning af solcellers optimale effekt med og uden opkonverterings enhed på dem i forhold til deres båndgab (Pedrini et al., 2018, s. 3)

Opkonverteringen vil blive udført ved triplet-triplet annihilation (TTA) opkonvertering, da denne proces har vist lovende egenskaber ift. at kunne implementeres til solceller<sup>7</sup>. Til denne proces skal der bruges en sensibilisator og en emitter. Som sensibilisator vil jeg anvende vanadyl hexadecachloroftalocyanin ( $VOPcCl_{16}$ ) da dets absorptionsspektrum topper ved  $\lambda = 762\text{nm}$  og generelt er bredt omkring det.<sup>8</sup> Som emitter anvender jeg rubren, da det tidligere har været anvendt som emitter til TTA opkonvertering i kombination med sensibilisatorer med lignende absorption og molekylær opbygning som  $VOPcCl_{16}$ .<sup>9</sup> Rubren blandes med lidt dibenzotetraphenylperiflanthen (DBP) for at undgå, at energien går tabt ved singlet fission.<sup>10</sup> Dette sensibilisator-emitter par vil både blive undersøgt på opløst og fast form.

Dermed nås problemformuleringen:

*Er  $VOPcCl_{16}$  og DBP-dopet rubren velegnet som sensibilisator-emitter par til TTA opkonvertering til anvendelse i solceller, og i så fald, med hvor stor nyttevirkning foregår opkonverteringen, når stofferne er opløst og når de indgår på fast form i en tyndfilm.*

<sup>7</sup> Schulze et al., 2014, s. 1

<sup>8</sup> Basova et al., 2018, s. 7

<sup>9</sup> Singh-Rachford et al., 2008

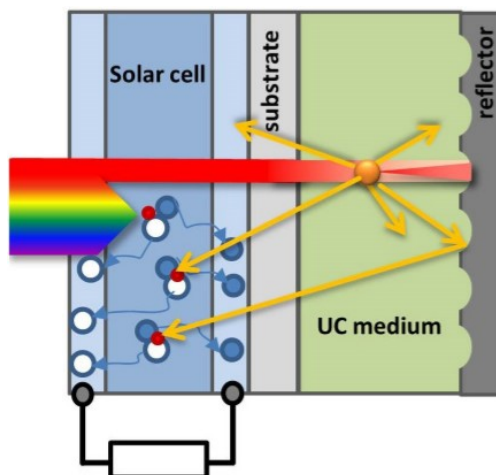
<sup>10</sup> Wu et al., 2016, s. 1, samt mailkorrespondance med Lissau, 1. oktober 2019

### 3 TEORI OG METODE

I det følgende afsnit vil jeg først redegøre for relevant teori, derefter vil jeg kort redegøre for mit valg af sensibilisator og emitter. Til sidst vil jeg redegøre for de metoder, hvormed målingerne tages og de beregninger, der foretages på baggrund af disse målinger.

#### 3.1 FOTONOPKONVERTERING I SOLCELLEN

I solcellen vil fotonopkonverteringen foregå på solcellens bagside, hvor de fotoner, der ikke blev absorberet i solcellen, vil blive absorberet i opkonverteringsenheden. Bagerst på solcellen med fotonopkonvertering vil der være et reflekterende lag, der sikrer, at de opkonverterede fotoner kommer tilbage til solcellen (figur 3.1).<sup>11</sup>



Figur 3.1 Illustration af opbygningen af en solcelle med fotonopkonvertering. Fotonopkonverteringen foregår på solcellens bagside (UC medium), det ses også, hvordan reflektoren reflekterer fotonerne tilbage i solcellen (Schulze et al., 2018, s. 1)

#### 3.2 TRIPLET-TRIPLET ANNIHILATION OPKONVERTERING

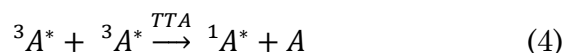
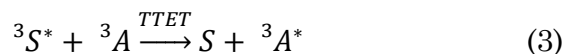
TTA opkonvertering foregår over 5 trin. Først absorberer sensibilisatoren en lavenenergiefoton, og den exciteres (1). Dernæst henfalder sensibilisatoren fra singlet- til tripletstadiet ved intersystemkrydsning<sup>12</sup> (ISC) (2). Herefter overføres energien fra sensibilisatoren til emitteren ved triplet-triplet energioverførsel<sup>13</sup>

<sup>11</sup> Schulze et al., 2018, s. 1

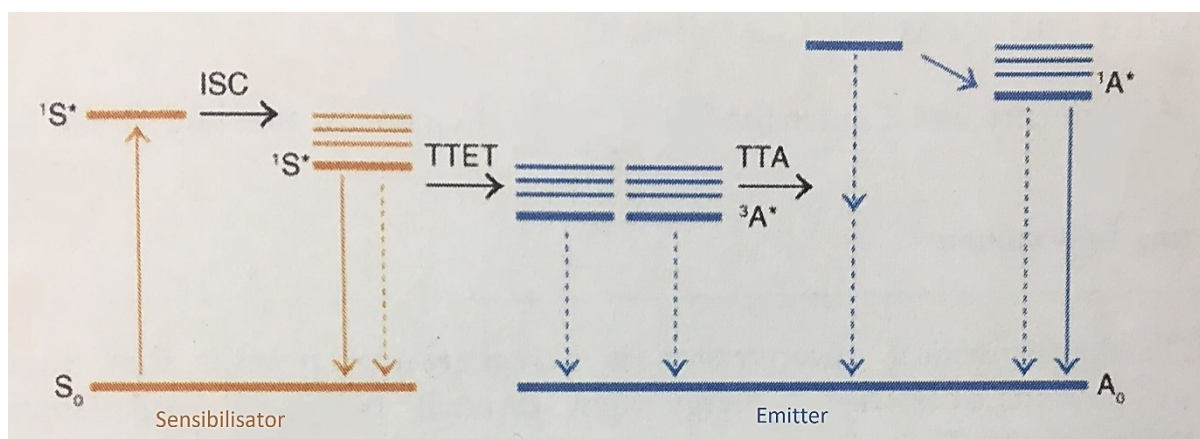
<sup>12</sup> Egen oversættelse fra det engelske 'intersystem crossing'

<sup>13</sup> Egen oversættelse fra det engelske 'triplet-triplet energy transfer'

(TTET) (3). Så kombineres den exciterede energi fra to emitterer ved triplet-triplet annihilation (4). Til sidst emitterer emitteren energien i en højenergifoton (5)<sup>14</sup>:



For at denne proces skal forløbe optimalt gælder der flere parametre for de forskellige energistadier, der gennemgås undervejs. Energieniveauet for sensibilisatorens exciterede singlet- og tripletstadier skal ikke ligge for langt fra hinanden, da det vil lede til et stort energitab ved ISC. Dette er især en af udfordringerne ved TTA opkonvertering for lavenergifotoner<sup>15</sup>. Dernæst skal sensibilisatorens tripletstadie være højere end emitterens, da TTET ellers ikke forløber, dog skal forskellen heller ikke være for stor. Desuden gælder det for emitterens singletstadie, at det ikke kan være højere end den kombinerede energi fra to af de oprindeligt absorberede fotoner, da det i så fald ikke ville kunne opnås ved TTA.<sup>16</sup>



Figur 3.2 Oversigt over energiniveauerne i TTA opkonvertering. (Wilke 2013, s. 2, redigeret)

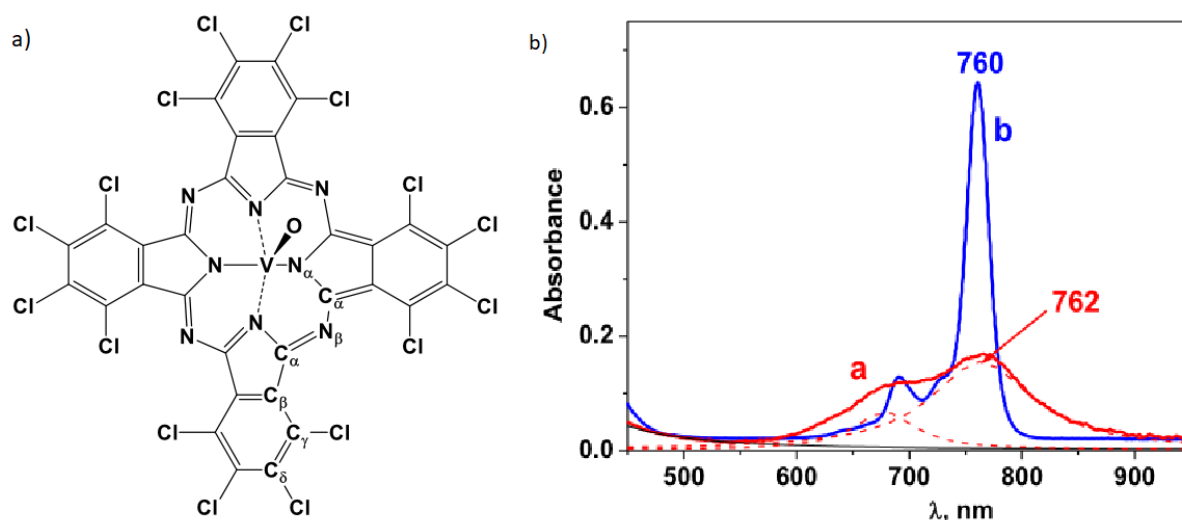
<sup>14</sup> Wilke et al., 2013, s. 1-2

<sup>15</sup> Wu et al., 2016, s. 1

<sup>16</sup> Simon et al. 2012, s. 3

### 3.3 SENSIBILISATOR

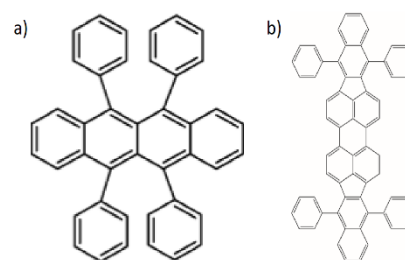
I dette projekt anvender jeg  $VOPcCl_{16}$  som sensibilisator til opkonverteringen (figur 3.3a). Dette stof er valgt, da dets absorptionsspektrum ligger i det ønskede område (figur 3.3b).<sup>17</sup> Desuden er der tidligere blevet vist TTA opkonvertering med ftalocyaniner, og det er dermed ikke en fuldkommen ny molekylstruktur, der afprøves<sup>18</sup>. I mit valg af sensibilisator har jeg hovedsageligt taget hensyn til dens absorptionsspektrum, og der er derfor en større usikkerhed ift. om den passer med de andre parametre beskrevet i det tidligere afsnit.



Figur 3.3 a) Strukturformel for  $VOPcCl_{16}$  og b) Absorptionsspektrum for  $VOPcCl_{16}$  som tyndfilm (den røde graf) (Basova et al., 2018, a: s. 2, b: s. 7)

### 3.4 EMITTER

Som emitter har jeg valgt rubren, der tidligere er blevet anvendt til TTA opkonvertering med flere forskellige sensibilisatorer<sup>19</sup>. En fejlkilde her er, at  $O_2$  reagerer med rubren<sup>20</sup>, og effekten af opkonverteringen vil derfor falde med tiden<sup>21</sup>. Derfor dopes rubren med 0,5 vol% DBP som det er gjort af Wu et al., hvor der blev observeret en forbedring<sup>22</sup>.



Figur 3.4 a) Strukturformel for rubren (Singh-Rachford et al., 2008, s. 2) og b) strukturformel for DBP (Wu et al., 2016, s. 2)

<sup>17</sup> Basova et al., 2018, s. 6-7

<sup>18</sup> Singh-Rachford et al., 2008

<sup>19</sup> Amemori et al., 2016, Abulikemu et al., 2019, Singh-Rachford et al., 2008, Wu et al., 2016,

<sup>20</sup> Singh-Rachford et al., 2008, s. 5

<sup>21</sup> Singh-Rachford et al., 2008, s. 3

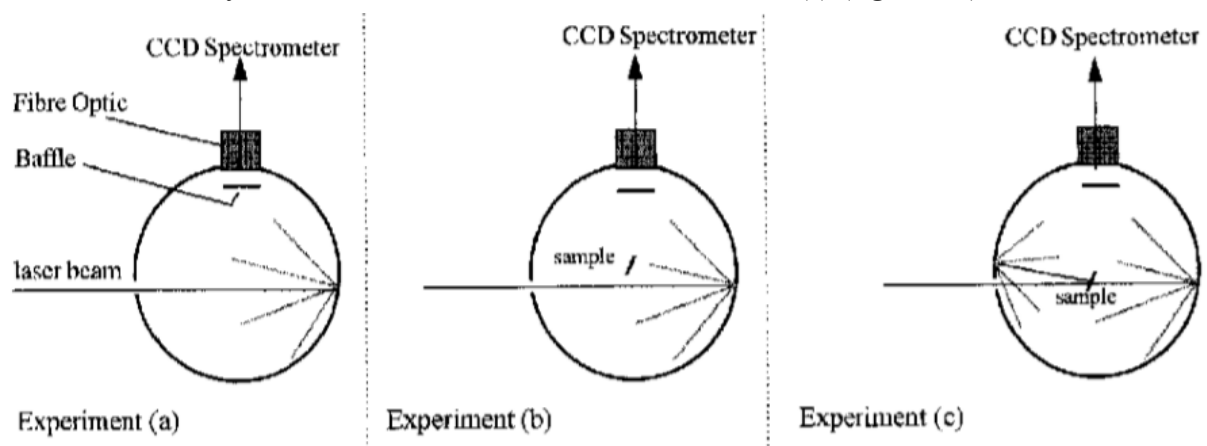
<sup>22</sup> Wu et al., 2016, s. 1

### 3.5 METODE

Jeg foretager kvantitative målinger på en blanding af emitteren og sensibilisatoren, både hvor de indgår i en opløsning og som en fast film. Disse målinger skal bestemme, om emissionen er forskudt i forhold til det lys, der blev brugt til at excitere prøven, og i så fald, hvor stor en andel af lyset, der er blevet opkonverteret til at kunne bruges i solcellen. Dette gøres ved målinger af deres absorptions- og emissionsspektre samt beregninger på intensiteten af lyset før og efter opkonvertering.

#### 3.5.1 Måling af film

For at karakterisere filmens emission benytter jeg metoden beskrevet af de Mello et al., 1997<sup>23</sup>. I denne metode bruges en integrerende sfære<sup>24</sup>, hvilket er en sfære, der er reflektiv på indersiden med et hul, hvor der sendes en laser igennem, og en anden åbning med et spektrofotometer (figur 3.5). Med dette apparat kan man foretage målinger på filmen, på trods af dens spredning af lyset. For at beregne prøvens absorption af laserens samt med hvilken effekt de absorberede fotoner emitteres foretages der tre målinger; først en måling uden prøven (a), derefter en måling, hvor prøven er i, men laseren rammer sfærens side og kun indirekte rammer prøven (b), og sidst en måling, hvor laseren rammer prøven direkte, men prøven er vinklet således, at det lys, der reflekteres rammer sfærens side (c) (figur 3.5).<sup>25</sup>



Figur 3.5 Illustration af den integrerende sfære og de tre opstillinger, under hvilke der foretages målinger (de Mello et al., 1997, s. 2)

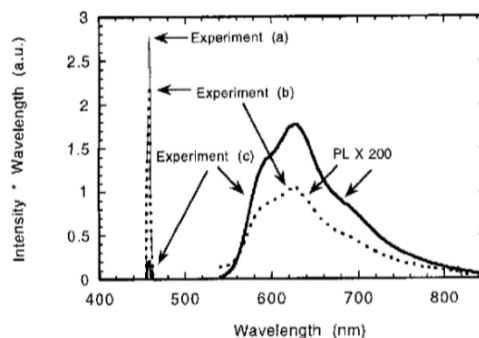
<sup>23</sup> de Mello et al., 1997

<sup>24</sup> Egen oversættelse fra det engelske 'integrating sphere'

<sup>25</sup> de Mello et al., 1997, s. 1



For hver af disse opstillinger måles intensiteten i forhold til bølgelængden, og ud fra disse resultater opstilles tre grafer, med bølgelængden ud ad x-aksen og produktet mellem intensiteten og bølgelængden op ad y-aksen (figur 3.6). Disse grafer bruges til at finde filmens absorption samt forholdet mellem antal absorberede fotoner og antal emitterede fotoner. På disse grafer ses et signal, der kommer af den del af lyset, der ikke er blevet absorberet af filmen, og dermed stadig har den oprindelige bølgelængde. Signalet kommer altså direkte fra laserens, og arealet under det kaldes L. Derudover vil der på grafen også være et bredere signal fra filmens emission, der i dette tilfælde forventes at ligge ved lavere bølgelængder end laserens signal.<sup>26</sup> Arealet under emissionens signal kaldes P.<sup>27</sup>



Figur 3.6 Eksempel på graf, der konstrueres ud fra målingerne i de tre opstillinger, her er der målt på film af MEH-PPV (de Mello et al., 1997, s. 2)

Ud fra disse målinger kan absorptionen findes ved:

$$A = 1 - \frac{L_c}{L_b} \quad (6)$$

Hvor:

$L_c$  er arealet under laserens signal i måling c, og  $L_b$  er arealet under laserens signal i måling b.<sup>28</sup>

Derefter kan forholdet mellem antallet af fotoner, der absorberes, når laseren rammer prøven direkte, og antallet af fotoner, der emitteres som følge deraf, findes:

$$\eta = \frac{P_c - P_b(1-A)}{L_a A} \quad (7)$$

Hvor:

$L_a$  er arealet under laser signalet i måling a, og dermed er proportional med den mængde fotoner laserens udsender og A er absorptionen. Dermed er brøkens nævner,  $L_a A$ , den mængde lys, der absorberes direkte.

For brøkens tæller gælder det, at  $P_c$  er arealet under måling c's emissionspektrum og svarer til mængden af lys, der samlet emitteres i måling c, som følge af lys, der

<sup>26</sup> Altså omvendt af eksemplet (figur 3.6), hvor laserens signal kommer først

<sup>27</sup> de Mello et al., 1997, s. 1

<sup>28</sup> de Mello et al., 1997, s. 2

direkte eller indirekte har ramt prøven.

$P_b$  er arealet under måling b's emissionspektrum og svarer dermed til mængden af lys, der emitteres, når prøven kun rammes indirekte af lyset.

(1-A) er den andel af lyset, der i måling c ikke absorberes af prøven, når den først rammes direkte af laserens.

Dermed svarer  $P_b(1 - A)$  til den mængde lys der i måling c emitteres som følge af lys, der indirekte har ramt prøven.

Trækkes dette fra  $P_c$  fås altså det lys der emitteres, som følge af det lys, der bliver absorberet direkte fra laserens.<sup>29</sup>

### 3.5.2 Måling i opløsning

I opløsningen måles absorptionen i det visuelle til nær-infrarøde område med et spektrofotometer. Emissionen måles, under excitation ved bestemte bølgelængder, med et spektrofluorometer. Dette måler intensiteten ift. bølgelængden. For nemmere at kunne sammenligne data for opløsningen med data for filmen, konstrueres en graf, der, som for filmen, viser produktet af intensiteten og bølgelængden ift. bølgelængden.<sup>30</sup> Den samme graf konstrueres også for en måling af laserens intensitet, og dermed kan lignende beregninger foretages for opløsningen:

$$\eta = \frac{P}{L \cdot A} \quad (8)$$

Her er P arealet under emissionsspektrummet, L er arealet under laserens og A er absorptionen af laserens bølgelængde, målt med spektrofotometeret.

## 4 FREMGANGSMÅDE

---

I det følgende vil jeg beskrive fremgangsmåden for udførelsen af projektet.

Overordnet set vil sensibilisatoren og emitteren først blive undersøgt i en opløsning for at se, om der opkonverteres fotoner. Hvis der observeres en opkonvertering af fotoner, vil de efterfølgende blive undersøgt som en film. Udførelsen af undersøgelserne af både opløsningen og filmen består i tre dele: Fremstilling af prøver, dataindsamling og databehandling. Jeg vil beskrive de tre dele under antagelsen, at de udføres for både opløsningen og filmen.

---

<sup>29</sup> de Mello et al., 1997, s. 2

<sup>30</sup> de Mello et al., 1997, s. 1

## 4.1 FREMSTILLING AF PRØVER

Fremstilling af prøver er ikke hovedfokus i dette projekt. Fremstillingen læner sig derfor op ad metoder beskrevet i anden litteratur, og beskrives kun overfladisk her. Sensibilisatoren  $VOPcCl_{16}$  kan ikke købes og skal derfor først syntetiseres. Derefter fremstilles den opløsning af sensibilisatoren og emitteren, der skal undersøges. Der laves desuden en opløsning med samme fremgangsmåde, men med et andet opløsningsmiddel, der er mere hensigtsmæssig for den efterfølgende fremstilling af tyndfilm.

### 4.1.1 Syntese af $VOPcCl_{16}$

Jeg syntetiserer  $VOPcCl_{16}$  som beskrevet af Basova et al., 2018, s. 2<sup>31</sup>, ved blanding af 11,6996 mg 3,4,5,6-tetrachlorphthalo-1,2-dinitril og 1,8206188 mg  $V_2O_5$ .

### 4.1.2 Fremstilling af opløsning

Både opløsningen, der skal måles direkte på og den, der skal bruges til fremstilling af filmen, blandes med samme forhold og koncentration af sensibilisator og emitter. Deres koncentrationer er 11  $\mu\text{M}$   $VOPcCl_{16}$  og 11 mM rubren dopet med 0,5 vol% DBP. Dermed opnås et blandingsforhold på 1:1000.<sup>32</sup> Der fremstilles 100 mL af hver opløsning. Til den opløsning, der udføres direkte test på anvendes toluen som opløsningsmiddel<sup>33</sup>. Til den opløsning, der skal bruges til fremstilling af film, anvendes opløsningsmidlet tetrahydrofuran (THF), da dette fungerer godt til den metode, der bruges til at fremstille filmen.<sup>34</sup> Fremstillingen af opløsningerne gøres i en handskeboks i en atmosfære af argon (>99,99%) for at undgå, at oxygen reagerer med rubren.<sup>35</sup>

### 4.1.3 Fremstilling af film

Til fremstillingen af filmen benytter jeg den hurtigtørrende støbe-metoden<sup>36</sup> da det er en simpel metode. Dette gøres som beskrevet af Abulikemu et al., 2019, s. 5<sup>37</sup>. Blandingen dryppes på en glas slide og tørrer hurtigt. Dette finder, ligesom blandingen af opløsningen, sted i atmosfæren med argon. Til sidst dækkes filmen

<sup>31</sup> Basova et al., 2018, s. 2

<sup>32</sup> Efter forhold i: Abulikemu et al., 2019, s. 5

<sup>33</sup> Som anvendt i: Singh-Rachford et al., 2008

<sup>34</sup> Abulikemu et al., 2019, s. 5

<sup>35</sup> Abulikemu et al., 2019, s. 5

<sup>36</sup> Egen oversættelse fra det engelske 'rapid-drying casting method'

<sup>37</sup> Abulikemu et al., 2019, s. 5

med et stykke glas, der forsegles. Dette gøres i en atmosfære, hvor der udover argon også er luft tilstede.<sup>38</sup>

## 4.2 DATAINDSAMLING

Begge prøver undersøges ved, at en laser exciterer dem. Der foretages 4 målinger ved forskellige bølgelængder fordelt i det interesseområde, der blev defineret i afgrænsningen. Dette gøres for at give et overblik over, hvordan sensibilisator-emitter kombinationen ville fungere under stråling fra hele interesseområdet. De valgte bølgelængder er: 650nm, 700nm, 762nm<sup>39</sup> og 800nm.

I opløsningen måles først absorptionen i det visuelle til nær-infrarøde område af det elektromagnetiske spektrum ved hjælp af et spektrofotometer. Herefter måles emissionen fra opløsningen under excitation af lasere med de tidligere angivne bølgelængder. Disse målinger foretages med et spektrofluorometer som beskrevet i teoriafsnittet.

Filmen testes, som beskrevet i teorien, i en integrating sphere. Der udføres målinger med de tre opstillinger for hver af de fire lasere.

## 4.3 DATABEHANDLING

Først sammenligner jeg emissionsspektrene for opløsningen med de bølgelængder, de blev exciteret af, for at se, om der er sket en forskydning. Er der ikke fundet en forskydning sted, eller er forskydningen sket mod højere bølgelængder, giver det ikke mening at gennemføre projektet med dets tænkte formål og fremgangsmåde.

Databehandling for opløsningen og filmen gennemføres derefter som beskrevet i teoriafsnittet, hvor absorptionen ved de enkelte bølgelængder, samt forholdet mellem antallet af absorberede og emitteret fotoner beregnes. Dog regnes der kun med de dele af  $P$ ,  $P_b$  og  $P_c$ , der befinder sig under 620 nm, og dermed er under båndgabets for solcellemodellen. I det ideelle tilfælde skal  $A$  være så tæt på 1 som muligt, så flest mulige af fotonerne udnyttes og  $\eta$  skal være tæt på 0,5, da dette ville betyde, at der udsendes en højenergifoton pr. to lavenergifotoner, der absorberes.

<sup>38</sup> Abulikemu et al., 2019, s. 5

<sup>39</sup> Der afviges her fra trinene på 50nm, da dette er den optimale absorption for stoffet, jf. figur 3.3a

## 4.4 BUDGET

Her følger projektets budget. Udstyr og laboratorie stilles til rådighed af SDU<sup>40</sup>, hvor forsøget vil finde sted, og dette indgår derfor ikke i budgettet. Alle priser er hentet fra Sigma Aldrich.

Materiale	Mængde	Pris
Rubren	5 g	8330 kr.
DBP	500 mg	3620 kr.
Tetrachlorophthalonitrile	5 g	1360 kr.
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1 g	333 kr.
Toluen	250 mL	449 kr.
THF	250 mL	679 kr.
Argon	1 L	1170 kr.
Engangsmaterialer, herunder glas slide		1500 kr.
Uforudsete udgifter		2500 kr.
Samlet		19941 kr.

## 5 KONKLUSION OG PERSPEKTIVERING

Gennem dette projekt vil jeg afprøve om fotonopkonvertering finder sted når  $VOPcCl_{16}$  anvendes som sensibilisator og DBP dopet rubren anvendes som emitter. Dette bliver undersøgt i forhold til anvendelse i en solcelle med et båndgab på 2,0 eV. I dette projekt undersøges sensibilisator-emitter kombinationen dog kun i to former; en opløsning, hvor de optræder i et forhold på 1:1000, og i en tyndfilm, der er fremstillet ved hurtigtørrende støbe-metoden, hvor de også har et forhold på 1:1000.

Viser det sig derfor, at opkonvertering finder sted med en betydelig størrelse, er det interessant at undersøge kombinationen yderligere under andre blandingsforhold eller fremstillingsmetoder af filmen, da det er muligt, at der er mere optimale kombinationer og metoder, end de, der er blevet anvendt i dette projekt. Dette gør sig især gældende, hvis kombinationen fungerer med høj nyttevirkning i opløsningen, og derefter ikke fungerer i filmen. Da det formentlig skyldes, at

<sup>40</sup> Efter aftale med Lissau, 11. oktober 2019

metoden til fremstilling af film ikke er optimal og bedre resultater kan opnås med andre metoder.

Der er også den risiko, at opkonvertering slet ikke finder sted eller kun i lille grad, i hvilket tilfælde det formentlig skyldes, at triplet- og singletenerginiveauerne ikke passer optimalt. De specifikke årsager kan eventuelt undersøges nærmere, da de også kan give en bedre forståelse af kravene for processen.

Optimalt set vil sensibilisator-emitter kombination fungerer, og dermed kunne anvendes til fotonopkonvertering i solceller. Dette vil optimere solcellen, der dermed bliver et mere konkurrence dygtigt alternativ til fossile brændstoffer.

## 6 TAK TIL

---

Jonas Sandby Lissau, postdoc ved Mads Clausen Institutet og SDU NanoSYD, min forskerkontakt.

## 7 LITTERATUR

---

### 7.1 ANVENDT LITTERATUR

#### 7.1.1 Artikler

- Abulikemu, A., Sakagami, Y., Heck, C., Kamada, K., Sotome, H., Miyasaka, H., . . . Yamada, H. (2019). Solid-State, Near-Infrared to Visible Photon Upconversion via Triplet–Triplet Annihilation of a Binary System Fabricated by Solution Casting. *ACS Applied Materials & Interfaces*.
- Amemori, S., Sasaki, Y., Yanai, N., & Kimizuka, N. (2016). Near-Infrared-to-Visible Photon Upconversion Sensitized by a Metal Complex with Spin-Forbidden yet Strong S<sub>0</sub>–T<sub>1</sub> Absorption. *Journal of the American Chemical Society*.
- Basova, T. V., Kiselev, V. G., Klyamer, D. D., & Hassan, A. (2018). Thin films of chlorosubstituted vanadyl phthalocyanine: charge transport properties and optical spectroscopy study of structure. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*.

- de Mello, J. C., Wittmann, H. F., & Friend, R. H. (1997). An Improved Experimental Determination of External Photoluminescence Quantum Efficiency. *Advanced Materials*.
- Energistyrelsen. (2018). *Energistatistik 2017*. Energistyrelsen.
- Pedrini, J., & Monguzzi, A. (2018). Recent advances in the application triplet–triplet annihilation-based photon upconversion systems to solar technologies. *Journal of Photonics for Energy*.
- Schulze, T., Lips, K., & Schmidt, T. W. (2014). Enhancing solar cells with photochemical upconversion. *SPIE Newsroom*.
- Simon, Y. C., & Weder, C. (2012). Low-power photon upconversion through triplet–triplet annihilation in polymers. *Journal of Materials Chemistry*.
- Singh-Rachford, T. N., & Castellano, F. N. (2008). Pd(II)Phthalocyanine-Sensitized Triplet-Triplet Annihilation from Rubrene. *The Journal of Physical Chemistry*.
- Wilke, B. M., & Castellano, F. N. (2013). Photochemical Upconversion: A Physical or Inorganic Chemistry Experiment for Undergraduates Using a Conventional Fluorimeter. *Journal of Chemical Education*.
- Wu, M., Congreve, D. N., Wilson, M. W., Jean, J., Geva, N., Welborn, M., . . . Baldo, M. A. (2016). Solid-state infrared-to-visible upconversion sensitized by colloidal nanocrystals. *Nature Photonics*.

### 7.1.2 Bøger

- Bisquert, J. (2018). *The physics of solar cells : perovskites, organics and photovoltaic fundamentals*. CRC Press.

### 7.1.3 Websteder

Sigma Aldrich: <https://www.sigmaaldrich.com/denmark.html>

Sønderriis, E., & Fenger-Grøndahl, M. (maj 2018). *Klimaforandringer*. Hentet fra Faktalink: <https://faktalink.dk/titelliste/klimaforandringer>

## 7.2 ØVRIG LITTERATUR

### 7.2.1 Artikler

Kamada, K., Sakagami, Y., Mizokuro, T., Fujiwara, Y., Kobayashi, K., Narushima, K., . . . Vachad, M. (2016). Efficient triplet–triplet annihilation upconversion in binary crystalline solids fabricated via solution casting and operated in air. *Materials Horizon*.

### 7.2.2 Bøger

May, V., & Kühn, O. (2011). *Charge and Energy Transfer Dynamics in Molecular Systems*. WILEY-VCH.

Reiher, M., & Wolf, A. (2015). *Relativistic Quantum Chemistry*. WILEY-VCH.