

Slutrapport

Projektinformation

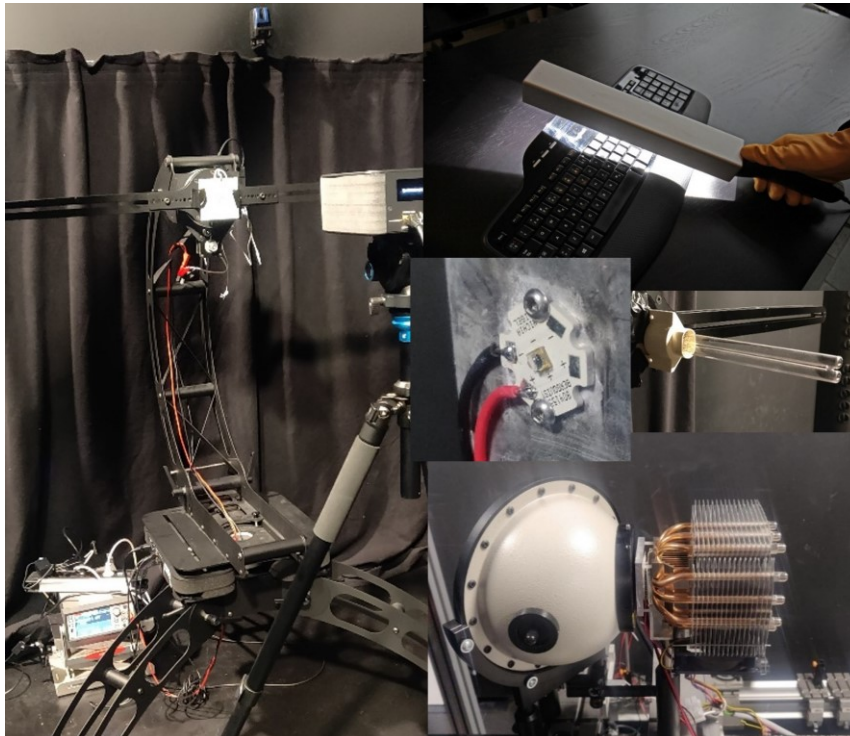
Projekttitel	Effektiv UV Desinfektion
Journalnummer	353-015
Projektansvarlig organisation	DTU Electro
Projektpartnere	LED iBond A/S
Projektets slutdato	28-2-2023

Slutrapport for

Effektiv UV Desinfektion

ELFORSK 353-015

28-2-2023



Af

Carsten Dam-Hansen - DTU Electro
Dennis Corell - DTU Electro
Anders Thorseth - DTU Electro

Ryan Rosenberg - LED iBond A/S
Martin Løbel - LED iBond A/S



LED iBOND

I. Indhold

Slutrapport	1
Projektinformation	1
1. Projektresumé	4
1.1 Summary	4
2. Projektformål	5
3. Projektgennemførelse	5
4. Projekt resultater	6
4.1 UVC-LED og lavtryks UVC rør	6
4.2 Måling af UV-stråling	8
4.3 Testfaciliteter	9
4.4 UVC lyskilder	10
UVC rør	10
4.5 UVC LEDs	12
4.6 UVC-LED moduler	13
4.7 Desinfektions systemer	17
4.8 Test af dosimetre	22
4.9 Målgruppe og formidling af resultater	24
5. Anvendelse af projektresultater	26
6. Konklusion og perspektivering	27
6.1 Perspektivering	28
7. Referencer	29
8. Bilag A Formidlingsaktiviteter	31
9. Bilag B Foto til formidling	32

1. Projektresumé

Formålet med projektet er at sætte fokus på ny UVC LED teknologi til desinfektion, som er på vej og som kan blive en energieffektiv erstatning for lavtryks kviksølvholdige UV rør. Dette er højaktuelt i forhold til EU's udfasning af kviksølvholdige lyskilder der rammer lavtryks UVC rør i 2027.

Der er opbygget nye spektrometriske faciliteter til test ned til 200 nm af såvel enkelt UV LED og store UV armaturer. Energieffektiviteter for UVC LEDer på 1.4 % til 2.5 % afhængig af operations-strøm og -temperatur er vist igennem test for to typer LEDer. LED iBond har ud fra disse test i et tæt samarbejde med DTU Electro designet og fremstillet tre typer af UVC-LED baserede LED moduler. Test og simulering af modulerne og to demonstrations desinfektions systemer, viser fordelene ved brug af UVC-LEDer men at energieffektiviteten er mindst en faktor 10 lavere end for lavtryks UVC rør. Simulering ud fra målte intensitetsfordelinger giver bedst overensstemmelse med målinger i fjernfeltet. I systemer hvor emnet der skal desinficeres er meget tæt på LEDerne er det nødvendigt med simulering i nærfeltet. Kameraaflysning af engangs dosimetre er demonstreret, men kræver optimering af belysning under kameraoptagelse og farveforskelsberegninger. Test og simulering modeller giver et solidt udgangspunkt for LED iBond som de vil benytte i deres arbejde med design og udvikling af deres nuværende og nye UVC-LED moduler og desinfektions systemer.

Resultaterne er i høj grad af generel karakter og er formidlet bredt til industrien der arbejder med UVC desinfektions systemer, belysningsindustrien generelt og forskningsverdenen. Dette er sket igennem branche artikler og temadage med laboratorie fremvisning. DTU Electro's nye kompetencer og faciliteter til måling og simulering af UVC-stråling bliver anvendt i undervisningen af studerende på DTU og for industrien ved rådgivning og uvildig test af UVC-LED og UVC-baserede desinfektions systemer.

1.1 Summary

The purpose of the project is to focus on new UVC LED technology, which is on the way and can become an energy-efficient replacement for low-pressure mercury-containing UV tubes. This is highly topical in relation to EU's phase-out of mercury-containing light sources, getting to low-pressure UVC tubes in 2027.

New facilities have been established for spectroradiometric testing down to 200 nm of both single UV LEDs and large luminaires. Energy efficiencies for UVC LEDs of 1.4% to 2.5% depending on operating power and temperature have been shown through testing of two types of LEDs. Based on these tests, LED iBond has, in close collaboration with DTU Electro, designed and developed three types of UVC-LED based LED modules. Testing and simulation of the modules and two demonstration disinfection systems show the advantages of using UVC LEDs, however with an energy efficiency that is at least a factor of 10 lower than that of low pressure UVC systems. Simulations based on measured intensity distributions provides the best agreement with measurements in the farfield, and in systems where the item to be disinfected is very close to the LEDs, near-field simulation is necessary. Camera reading of disposable dosimeters has been demonstrated, but requires optimization of lighting during camera shooting and color difference calculations. Test and simulation models provide a solid starting point for LED iBond, which they will use in their future work on UVC-LED modules and disinfection systems.

The results are of a general nature and have been disseminated to the industry working with UVC disinfection systems, the lighting industry and the research community. This has been done through industry articles and seminars with laboratory showcasing. DTU Electro's new competencies and facilities for measuring and simulating UVC radiation will be used in the teaching of students at DTU and, providing industry, impartial testing of and consultancy on UVC-LEDs and disinfection systems.

2. Projektformål

Projektet skulle sætte fokus på ny UVC LED teknologi, som er på vej og som kan blive en energieffektiv erstatning for lavtryks kviksølvldamp lamper i UVC desinfektionssystemer. Corona pandemien har bragt en kraftig øget efterspørgsel efter denne teknologi for at bremse spredningen af vira. Og en erstatning er nødvendig nu, da EU netop i år har startet udfasningen af lysstofrør på grund af det miljøfarlige kviksølv, og fra 2027 udfases kviksølvholdige lamper der udsender UV stråling. UVC LEDer har stadig en lavere udgangseffektivitet, men de har en række fordele, som f.eks. kompakt udformning, snæver udstrålingskarakteristik og hurtig opstart, som kan opveje dette i systemer.

Formålet med projektet var at igennem demonstratorer vise nuværende state-of-the-art og hvordan fordelene ved UVC LED teknologien, i nogen situationer, kan sikre højere system effektivitet for UV-C desinfektions systemer. Computer design og optimering af UVC optiske systemer skal vise den opnåelige systemeffektivitet i forskellige anvendesscenarier. Dette benyttes til udvikling og demonstration af UVC desinfektionssystemer og moduler hos LED iBond. Derudover skal slutbrugere have nye muligheder for at kunne vurdere effektiviteten af de UV-C systemer de benytter. For at slutbrugere skal kunne sikre sig at der er givet den nødvendige UV strålingsdosis og ønskede desinficerings effekt, undersøges og udvikles målemetoder til prisbillige sensorer, som kameraaflæsning af engangs UVC-dosimetre.

Den generelle opnåede viden skal formidles til industrien igennem branche artikler, foredrag, laboratoriefremvisninger, og bringes ind i undervisningen af f.eks. ingeniørstuderende så dansk industri vil være forberedt på den nye UVC teknologi der indenfor de næste ti år vil komme til at dominere markedet.

Der er i projektet arbejdet med måling af UV stråling og etableret nye testfaciliteter til måling af UVC kilder, moduler og armaturer baseret på array spektroradiometre som gør det muligt at teste og karakterisere de kilder og moduler der udvikles i projektet. Ud fra test er der sammenlignet effektivitet og andre egenskaber af UVC kilder, som lavtryks UV rør og UVC LEDer. Testresultaterne er benyttet i arbejdet med design, modellering og udvikling af UVC LED moduler som indgår i UVC LED desinfektions systemer. LED iBond har udviklet og fremstillet tre typer af UVC LED moduler, som er testet i forhold til total strålingsstrøm, intensitetsfordeling og effektivitet og variationer er analyseret. Simulering af irradians og dosis baseret på modul testdata, og sammenligning og analyse af simuleringresultater og måleresultater er gennemført. Når det i UVC desinfektions system ikke er muligt at måle direkte irradians på grund af pladsproblemer ses på UV dosis måling med engangs dosimetre været benyttet af LED iBond, og der er arbejdet med udvikling og kalibrering af kameraaflæsningsmetode til dosimetre i denne forbindelse. I formidlingsarbejdet af projektets ideer og resultater er der arrangeret temadage i starten og slutningen af projektet, skrevet artikler og resultater inddrages i undervisningen indenfor radiometri og LED teknologi.

3. Projektgennemførelse

Projektet har været opdelt i en række arbejdsopgaver som har understøttet samarbejdet imellem projektpartnerne:

- AP1 Projektadministration Afholdelse af projektmøder, koordination af samarbejde/arbejdsopgaver, faglig og økonomisk rapportering
- AP2 Litteratur og markedsstudie, Har givet overblik over test standarder, UVC lyskilder og deres egenskaber. Der er udvalgt og indkøbt lavtryks UVC rør og UVC LEDer, med høj effekt og forskellig udstrålingsvinkel.

- AP3 Test og karakterisering, Etablering af testfaciliteter til måling af total strålingsstrøm, intensitet og effektivitet af små og store UVC lyskilder. Test og karakterisering af lavtryks UVC rør og UVC LEDer, de af LED iBond fremstillede UVC LED moduler og desinfektions systemer.
- AP4 Design og modellering af UVC systemer, Fastlæggelse af krav til systemerne, design og optimering i Zemax/Dialux - optisk design software. Lyskilder modelleres ud fra stråledata og måleresultater fra AP3.
- AP5 Udvikling og demonstration, Udvikling og fremstilling af tre typer UVC LED moduler, som er benyttet i to UVC LED desinfektions systemer. Moduler er testet i AP3.
- AP6 UVC dosis måling, Test af dosimetre til verifikation af dosis, test af kameraafænsnings metode.
- AP7 Analyse og formidling, Analyse og sammenligning af måleresultater og simuleringer. Udarbejdelse af artikler, undervisningsmateriale, afholdelse af LED temadag og præsentationer for branchen.

Projektet var præget af forsinkelser i den første del af projektet, forårsaget af sygdom hos begge partners personale, hvilket var en risiko for projektgennemførelsen. På trods af dette er projektet gennemført tilfredsstillende og med opfyldelse af de oprindelige milepæle, med udtagelse af artikel omkring UV-C teknologier og måling (M2) som ikke blev færdiggjort i projektperioden. Den vil blive publiceret efterfølgende. Store dele af slutrapportens projektresultat afsnit er benyttet til undervisningsmateriale og senere hvidbog om UVC LED teknologi og måling af UVC-stråling.

4. Projekt resultater

I de følgende afsnit beskrives projektets resultater, som indeholder baggrundsviden om og test af UVC-LED teknologi og lavtryks UVC rør, måling af UVC stråling og nye testfaciliteter, design, udvikling og test af UVC LED moduler, og test simulering af to forskellige systemer demonstrations UVC desinfektions systemer, samt test af dosimetre. Der er således opnået resultater indenfor alle de områder der var planlagt i projektet og i det forventede omfang.

4.1 UVC-LED og lavtryks UVC rør

Udvikling indenfor UV LED, minder meget om den vi så for hvide lysdioder for tyve år siden, hvilket har gjort LED teknologi til den mest energieffektive belysningsteknologi. Det forventes at UV-C LED teknologien på grund af høj efterspørgsel vil udvikles som den blå LED har gjort og estimeret er at man i 2030 vil kunne have UV-C LED med 50 % effektivitet og en pris pr UV-C strålingsmængde der er ti gange mindre end i dag [1]. De bedste blå LEDer i bølglængdeområdet har i dag effektiviteter målt i optisk effekt i forhold til elektrisk effektforbrug på mere end 80 %. Disse er baseret på Indium Gallium Nitrid (InGaN) halvleder materialesystemer, hvor UVC LEDer baseret på Aluminium Gallium Nitrid (AlGaIn). For disse er der større problemer med at opnå høje kvante og foton effektiviteter, spørgsmålet er derfor om vi kan forvente helt den samme udvikling som for blå LEDer [2]. I dag findes UV-C LEDer som med en effektiviteter på 1-10 %, der udsender stråling i bølglængdeområdet 270-280 nm, hvor de 10 % er bedste forskningsresultater.

Kviksølvs baserede lamper/rør er den dominerende teknologi, der i dag benyttes i bakteriedræbende UV-C systemer til effektiv desinficering af overflader, luft og vand. Der findes forskellige typer af UVC-rør, lavtryksrør (LP), lavtryksrør med høj udgangseffekt (LPHO) og mellemtryks rør (MP) [3]. Sådanne rør/lamper har i sig selv effektiviteter i området 25-65%, men effektiviteten falder når de benyttes i et armatur.

Så der er stadig langt fra lavtryks lampers effektivitet, på omkring 35 %, til UVC LED under 10 %, men LED teknologi har en række fordele som i system sammenhænge kan gøre dem mere anvendelige og effektive i forhold til lavtrykslamper i system sammenhænge. Disse fordele er vist i Tabel 1 hvor en række egenskaber er vist for hhv. lavtryksrør og UVC LED. UVC LEDer har en lang mindre formfaktor og kan benyttes steder hvor det ikke er muligt at benytte lavtryk rør.

Tabel 1 sammenligning af egenskaber af lavtryks UVC rør og UVC LED, med beskrivelse af fordele for UVC LED teknologi.

Egenskab	Lavtryks UVC rør	UVC LED	Fordel for UVC LED
Opvarmningstid	1-15 minutter	Straks med maksimal strålingsstrøm	Muliggør hurtig tænd og sluk
Formfaktor	Lange cylinder formede lyskilder	Små SMD komponenter	Kan placeres på svært tilgængelige steder
Holdbarhed	Skrøbelige kvartsrør	Robuste	Ingen rengøringsproblemer som ved itu lavtryksslamper
Levetid	9000 timer	10000 timer	samme
Effektivitet	35 %	2-10%	lavere effektivitet
Nuværende pris pr. UV-C W	Ca. 1\$	Ca. 80\$	Meget dyrere
Bølgelængde	254 nm	270-285 nm	Valgbar bølgelængde og bredere spektrum
Udstrålingsprofil	Alle retninger 360°	Halvrumlige, 60°-130°	Nemmere at styre strålingen med optik/reflektorer Bedre system effektivitet
Tænd/sluk	begrænset	"ubegrænset", driver sætter begrænsning	Mindre energispild da man kan tænde når der er brug for det
Driver	Ballast, 230 V	< 50 V	Muliggør batteridrift
Kviksølvindhold	5-200 mg	Intet	Sikker bortskaffelse

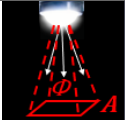

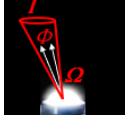
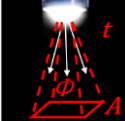
Så selv om effektiviteten af UVC LED er meget lavere end for lavtryksrør, så er der allerede nu god grund til at undersøge nærmere om det i forskellige system design er en fordel at benytte UVC LEDer. Det er det projektet her giver en række værktøjer og måleresultater til at kunne vurdere.

Lysstofrør til generel belysning med kviksølv, er nu ved at blive udfaset i EU, ved at man har fjerner undtagelserne fra RoHS-direktivet. Lysstofrør af typen T5 og T8 udfases allerede i august 2023, ifølge EU direktiv 2022/284 [4]. Det skal lede til massive energibesparelser og reduktion af kviksølvudledningen og må være et led at leve op til Minimata konventionen omkring kviksølv, <https://mercuryconvention.org/en>. Undtagelserne for brugen af lavtryksrør der hovedsageligt udsender UV lys fjernes fra 24. februar 2027 ifølge EU direktiv 2022/287 [5]. Det er endnu en grund og altså på høje tid at finde alternativer til lavtryks UVC rør, og her er UVC LED teknologi et godt alternativ, der forventes at øge sin effektivitet i de kommende år.

4.2 Måling af UV-stråling

I forhold til UVC stråling er det vigtigt at kunne beskrive den total stråling der kommer fra en lyskilde, hvor meget der udsendes i en bestemt retning, hvor meget stråling der rammer en flade og tilsvarende hvor meget energi der rammer en flade over en vis tid. I Tabel 2 er vist de vigtigste radiometriske parametre til beskrivelse af stråling fra UV lyskilder, med deres danske, engelske navne, kort beskrivelse, symbol og måleenhed.

Tabel 2 Oversigt over radiometriske parametre

Parameter	Beskrivelse	Symbol og måleenhed	illustration
Irradians (eng. Irradiance)	den modtagne strålingsstrøm (effekt) pr. areal enhed	$E_e = \Phi_e / A$ [W/m ²]	
Strålingsstrøm (eng. radiant flux, radiant power)	den totale strålingsstrøm der udsendes fra en lyskilde	Φ_e [W]	
Intensitet (eng. radiant intensity)	Beskriver intensiteten af en lyskilde i en given retning, som strålingsstrømmen pr. rumvinkel enhed.	$I_e = \Phi_e / \Omega$ [W/sr]	
Dosis (eng. Dose)	Beskriver den tilførte strålingsstrøm pr. areal enhed (irradians) over tiden t, svarende til energi pr. areal.	$D_e = E_e t$ [J/m ²]	

Instrumenter til UV måling:

UV radiometre er detektorer der er specifikt lavet og kalibreret til at måle UV stråling i en specifikt bølgelængde område og er ofte designet til et bestemt irradians niveau. De benyttes til måling af irradians og dosis. Det er vigtigt at disse radiometre er kalibreret med den samme type lys/strålingskilde som det skal bruges til at måle på, ellers fås spektral mismatch fejl. Dette er ikke et problem for lavtryks UV rør som udsender stråling ved en bestemt bølgelængde, 253.7 nm, men kan være et problem for UVC LEDer hvor det ikke vides på forhånd hvordan spektralfordelingen er. De kan have peak bølgelængder fra 270 nm - 285 nm, og kræver derfor et radiometer med fladt spektral response eller et spektrometer.

Spektroradiometre [6] måler irradians eller total flux som funktion af bølgelængden, og det er derfor muligt at få mere detaljerede målinger af UVC LEDers spektralfordeling som ikke kendes på forhånd som spektralfordelingen af lavtryks UV rør. Til UV måling har det tidligere været anbefalet at benytte skannede dobbelt monokromatorer, som måler én bølgelængde ad gangen. Det er for at sikre et lavt niveau af stray light som giver meget støj i UV området. Men det er meget dyre og langsomme instrumenter. I dag benyttes array spektrometer med stray light correction (SLC) som minimerer denne støj. Det er billigere og langt hurtigere instrumenter, der måler hele bølgelængdeområdet på en gang. De testfaciliteter, integrerende kugle spektrometer og goniospektrometer, der er opbygget i projektet baseres begge på array spektrometer med SLC der er kalibreret med deuterium bredbåndskilder og sikrer måling med lav usikkerhed ned til 200 nm.

UV-dosimeter mærkater eller markeringer lavet af materialer, der ændrer farve som funktion af UV-dosis. Fotokromatisk blæk skifter farve for at angive niveauet af UV-C-bestråling, der leveres til en overflade. Mærkatene er specielt produceret til forskellige bølgelængder og intensitetsområder. En række forskellige produkter

er tilgængelige til 254 nm stråling, nogle til UVC LED stråling i bølgelængdeområdet 260-280 nm. Efter UV-C-desinfektionscyklussen er afsluttet, bekræftes farveændringen på kortene eller prikkerne med det samme eller inden for 24 timer for at få de bedste resultater. UVC-dosimetre er beregnet til engangsbrug og bør ikke genbruges. I dette projekt er der indkøbt og testet dosimeterpuder til UVC LED'er og 254 nm stråling. Disse er fra det svenske firma Intellego Technologies.

Teststandarder

Som udgangspunkt for målingerne benyttes CIE S025 som test standard der sætter betingelser for målingerne. Som udgangspunkt for målingerne benyttes den internationale standard, CIE S 025: 2015 Test Method for LED Lamps, LED Luminaires and LED Modules [7] som test standard der sætter betingelser for målinger af LED lyskilder og armaturer. Den europæiske og danske standard er teknisk enslydende hermed og blev skrevet samtidig med [7]: EN 13032-4 Lys og belysning – Måling og præsentation af fotometriske data for lyskilder og armaturer - Del 4: LED-lyskilder, -moduler og -armaturer. [8]

Der er publiceret to dokumenter omkring måling af UV stråling indenfor projektperioden. Det er en nord amerikansk standard: ANSI/IES/IOVA LM-92-22 Approved Method: Optical and Electrical Measurement of Ultraviolet LEDs [9]. Denne beskriver hvorledes UV LEDer skal elektrisk og temperatur kontrolleres under målinger og hvilke optiske målesystemer der kan benyttes herunder integrerende kugle spektroradiometer og goniospektroradiometre. Standarden er fortrinsvist rettet mod kort puls målinger af UV LEDer.

Det andet dokument er en teknisk rapport fra CIE: CIE 247:2021 Guide for the Gonioradiometric Measurement of Upper Air Ultraviolet Germicidal Irradiation Luminaires [10], der beskriver gonioradiometriske målinger af en speciel type UVC armaturer til bestråling af øvre luftlag i rum.

4.3 Testfaciliteter

Der er i projektperioden opbygget to nye faciliteter til måling af UV-stråling fra lyskilder. Begge er baseret på array spectroradiometre, der er stray light korrigerede, der gør det muligt at måle den spektrale fordeling af strålingen helt ned til 200 nm med en lav usikkerhed.

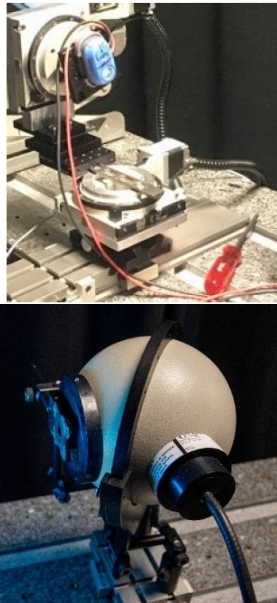
Nyt UV-VIS spektroradiometer (CAS-140 D, Instrument Systems) dækkende 200- 830 nm, som blev indkøbt på en H.C. Ørsteds fonds bevilling og installeret. Som opsamlingsoptik benyttes en $\varnothing 150$ mm Integrerende kugle, med en stabiliseret PTFE belægning, hvilket som er stabil overfor UV-C stråling og som minimerer fluorescens, der ellers vil give store fejlmålinger. Den integrerende kugle har en portåbning på $\varnothing 25$ mm hvilket muliggør

- måling af total spektral strålingsstrøm [W/nm] fra mindre lyskilder som de enkelt UVC-LEDer der undersøges i dette projekt.

Og med en apertur placeret foran portåbningen der begrænser lyset til et givet og kendt areal, muliggøres

- måling af spektral irradians [W/m² nm] i et givet plan og afstand fra en lyskilde, med kvadratisk apertur: 1 cm² og cirkulære aperturer: $\varnothing 2$ -15 mm
- måling af intensitet i én given retning [W/sr]

Desuden er opbygget et lille horisontalt goniospektrometer, bestående af to computer styrede rotationsstages, og som benytter den Integrerende kugle som detektor for spektral irradians.



Figur 1 Foto af bænk goniospektro-radiometer (øverst) med integrerende kugle (nederst) som detektor



Figur 2 Foto af LabSpion goniospektrometerradiometer hvor UVC-rør i armatur er monteret og hvor UV-VIS sensoren er placeret 2.5 m fra rotationscentret for LabSpion.

Med den integrerende kugle er det ikke muligt at måle total strålingsstrøm fra større lyskilder, > 15 mm. For at kunne måle total spektral strålingsstrøm og intensitet som funktion af udstrålingsvinklen fra større lyskilder er der derfor indkøbt en UV-VIS sensor til det eksisterende horisontale fjernfelts goniospektrometerradiometer (LabSpion, Viso Systems). Sensoren er et stray light korrigeret array spektrometerradiometer der måler i området 200-850 nm, se Figur 2. Dette muliggør

- måling af total spektral strålingsstrøm [W/nm] fra lyskilder med dimensioner op til 1500 mm
- måling af intensitetsfordeling fra lyskilder med dimensioner op til 1500 mm
- Generering af lysintensitets fordelings filer i ies. og/eller ldt. filformat.

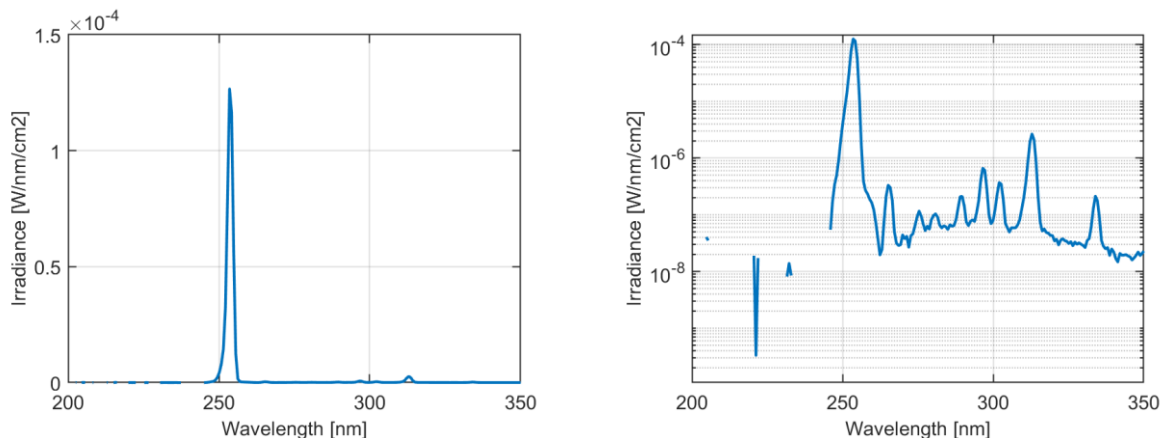
Disse to testfaciliteter er benyttet til måling af enkelt LEDer, UV moduler og systemer. Da UV-VIS sensoren havde lang leveringstid, blev de første målinger udført på et tilsvarende system hos leverandøren Viso Systems.

4.4 UVC lyskilder

Der er i projektet udført radiometriske test af de forskellige typer af UVC-lyskilder i de to testfaciliteter. Det er lavtryks UVC-rør og to typer af high power UVC LEDer.

UVC rør

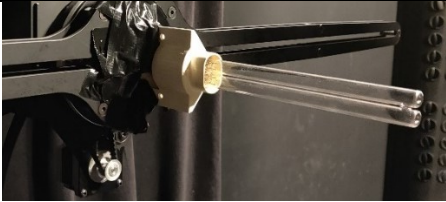
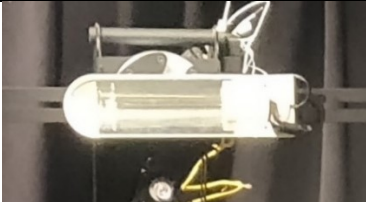
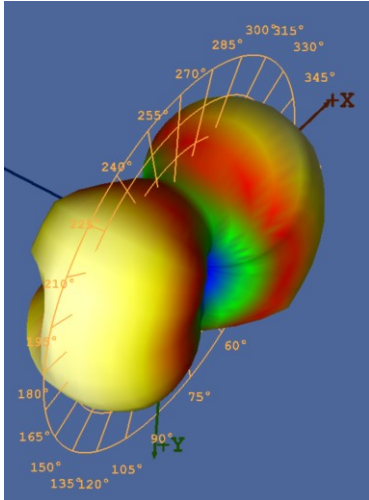
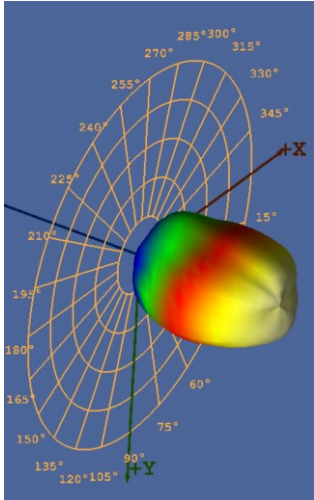
Der er valgt et 11 W lavtryks UVC-rør som eksempel til måling af strålingstrøm og effektivitet. som indeholder kviksølv (Hg) og udsender kortbølget UV-stråling med en peak ved 253,7 nm, svarende til en Hg-linje. Lampeglasset frafiltrerer den ozondannende linje ved 185 nm. Der er benyttet en driver til røret som gør at den samlede afsatte effekt er 15.3 W. I Figur 3 er vist den målte spektralfordeling af strålingen, der viser peaken ved 253.7 nm. Bredden af den målte kurve er bestemt af spektrometerradiometeret og ikke af Hg-linjen der er smallere. På den logaritmiske skala kan de andre 100 x svagere peaks ses.



Figur 3 Målt spektral irradians for UVC lavtryksrøret, vist på hhv. lineær skala (venstre) og logaritmisk skala.

Total strålingsstrøm og intensitetsfordeling er målt i fjernfelts goniospektrometret, se Figur 2. Tabel 3 er vist resultaterne af goniospektrometer måling af UVC-rør alene og i armatur. Reflektoren i armaturet er ikke optimeret til UVC stråling, men målingerne viser principperne.

Tabel 3 Resultater af goniospektrometer måling af UVC-rør alene og i armatur.

	UVC-rør	UVC-rør i armatur
Lyskilde monteret		
Strålingsstrøm	3782 mW	2500 mW
Effektivitet	24.7 %	16.3 %
Max. intensitet	485 mW/sr	1013 mW/sr
intensitets fordeling		

Det ses at UVC-røret i sig selv udstråler til begge sider af rørets længderetning. Her udsender det en strålingsstrøm på 3782 mW med en effektivitet på 24.7 %. I armaturet reflekteres strålingen til den ene side og sendes i modsat retning. Det ses at den maximale intensitet øges fra 485 mW/sr til 1013 mW/sr, men effektiviteten falder til 16.3 %. Man får således mere stråling ned på fladen under armaturet.

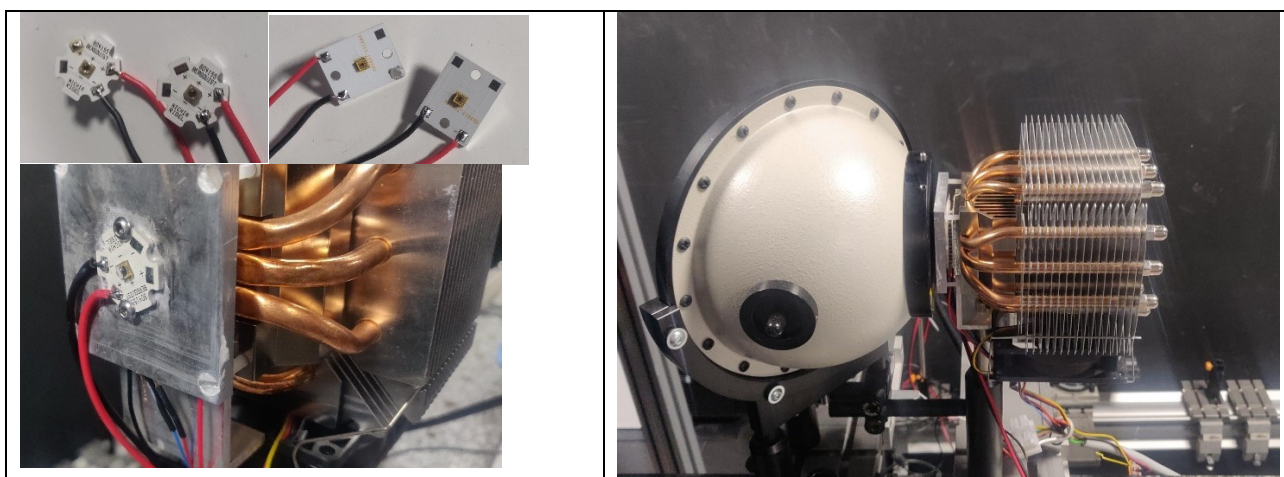
4.5 UVC LEDs

LED iBond benytter to typer af UVC LEDer i deres moduler. Det er fra Luminus og fås i bølgelængde bins fra 270 nm til 285 nm. I Tabel 4 er test id og hovedparametre vist for de to typer af UVC LEDer der er benyttet i projektet. De har en maksimal operationsstrøm på 800 mA og minimum strålingsstrøm er givet for 500 mA.

Tabel 4 Bin og test id beskrivelse for de to typer af UVC LED

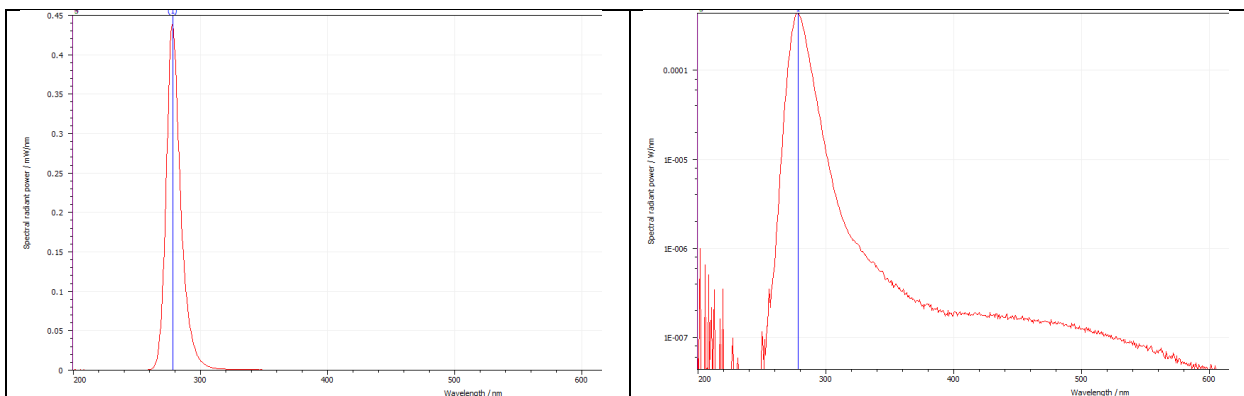
UVC LED Datasheet link	Bin	Test Id.	I _{max} [mA]	Min. Flux 500 mA [mW]	Viewing angle [deg]
XST-3535-UV	A60-CE270-00	L32373	800	56	60
XBT-3535-UV	A130-CD275-00	L32374	800	49	130

De to typer af UVC LEDer er leveret fra LED iBond og hos DTU Electro er de monteret på test aluminiums print, som igen monteres på temperatur kontrol enhed, se venstre del af Figur 4. Med denne montering kan de testes med konstant operations temperatur på aluminiums printet. I opstillingen på Figur 4 til højre er test printet positioneret i den integrerende kugles port.



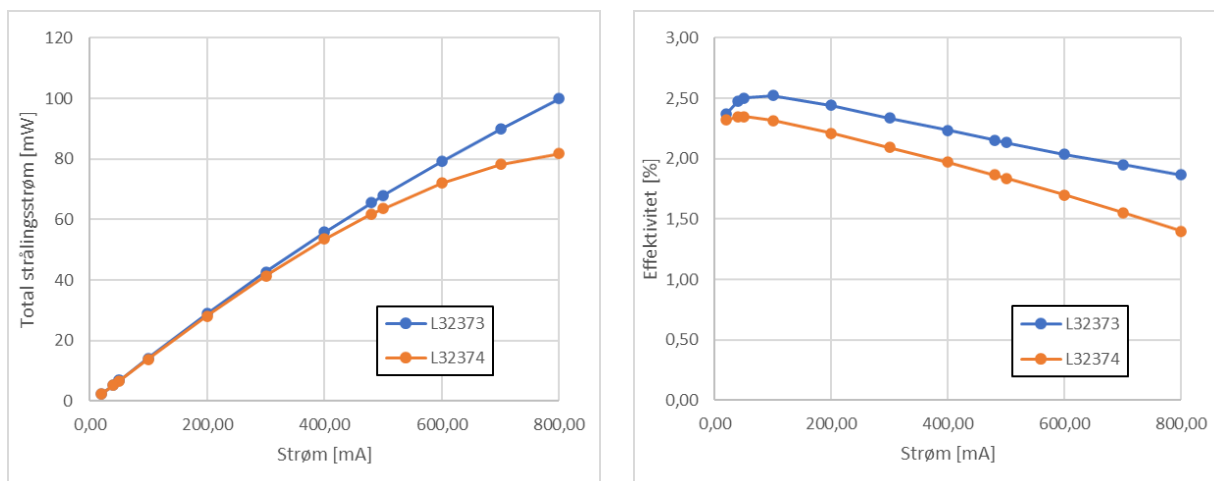
Figur 4 Foto af UVC LEDer til test, monteret på testprint, på temperatur kontrolleret holder og indsat i port i integrerende kugle.

Som et eksempel er der i Figur 5 vist den målte spektralfordelingen for L32373, som ses at have en peak værdi ved 274 nm. Til højre er den samme kurve vist på en logaritmisk skala, hvor det kan ses at spektralfordelingen er skæv med en hale ind i det synlige område.



Figur 5 Målt spektral fordeling for UVC LED (L32373), vist på hhv. lineær skala (venstre) og logaritmisk skala.

UVC LEDens strøm varieres fra 20 mA til den maksimale strøm på 800 mA og den totale spektrale strålingsstrøm er målt for hver strømværdi. På Figur 6 er vist den målte total strålingsstrøm (venstre) og effektivitet (højre) som funktion af strømmen.



Figur 6 Målt total strålingsstrøm (venstre) og effektivitet (højre) som funktion af den operations strømmen, for de to typer af UVC LEDer.




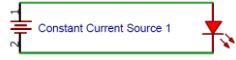
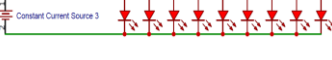
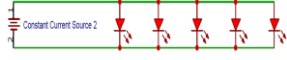
For lave operationsstrømme under 300 mA ses for begge LEDer en lineær stigning i strålings-strømmen. For højere strømme sker der en mætning hvor strålingsstrømmen ikke længere stiger lineært med strømmen. Denne mætning er mest udpræget for L32374. Det ses at de målte værdier ved 500 mA på hhv. 68 mW og 64 mW er hhv. 21 og 30 % højere end de opgivne minimum flux værdier givet i Tabel 4. Til højre på Figur 6 er vist den beregnede effektivitet som funktion af strømmen. Det ses at den højeste effektivitet opnås ved omkring 50 mA, som er hhv. 2.52 % og 2.35 %. Effektiviteten ses at falde for øget strøm til hhv. 1.9 % og 1.4 %. Det vil derfor være en fordel at benytte flere LEDer ved en lav strøm for at opnå en bestemt total strålingsstrøm. Prisen for UVC LEDer er dog høj og taler imod dette.

4.6 UVC-LED moduler

LED iBond har designet tre forskellige slags UVC LED moduler, der vil kunne indgå som delelementer i UVC desinfektions systemer. Her monteres LEDerne på print i iBond strukturen med en reflektor. Modulerne inkluderer en punktluskilde, en flade luskilde og en lineær luskilde. De tre UVC LED moduler er vist i Tabel 5, som viser dimensioner, antal LEDer og elektriske data. De er optimeret mht. strålingsstrøm, køling og effektivitet.



udfra UVC test som vist i Figur 6 til at operere ved en afsat effekt på 3 W pr. LED svarende til en operationsstrøm på hhv. 480 mA og 430 mA.

Tabel 5 Beskrivelse af de tre typer af UVC LED moduler, med dimensioner og elektriske data.

Navn	ACP 100*100mm	ACP 300*300mm	Tracy 300-afst. 20mm
Foto			
Størrelse	100 mm x 100 mm x 6 mm	300 mm x 300 mm x 6mm	105.1mm x 40 mm x 5.9 mm
Antal LEDer	1	9	5
Afstand imellem LEDer	-	100mm x 100mm	20mm
Reflektor	Ø18 mm optimal	Ø18 mm optimal	Ø18 mm optimal
Lysende areal	Ø18mm	218mm x 218mm	98mm x 18mm
Elektrisk forbindelse			
Strøm	350mA - 500mA	1750mA - 2500mA	3150mA - 4500mA
Spænding	≈6.5 V	≈6.5 V	≈6.5 V

LED iBond har produceret UVC LED moduler med hver type af UVC LED, og et udvalg af disse er testet hos DTU Electro. I Tabel 6 er vist en liste over test moduler med deres type af LED og test id.

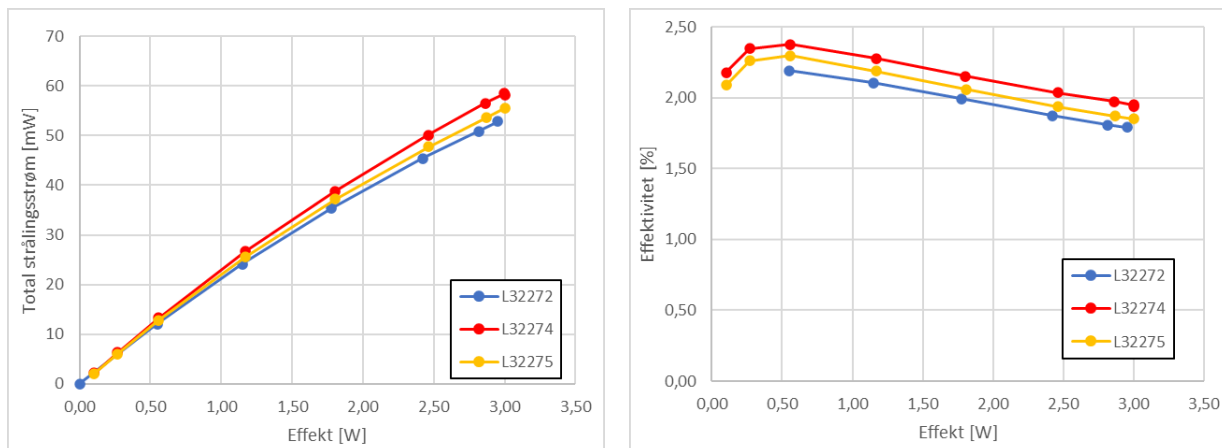
Tabel 6 Liste over test UVC LED moduler med deres type af LED og test id.

	 XST-3535-UV	 XBT-3535-UV
ACP 100*100mm	L32272, L32273 L32274, L32275 L32276	L32277, L32278 L32279, L32280 L32281
ACP 300*300mm	L32269, L32270, L32271	
Tracy 300-afst. 20mm	L32282, L32283 L32284, L32285 L32286	L32287, L32288 L32289, L32290 L32291

Test af modulerne er foretaget for at måle den totale strålingsstrøm, effektivitet og intensitets fordeling for at kunne estimere irradians og dermed dosis foran modulet.

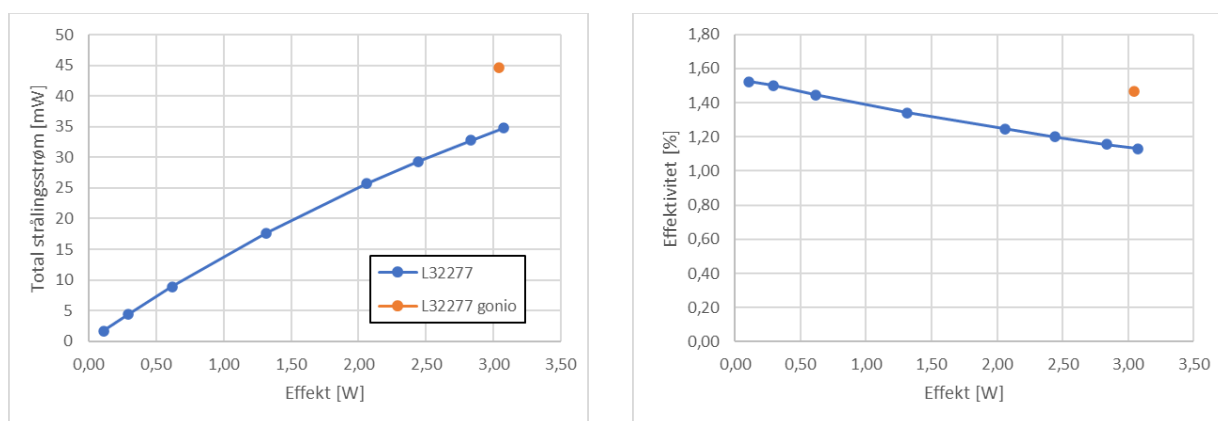
Den totale strålingsstrøm er målt for punktluskilderne i den integrerende kugle som funktion af strømmen igennem LEDerne fra 20 mA og op til den optimerede strøm der svarer til 3 W. For tre af punktkilde modulerne med XST-3535-UV LED monteret er der i Figur 7 vist den målte totale strålingsstrøm og effektivitet som funktion af den aktive effekt. Det ses der er en variation over de tre moduler på ca. 7 %. Den totale strålingsstrøm er ca.

15 % lavere end målt ved den samme strøm for test LEDer vist i Figur 6, hvilket hovedsageligt skyldes højere operationstemperatur. Den målte effektivitet er ligeledes lavere end for test LEDerne og har en variation på 9 % over de tre moduler. Den totale strålingsstrøm er også målt i goniospektrometret ved 3 W og afvigelse er max. 6 % for de tre moduler.



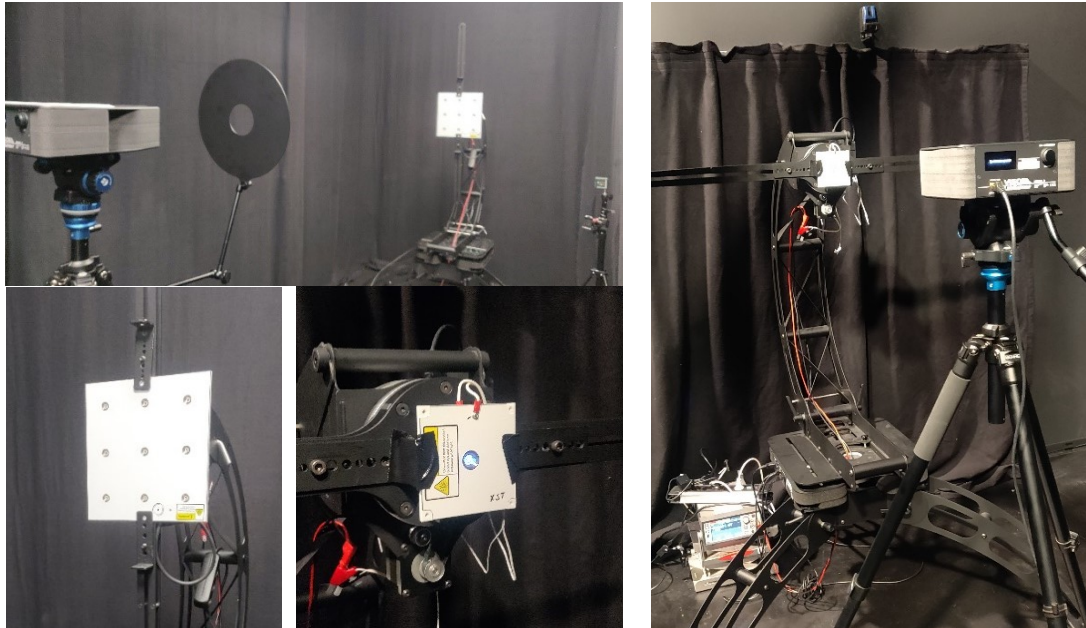
Figur 7 Målt total strålingsstrøm (venstre) og effektivitet (højre) som funktion af den aktive effekt, for tre punktkilde UVC LED moduler med XST-3535-UV LED.

På Figur 8 er resultaterne af den tilsvarende måling for punktkilde modulet med XBT-3535-UV LED monteret. Her er målt en total strålingsstrøm på 35 mW som er 40 % lavere end for test LEDen. Det skyldes øget operationstemperatur som den anden LED. Men her er udstrålings vinkel fra LEDen og reflektoren i modulet så stor at det ikke er muligt at opsamle al stråling i den integrerende kugle. På grafen er også vist den totale strålingsstrøm målt i goniospektrometret og den er på 45 mW ved 3 W. Denne måling giver et bedre estimat af den totale strålingsstrøm og det svarer til en 22% lavere strålingsstrøm end for test LED, ligesom for den anden type LED.



Figur 8 Målt total strålingsstrøm (venstre) og effektivitet (højre) som funktion af den aktive effekt, for en punktkilde UVC LED moduler med XBT-3535-UV LED.

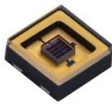
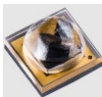

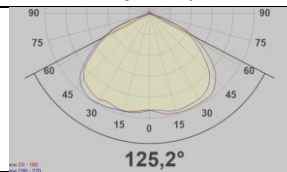
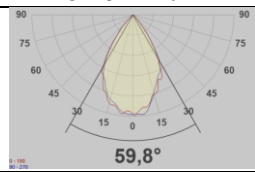
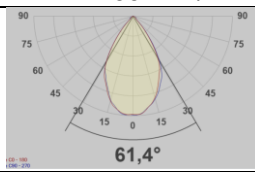
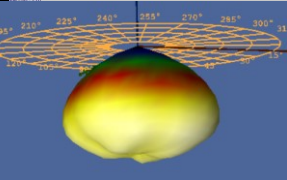
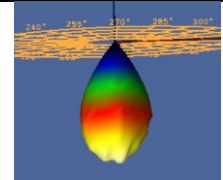
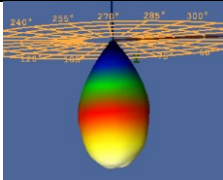
Den integrerende kugle kan derfor kun benyttes til test af UVC LEDerne på test print og for punktkilde modulet med en snæver udstrålingsvinkel. Alle moduler er målt i goniospektrometret ved den optimerede operationsstrøm svarende til at effekten pr. LED er ca. 3 W. Ud fra disse målinger fås estimat for den totale strålingsstrøm, effektivitet og intensitetsfordelingen. På Figur 9 er vist fotos af goniospektrometer målingerne af hhv. punktkilde modul og flade modulet. Afstanden til sensoren skal tilpasses således at den langt nok væk til at være i fjernfeltet af lyskilden og samtidig kunne måle et signal med godt signal støj forhold. Afstanden for punktkilde modulet var 80 cm og 270 cm for flade modulet.



Figur 9 Fotos af opsætning og måling af UVC LED moduler i goniometer.

I Tabel 7 er vist resultaterne af målingerne for tre specifikke test moduler, med angivelse af UVC LED typen, og modulet og test id. Der er vist de målte intensitets fordelinger ved både et 2D og et 3D plot.

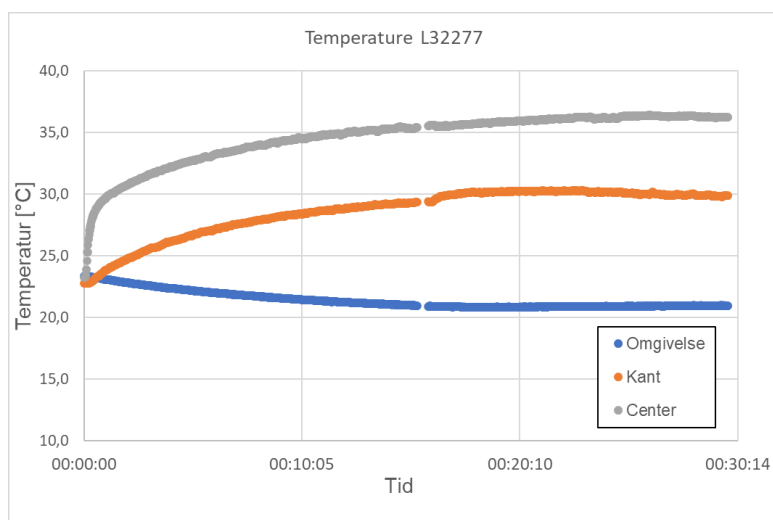
Tabel 7 Resultater af goniometermåling af UVC-LED moduler

LED/modul			
Test id	L32277	L32275	L32270
Effekt	3,04 W	3,01 W	25,84 W
Strålingsstrøm	44.7 mW	55.5 mW	438 mW
Effektivitet	1.47 %	1.8 %	1.7 %
Max. intensitet	14.0 mW/sr	57.5 mW/sr	455 mW/sr
2D intensitet			
3D intensitet			
Antal moduler	5	4	3
Strålingsstrøm	48.3 mW ± 6.9 %	54.8 mW ± 4.4 %	440 mW ± 1.5 %
Effektivitet	(1.60 ± 0.13) %	(1.85 ± 0.08) %	(1.70 ± 0.02) %
Max. intensitet	14.3 mW/sr ± 3.6 %	58.1 mW/ sr ± 2.0 %	459 mW/sr ± 0.8 %

Det ses at modulet med XBT-3535-UV LED har den bredeste udstråling med en halvværdi vinkel på 125 grader, hvorimod den er 60 grader for de to andre moduler med XST-3535-UV LED. Strålingsstrøm, effektivitet og maksimal intensitet er vist for de tre målinger specifikt, og nederst ved middelværdi og standardafvigelse for alle moduler der er målt.

Det ses at afvigelserne på strålingsstrøm for punktkilde modulerne er 4-7 %, lavest for XST LEDerne. For flade modulet med 9 LEDer er afvigelsen på 1,5%, da det er en sum af de 9 LEDers strålingsstrøm. Den målte strålingsstrøm er ca. 8 gange den for punktkilde modul med XST LED og den maksimale intensitet er også ca. 8 gange større. Det burde have været 9 gange, men LEDerne har i flade modulet kørt ved en lidt lavere effekt på 2,87 W. Udstrålingsprofilen ses også at være meget mere pæn og glat for flade modulet end for punktkilde modulet, da det er en sum af 9 LEDer. Effektiviteten er fra 1.5 til 1.9 %, lavest for punktkilde modulerne med XBT LEDerne.

Under goniospektrometri målingerne foretages også temperatur målinger på modulerne. For punktkilde modulerne er der på bagsiden af modulet placeret temperatursensorer i center lige bag LEDen og i kanten af modulet og den sidste temperatur sensor måler omgivelses-temperaturen. Som et eksempel er der i Figur 10 vist temperatur variationen under målingen på L32277. Det ses at alle tre temperaturer starter ved omgivelsestemperaturen på 23.5 °C. Temperaturen i center stiger hurtigt i løbet af 1-2 minutter til 30 °C og efter 30 minutter opnås en stabil temperatur på 36.5 °C. I kanten af modulet sker ændringen langsommere og den stabile temperatur efter 30 minutter er ca. 30 °C. Omgivelses temperaturen falder lidt under målingen.



Figur 10 Målt temperatur som funktion af tid for L32277, på bagsiden af modulet i center lige bag LEDen og i kanten af modulet og den sidste er måling af omgivelsestemperaturen.

4.7 Desinfektions systemer

Der ses i det følgende på to demonstrations desinfektions systemer, der er designet og udviklet på basis af de testede UVC LED moduler.

Purizap

Purizap er et af LED iBonds UVC-desinfektions systemer og er et en batteridrevet overflade desinfektions system som er håndholdt og tiltænkt at kunne anvendes til desinfektion af overflader i fx kontorer. Nedenstående Figur 11 viser foto af systemet i operation.



Figur 11 Foto af LED iBonds batteridrevet og håndholdte overflade desinfektions system, purizap. Kræver beskyttelse af hud/hænder og øjne.

Purizap er baseret på tre lineære moduler, Tracy 300 i Tabel 5, med XBT-3535-UV LEDer som er monteret i forlængelse af hinanden på en køleprofil og der er en blæser der sender luft hen over køleprofilen. Forud for målingerne er batteriet fuld opladet, og målinger har vist at den kan holde konstant output over 80 minutter. Målingerne skal derfor udføres indenfor denne tid. Der er foretaget goniospektrometer måling af total strålingsstrøm og intensitetsfordeling.


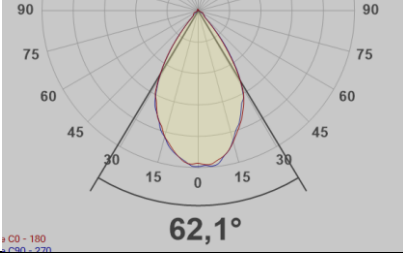
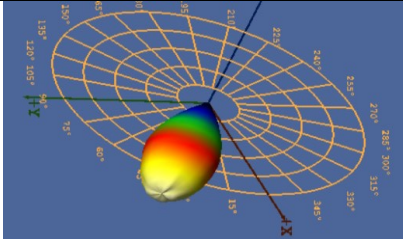


Figur 12 Fotos af måleopstilling for Purizap, monteret på optisk bænk (midt) og integrerende kugle og astandsmåler (venstre) og monteret af Purizap i goniospektrometerradiometer (højre).

I Tabel 8 er vist resultaterne af goniospektrometerradiometer måling af Purizap. Den ses at have en total strålingsstrøm på 762 mW og en maksimal intensitet på 766 mW/sr. Udfra at der er 15 LED estimeres strålingsstrømmen fra hver LED at være 51 mW og er opgivet til en aktiv effekt på 55 W hvilket svarer til en effektivitet på 1.4 %. Det ses at intensitetsfordeling er meget tæt på den der er målt for sammen LEDer i punktkilde og fladekilde modulerne, se Tabel 7. Det er fordi der måles i fjernfeltet og her vil de være ens. Intensitetsfordelingen i fjernfeltet kan i princippet ikke sige noget om fordelingen tæt på kilden.

Ser man på effektiviteten af lavtryks UV rør i et armatur med henblik på at rette strålingen mod en flade på samme måde som med Purizap, er effektiviteten omkring 16 %, hvor effektiviteten af Purizap er 1.4 % altså en faktor 11 gange lavere. Med hensyn til total strålingsstrøm er lavtryks UVC enheden også større med 2500 mW mod 762 mW. Så fordelingen med Purizap ligger i at den kan batteriforsynes, og tænder straks med fuld strålingsstrøm og kan slukkes og tændes igen hurtigt. For at UVC LED systemet kan blive energimæssigt konkurrencedygtigt skal effektiviteten øges 11 gange.

Tabel 8 Resultater af goniospektrometervåkning af Purizap

LED/modul	
Test id	Purizap
Strålingsstrøm	762 mW
Max. intensitet	766 mW/sr
Antal LEDer	15
Strålingsstrøm pr. LED	≈51 mW
Effekt	55 W
Effektivitet	1.4 %
2D intensitet	
3D intensitet	

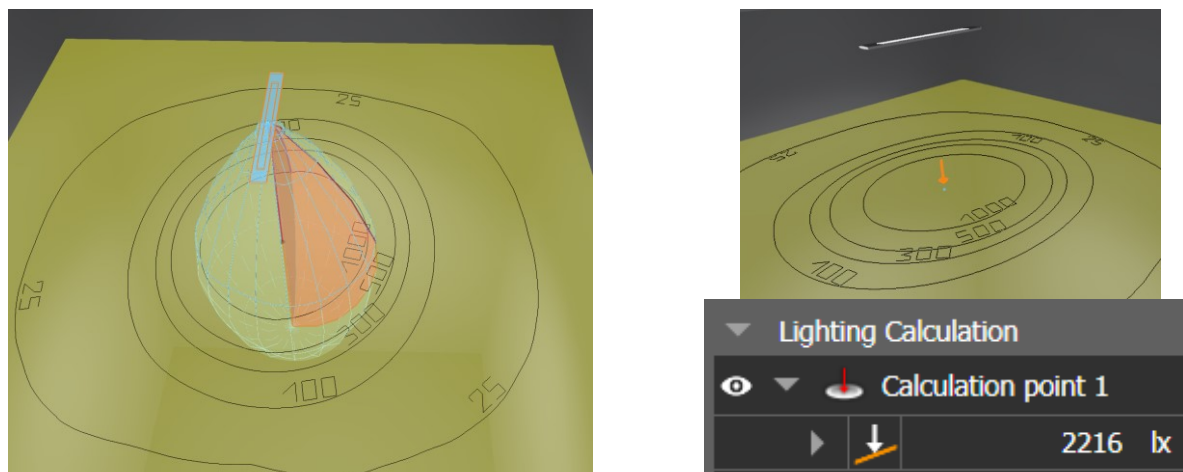
Derudover er der udført en måling af irradians langs centeraksen af Purizap, målingen er udført som funktion af afstanden med den integrerende kugle som irradians detektor, se Figur 12. Resultatet af målingen er vist i Figur 14. Purizap er designet til at bruges meget tæt på en overflade indenfor nogle få cm. Her er irradiansen målt til at være 9.1 mW/cm² med en usikkerhed på ±9 % (k=2) svarende til et konfidensniveau på 95%. Målingen her benyttes som derfor som et tænkt eksempel på en kilde der kunne bruges i længere afstande og målingen sammenlignes med simuleringer.

Simulering

Ud fra goniospektrometervåkningerne kan der eksporteres intensitets fordelings filer i .ies og/eller .ldt fotometriske fil formater. Disse formater kan læses af simuleringssystemer som DiaLux og Relux. De er begge frit tilgængelige simuleringssystemer som benyttes i belysningsbranchen og er et godt alternativ til mere avancerede simuleringssystemer som Zemax.

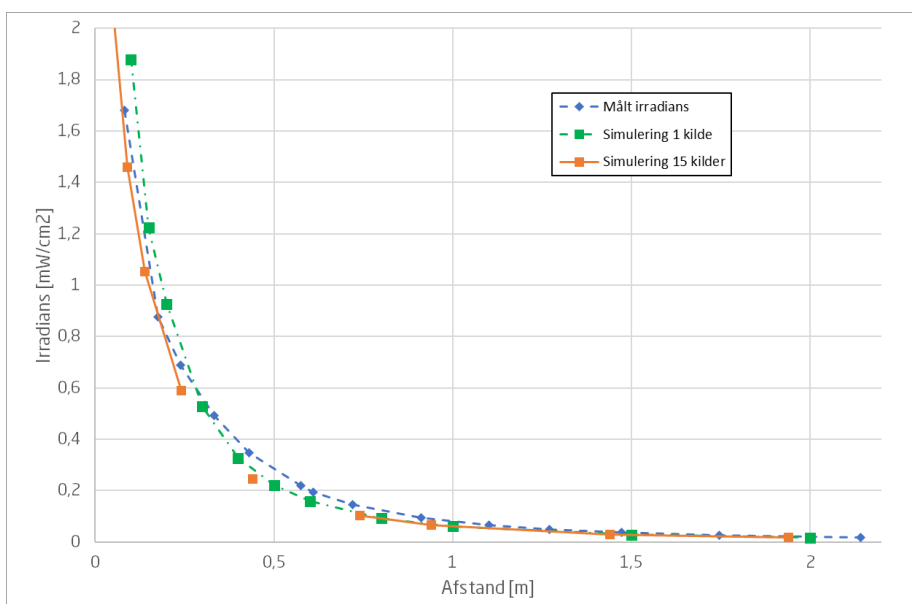
Det lysende areal af lyskilden skal defineres i måle programmet, og indgår ved eksport af intensitets data i .ies og/eller .ldt fil format. Det lysende areal for Purizap estimeres til at være 18mm x 315 mm, svarende til reflektorernes diameter og den lineære udstrækning af de 15 LED med reflektor. I de fotometriske filer indgår normalt den totale lysstrøm som måles i lumen. Ved simulering af UV stråling benyttes den totale strålingsstrøm i stedet for og den angives i mW. Beregninger i de to simuleringssystemer som normalt er Illuminans eller belysningsstyrke i lx = lm/m² svarer nu til irradians i mW/m² = 10⁻⁴ mW/cm².

Med ldt filen genereret udfra målingen på Purizap, er der i DiaLux udført simuleringer af irradiansen som funktion af afstand og langs den mekaniske/optiske akse af Purizap. Et eksempel er vist i Figur 13 hvor irradiansen i et plan vinkelret på den optiske akse er angivet med iso-irradians kurver. En værdi på 1000 "lux" svarer til 0.1 mW/cm², og irradiansen lige under Purizap på den optiske akse er beregnet til at være 2216 "lux" svarende til 0.2216 mW/cm².



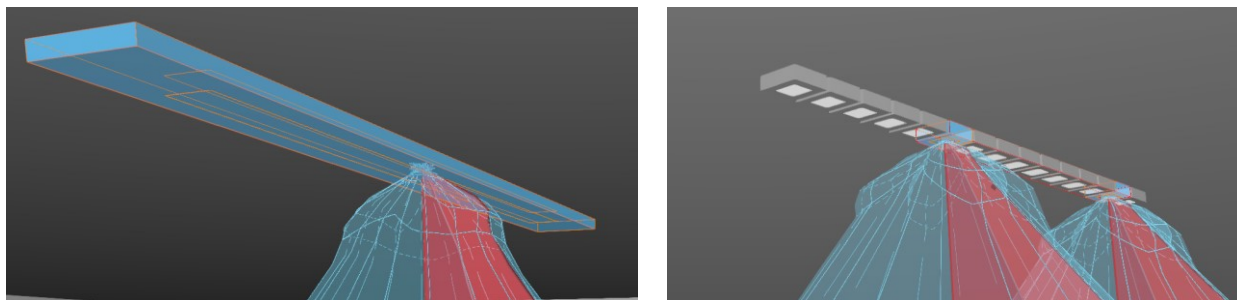
Figur 13 Simulering af strålingen fra Purizap i Dialux hvor irradians isolinier er angivet på detektor fladen. Beregning er for punktet indikeret med pil lige under lyskilden.

Simuleringen er udført for varierende afstande til detektorplanet og i Figur 14 er de simulerede værdier for vist sammen med de målte værdier af irradiansen målt på den optiske bænk. Det ses at simuleringen overvurderer irradiansen for korte afstande mindre end 0.3 m og undervurderer fra 0.3 m og nærmer sig måleværdierne for afstande større end 1 m svarende til at man er i fjernfeltet fra lyskilden.



Figur 14 Sammenligning af målt og simuleret irradians langs den mekaniske/optiske akse af Purizap

Beregningen er gentaget hvor de enkelte LEDer i Purizap er simuleret med hver sin .ldt intensitetsfordelings fil, se Figur 15. Det giver en lidt bedre simulering tæt på lyskilden og det samme i fjernfeltet, simulering 15 kilder i Figur 14. Man skal derfor vælge modellen udfra i hvilket område man ønsker en simulering af.

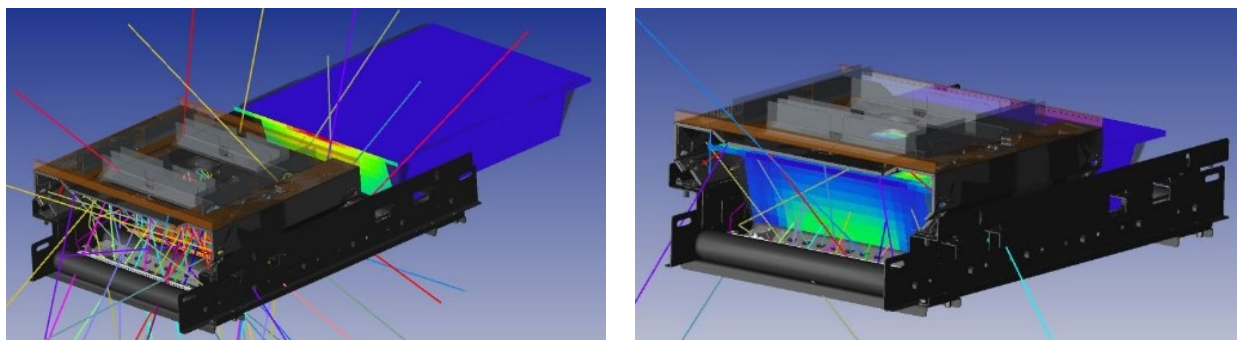


Figur 15 Model af Purizap lyskilde i simulering, med en enkelt ldt-fil (venstre) og enkelte ldt-filer for hver af de 15 LEDer (højre).

Desinfektion system til bakker

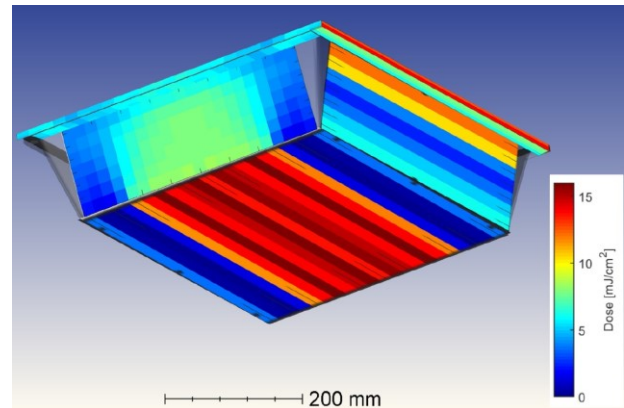
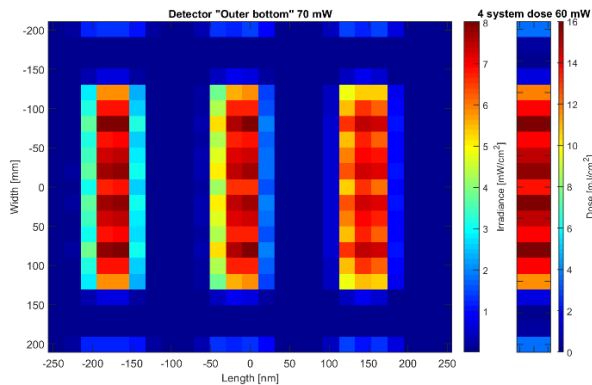
Det andet UVC LED desinfektions system baseret på UVC LED moduler er et bakke desinfektions system til sikkerhedskontrol systemer i lufthavne. Ideen er at bakkerne som passager lægger deres ejendele i desinficeres før de benyttes igen. Der er designet et system med UVC LED moduler placeret over, under og på siderne som vist på Figur 16. Det der vises er systemet udefra og man kan se simuleringens stråler fra de indbyggede UVC LEDer, og bakken ses på billedet til venstre at være på vej ind i systemet og på billedet til højre er den inde i systemet. De mange UVC LEDer, > 100, sidder her meget tæt på bakken som de skal belyse, og en måling af intensitets fordelingen i fjern feltet vil ikke kunne benyttes i en simulering af dette system. Så er en optisk model af systemet en god løsning

Derfor er der opbygget en Zemax raytrace model, som så at sige følger en masse simuleringens stråler fra hver enkelt UVC LED og rundt i systemet hvor de reflekteres og absorberes. Der kan benyttes stråledata, eller en model af udstrålingsprofilen fra de enkelte UVC LEDer. I Zemax er der importeret en 3D CAD model af systemet og indsat modeller af de enkelte UVC LEDer og estimeret en strålings strøm på 60 mW ud fra modul målingerne. Reflektans egenskaber af overflader er indført målt for UVC bølgelængde området.



Figur 16 Illustration af Zemax 3D simulering af desinfektions system til bakker, til venstre ses bakken i to forskellige positioner i UVC systemet.

Der er udført beregninger for bakken i en række forskellige positioner svarende til at den bevæger sig igennem systemet. Alle bakkens sider er defineret som detektorer og for hver position fås en simuleret irradians fordeling som vist på Figur 17 til venstre for bakkens underside. Med viden om bakkens hastighed og antal gennemløb beregnes den afsatte dosis som vist på den anden skala på figuren. Denne og beregnet dosis for alle andre overflader af bakken er vist på billedet til højre, hvor bakken ses nedefra. Det ses at dosis ligger over 5 mJ/cm² for de vigtige flader. Midten af undersiden ses at få en høj dosis på op til 16 mJ/cm².

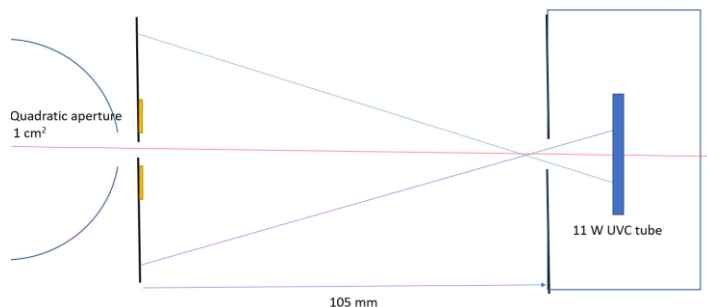


Figur 17 Resultater af Zemax simulering af irradians og dosis på bakken. Til højre ses bakkens underside belyst i en enkelt position hvilket giver irradians fordelingen og tilsvarende dosis for 4 gennemløb. Til højre ses simuleret dosis for overfladerne af bakken set nedfra.

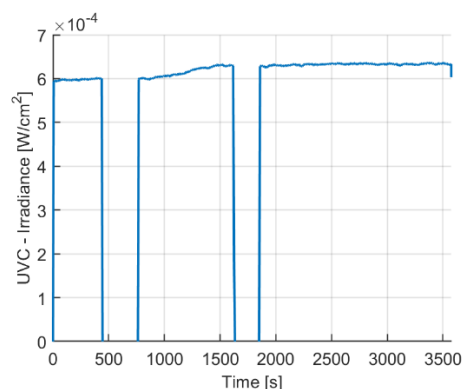
Da det ikke er muligt at måle irradiansen direkte i system på grund af pladsproblemer, har LED iBond for at estimere dosis i det fremstillede testsystem gennemført målinger med dosimeter pads. Dosimeter til UVC LED stråling, er monteret de vigtige steder på en bakke og gennemkørt den 4 gange i et testsystem. Det viste en god overensstemmelse med simuleringens resultaterne. Det er svært at aflæse farveændringen af dosimeter pads og dermed estimere dosis, og derfor har DTU Electro gennemført farvemålinger af dosimeter belyst med UVC rør for at undersøge om en automatisk kameraaflæsning er mulig, som også vil kunne overføres til UVC LED måling.

4.8 Test af dosimetre

I projektet blev der lavet test på dosimetre med hensyn til kameraaflæsning. Der blev testet på et dosimeter produkt der bruges i industrien. Dosimetermaterialet blev opdelt i 8 samples og de 6 blev bestrålet med varierende dosis af 253.7 nm stråling fra lavtryks UVC røret, se Tabel 3. Irradiansen imellem to dosimeter samples (cross, dot) blev monitoreret ved brug af det integrerende kugle spektrometer, se Figur 18. Målingen af irradians er vist på Figur 19 som funktion af tid. De tre strålings intervaller giver en dosis på omkring 250, 500 og 1000 mJ/cm², hhv. for sample S2, S3 og S4. S1 blev ikke bestrålet, altså 0 mJ/cm².

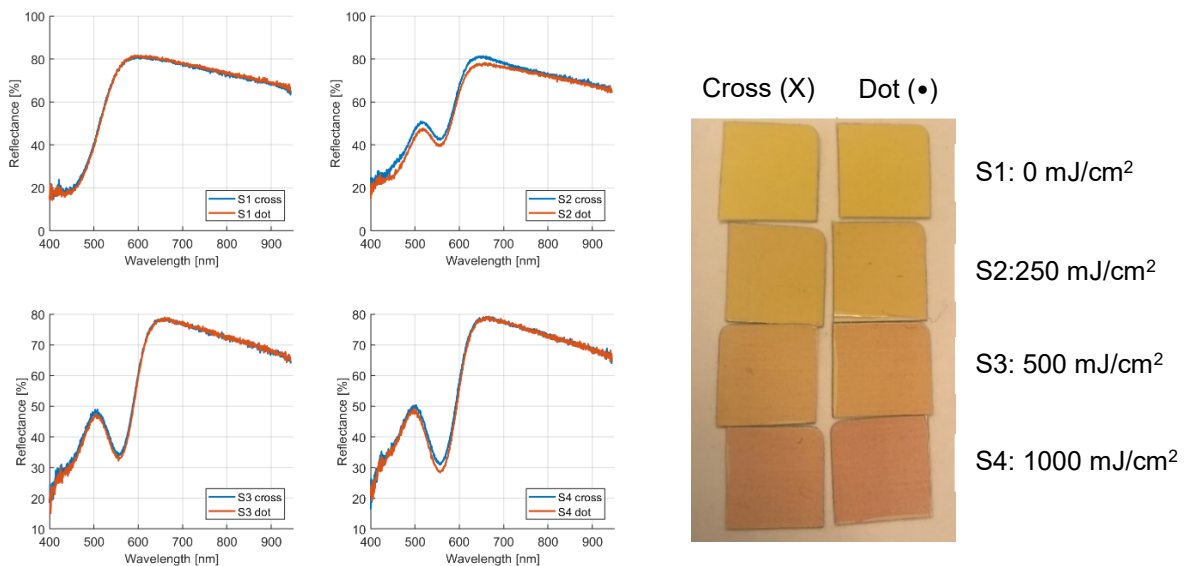


Figur 18 Måleopstilling til måling af dosis fra et 11 W UVC-rør,



Figur 19 Bestråling med UVC af dosimetre over tid.

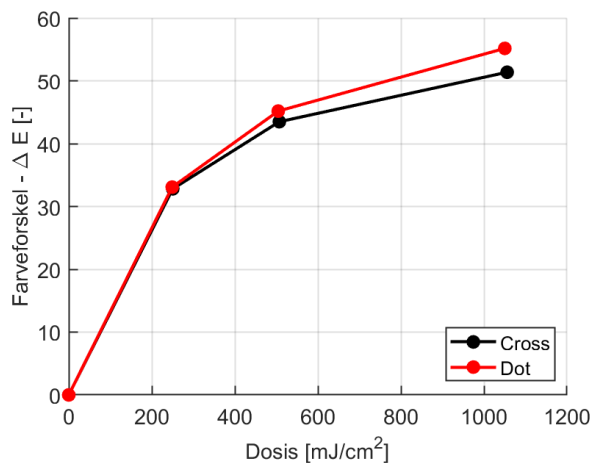
Efterfølgende blev den spektrale reflektans målt, se Figur 20, og der blev taget billeder med digital kamera, se Figur 21. Vi bemærkede en klar nedbrydning af dosimetrene, når vi målte deres spektrale reflektans igen efter 4 dage, hvor de havde været opbevaret i mørke omgivelser og indkapslet i lystæt indpakning.



Figur 20 Målt spektral reflektans af de bestrålede dosimeter samples. Figur 21 Foto af eksponerede dosimetre taget med et kamera under blandet belysning.

Ændringerne i farven ses som en tydelig forskel i værdierne omkring 500 nm, og det er signifikant fordi mange LED produkter har et såkaldt "cyan-dyk" lige omkring 500 nm mellem den blå LED og den gul/grønne phosphor. Denne forskel er ikke så signifikant til stede i dagslys eller lysstofrørslys. Det er derfor vigtigt at man tager lyskilden i betragtning både ved visuel aflæsning og maskintest.

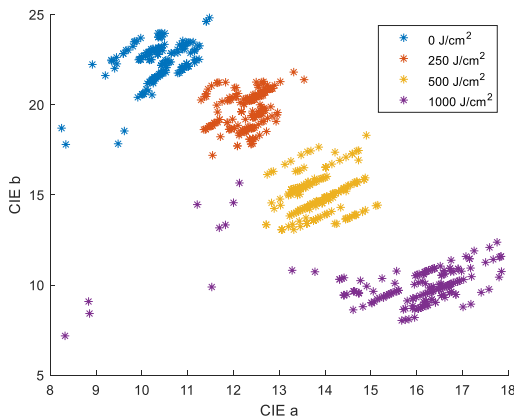
Ud fra de målte spektrale reflektans kurver kan CIE $L^*a^*b^*$ koordinater beregnes for illuminant D65, og farveforskelle imellem de bestrålede samples og S1 kan beregnes. Disse værdier er vist i Figur 22, og der ses at være størst ændring indenfor 0-250 mJ/cm^2 .



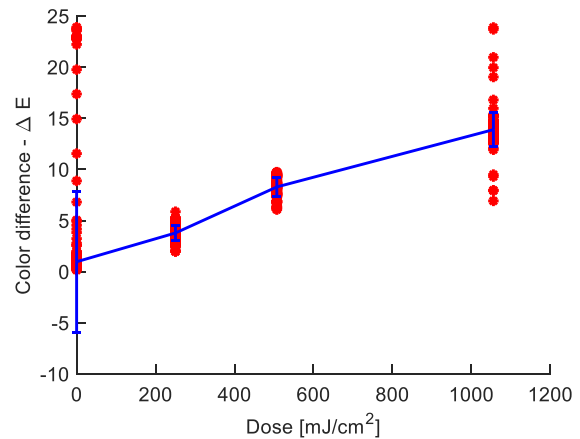
Figur 22 Farveforskel beregnet ud fra målt spektral reflektans af dosimeter samples i forhold til S1 som funktion af den målte dosis.

Ud fra kamerabilleder som det vist på Figur 21 kan man udtrække RGB (rød grøn, blå) pixel værdier og ved antagelse af en konverteringsmatrice fra RGB til tristimulus værdier XYZ, kan man udregne CIE $L^*a^*b^*$ koordinater svarende til beregningen ud fra de spektrale reflektans kurver.

På Figur 23 er vist a,b koordinaterne for de 4 dosimeter samples og det ses tydeligt at farvetonen (hue angle) ændre sig for de forskellige eksponeringer, og at forskellen er tydelig nok til at skelne grupper af pixels i kame-rabilledet.



Figur 23 a, b koordinater fra CIE L*a*b* der viser farve-forskellen mellem de forskellige dosimetre vist på Figur 21.



Figur 24 farverforskel som funktion af dosis, målt med ka-mera under ukendt belysning. Den blå kurve viser medi-anværdien og standardafvigelsen, for hver gruppe af målte værdier.

Fra L*a*b* farvekoordinaterne kan vi udregne farveforskelle på pixels, disse er vist i Figur 24. Her er det tydeligt at farverne ligger i klart distinkte områder, på den anden side er spredningen af punkter stor. Sammenligner man farveforskellene vist i Figur 22 og Figur 24 er det tydeligt at der ikke er overensstemmelse i værdierne opnået fra målt spektral reflektans og kamera billedet, men der ses en korrelation i beregningerne ud fra ka-merabilledet som vil kunne benyttes til aflæsning af dosimetres exponering, men det kræver at man optimerer på forskellige aspekter, som spektralfordelingen af det lys der benyttes under kameraoptagelseerne, hvidba-lancen af billederne og konverteringsmatricen der konverterer pixelværdier til CIE L*a*b* farvekoordinater.

4.9 Målgruppe og formidling af resultater

Målgruppen for projektets resultater er industrien der arbejder med UVC desinfektions systemer, belysnings-industrien generelt og bachelor og master studerende ved tekniske universiteter som DTU og AAU. Der er igennem to arrangementer skabt grobund for at større samarbejde med danske og svenske virksomheder der arbejder med UVC LED teknologi, der specielt viser interesse for mulighederne for at få testet og karakteriseret såvel UVC LEDer som UVC systemer.

Formidling af projektet baggrund, formål og resultater er blevet gjort igennem foredrag, artikler og websites hvor information og publiceret materiale er offentligt tilgængeligt. På DTU orbit er der oprettet en projektside, <https://orbit.dtu.dk/en/projects/elforsk-project-353-015-effective-uv-disinfection>, med beskrivelse af projektet, dets aktiviteter og publikationer. På Elforsk hjemmeside er der ligeledes oprettet en projektside, <https://elforsk.dk/projektdatabase/effektiv-uv-disinfection>, med beskrivelse af projektet, det finansiering og partnere, og med link til nyheder og artikler.

I starten af projektet blev der afholdt et seminar med titlen "UV-light sources for medical, industrial, and COVID-19 applications", <https://orbit.dtu.dk/en/activities/uv-light-sources-for-medical-industrial-and-covid-19-applications>, hvor desinfektion med ultraviolet lys UV-C lyskilder var et af hovedemnerne. Seminaret samlede 85 deltagere og blev afholdt den 24-11-2021 på i Niels Bohr auditoriet på DTU Risø.

Her blev en række foredrag holdt relateret til brugen af UV og specielt UV-C stråling til desinfektion. Foredragsholdere omfattede danske og internationale forskere og industri. Fra projektet blev der holdt to foredrag: Anders Thorseth et indlæg omkring den internationale belysningskommission (CIE) holdningserklæring omkring UV-stråling og COVID-19, og Carsten Dam-Hansen holdt indlæg om UV-C måling og instrumenter og viste resultater af målinger på UV-C LED's og traditionelle UV-C lyskilder. Seminaret blev efterfølgende beskrevet i en nyhedsartikel på Elforsk hjemmeside: "Industrien viser stor interesse for ultraviolet lys", <https://elforsk.dk/nyheder/projektresultat/industrien-viser-stor-interesse-ultraviolet-lys>

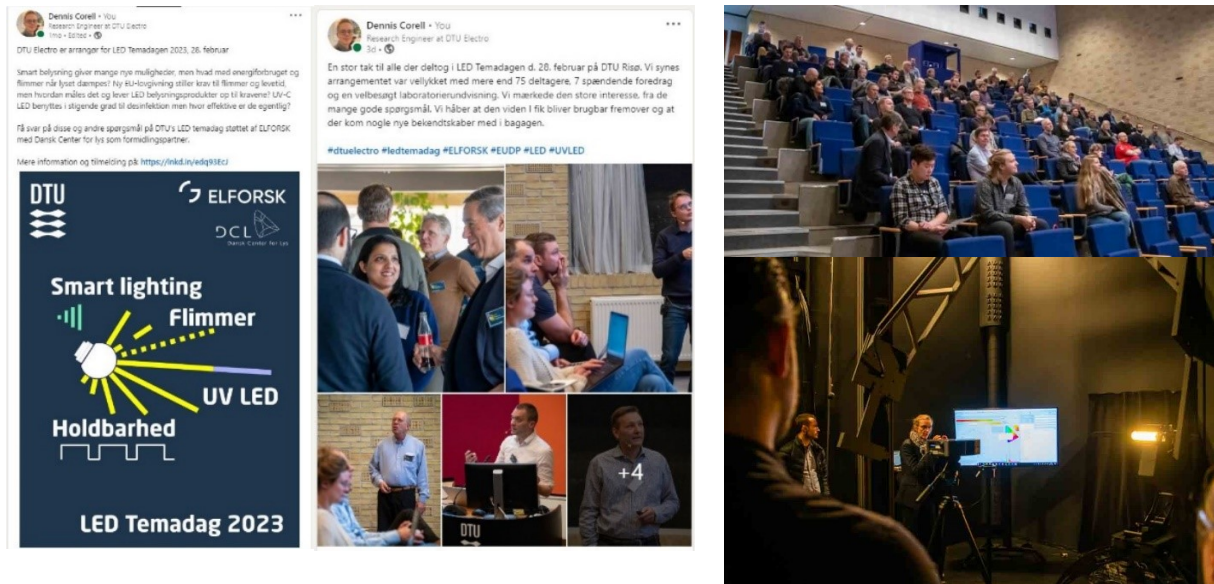


Figur 25 Professor Jens Lundgren fra Københavns Universitet/Rigshospitalet holdt et inviteret foredrag ved seminaret "UV-light sources for medical, industrial, and COVID-19 applications" den 24-11-2021, Foto: Carsten Dam-Hansen.

For at beskrive projektet for branchen/offentligheden blev der i branchebladet LYS, udgivet af Dansk Center for Lys, publiceret en artikel: "Energieffektiv UV-desinfektion", LYS, vol. 4, p. 29 (2021), <https://orbit.dtu.dk/en/publications/energieffektiv-uv-desinfektion>, og direkte link: https://elforsk.dk/files/media/document/353-015_Artikelt_LYS_04_2021_side_29.pdf [11]

Der er udformet undervisningsmateriale i form af præsentationer til brug i undervisningen af bachelor og master studerende på DTU og hovedresultater i denne rapport sammensættes til en hvidbog om UVC måling.

Projektet blev afsluttet med en temadag omkring LED, som blev afholdt den 28-2-2023 i Niels Bohr Auditoriet på DTU Risø campus. Temadagen blev annonceret ved opslag på LinkedIn, Dansk Center for Lys nyhedsbrev, Elforsk hjemmeside <https://elforsk.dk/arrangement/led-temadag-2023>, og direkte mails til projekt interessenter. Hjemmeside med information og temadagens program kan ses på <https://dtu.events/ledtemadag2023/program> hvor links er til alle foredrag er tilgængelige. LED temadagen samlede omkring 80 deltagere.



Figur 26 kopi af linkedIn opslag omkring og fotos fra Niels Bohr auditoriet og DTU Electro lystekniske laboratorium på LED temadag 2023, fotos: Carsten Dam-Hansen.

UV-C LED, måling af UV stråling og desinfektion var hovedemnet for den sidste del af temadagen. Der blev holdt et inviteret foredrag omkring UV-måling og simulering og fra projektet blev der holdt tre foredrag omkring projektets resultater.

5. Anvendelse af projektresultater

Projektresultaterne i de anvendte målemetoder og simuleringmodeller giver et solidt udgangspunkt for LED iBond som de vil benytte i deres arbejde med design og udvikling af deres nuværende og nye UVC-LED baserede moduler og desinfektions systemer, hvor moduler vil have deres største fokus. Resultaterne er i høj grad af generel karakter og vil kunne benyttes bredt af industrien.

DTU Electro har opnået ny viden om UVC LED teknologi og nye kompetencer og faciliteter til måling og simulering af UVC-stråling. Disse bliver anvendt i undervisningen af bachelor og master studerende på DTU og vil tilbydes andre interesserede institutioner. DTU har og vil øge deres tredje parts uvildig test af UVC-LED og UVC-baserede armaturer/systemer og rådgivning indenfor disse områder.

Resultaterne viser at UVC-LED teknologi er en lovende erstatning for lavtryks UVC rør selvom de for nuværende set på kildeplan har en meget lavere energieffektivitet. Det understøttes af en række fordele ved UVC LED teknologi der gør dem bedre i specifikke systemer, hvor bl.a. deres lille formfaktor og retningsbestemthed er vigtige. Med den forventede udvikling indenfor UVC-LED teknologi, vil deres effektivitet blive højere end for lavtryks UVC-teknologi indenfor 5 år og muligvis op til 50 % i 2030. Det er således nogle år til at man kan opnå direkte energibesparelser ved brug af UVC LED teknologi, men lige så vigtigt er det at kunne undgå brugen af miljøfarlige stoffer som kviksølv der benyttes i lavtryks UV rør. Udfasningen af kviksølvholdige lyskilder er allerede i gang med EU's udfasning af lysstofrør fra august 2023 og rør der hovedsageligt udsender UV stråling, som lavtryks UVC rør i 2027. Projektet viser at UVC-LED teknologien vil kunne opnå energieffektiviteter der gør den til en lovende erstatning for lavtryks UVC rør inden da.

6. Konklusion og perspektivering

Projektet har sat fokus på ny UVC LED teknologi, som er på vej og som kan blive en energieffektiv erstatning for lavtryks kviksølvholdige UVC lamper. UV-C LEDer er fortsat ikke så energi-effektive som traditionelle UV-C rør. På trods af dette, så vil der i visse desinfektionssystemer, hvor pladsmæssige forhold er en udfordring eller hvor retningsbestemt stråling er påkrævet, være muligt at gøre brug af UV-C LED'ere da det optisk tab til omgivelser kan reduceres væsentligt. Sagt anderledes, så kan lyset fra LED'ere i visse sammenhæng bedre udnyttes mere effektivt til selve desinfektionen af fx en overflade. I tilfælde hvor rundstrålet UV-C belysning er at foretrække, er traditionelle UV-C rør dog fortsat væsentligt mere energi-effektive i forhold til kommercielle UV-C LED'ere.

For at kunne teste og karakterisere UVC lyskilder, moduler og armaturer/systemer er der opbygget nye test faciliteter til spektroradiometrisk måling af UVC stråling. Dette er nødvendigt for UVC LED da man ikke kender spektralfordelingen på forhånd som for lavtryks UVC rør. Faciliteterne er baseret på stray light korrigerede array spektroradiometre, og muliggør hurtig måling ned til 200 nm med lav måleusikkerhed. Der er opbygget et UV stabilt (PTFE) integrerende kugle spektroradiometer og et goniospektroradiometer som gør det muligt at

- måle total spektral strålingsstrøm [W/nm] fra og effektivitet som funktion af operations strøm og temperatur af UVC LEDer og moduler
- måle spektral irradians [W/m² nm] i et givet plan og afstand fra en UV lyskilde
- måle total spektral strålingsstrøm [W/nm] fra og effektivitet af UV lyskilder med dimensioner op til 1500 mm
- måle 3D intensitetsfordeling [W/sr] fra lyskilder med dimensioner op til 1500 mm

sidsnævnte gør det muligt at generere lysintensitets fordelings filer i ies. og/eller ldt. -filformat til brug for simulering af udstråling fra UVC lyskilder og moduler. Der er vist god overensstemmelse med maksimalt 6% afvigelse imellem de to forskellige målemetoder for UVC LEDer og punktkilde UVC LED moduler, hvilket er afgørende for sådanne målinger.

Test og karakterisering af lavtryks UV rør og høj effekts UVC LEDer viser at lavtryks UVC rør har en effektivitet på omkring 25 %, hvor UVC LEDernes effektivitet ligger i området 1.4 % - 2.5 % afhængig af operationsstrøm, hvor højeste effektivitet opnås ved lave strømme omkring 50 mA, men også lav strålingsstrøm. For de testede høj effekts UVC LED er effektiviteten således stadig en faktor 18 gange lavere end for lavtryks UVC rør, når man ønsker en høj strålingsstrøm i et system.

Ud fra testresultaterne har LED iBond designet og udviklet tre forskellige UVC LED moduler, som inkluderer en punktførmigt kilde, lineært array og en flade-orienteret kilde. Alle tre moduler kan forsynes med de to forskellige typer af UVC LEDer der er testet i projektet. Det er XST med snæver udstrålingsvinkel på 60° og XBT med bred udstrålingsvinkel på 130°. Der er testet 3-5 stk. af hver LED modul med XST og XBT UVC LED. Resultaterne viser en total strålingsstrøm for punktkilde modul på 48 mW ± 7 % og 55mW ± 4 %, for hhv. XBT og XST og de tilsvarende effektiviteter for et effektforbrug på 3 W er bestemt til hhv. 1.6 % og 1.85 %. For flade modulet med 9 UVC XST LEDer er den totale strålingsstrøm 440 mW med en lavere variation på 1,5%, da det er en sum af de 9 LEDers strålingsstrøm, hvor UVC LEDernes strøm dog har været lidt lavere.

Ud fra goniospektroradiometer målingerne er genereret intensitetsfordelings datafiler i hhv. ies og .ldt format som kan benyttes til simulering af udstrålingen. Proceduren for UVC simuleringer i DiaLux/Relux baseret på de genererede intensitets fordelings filer er beskrevet til brug for videre arbejde med simulering og dokumentation af modulernes egenskaber. Dette er som eksempel undersøgt for demonstrations UVC desinfektions systemet Purizap, som består af tre lineære/array moduler med XST UVC LEDer monteret. Der er udført en

sammenligning af målt og simuleret irradians som funktion af afstand langs den optiske akse af Purizap. Simuleringen er i princippet bedst i fjernfeltet som er fra ca. 1m og der ses overestimering af irradiansen ved korte afstande. Simulering med 15 intensitetsfordelings filer for hver enkelt UVC LED i Purizap giver et lidt bedre estimat for korte afstande, og det samme i fjernfeltet.

Ser man på effektiviteten af lavtryks UV rør i et armatur med henblik på at rette strålingen mod en flade falder effektiviteten til omkring 16 %, hvor effektiviteten af Purizap er 1.4 % altså en faktor 11 gange lavere. Med hensyn til total strålingsstrøm er lavtryks UVC enheden også større med 2500 mW mod 762 mW. Så fordelingen med Purizap ligger i at den kan batteriforsynes, og tænder straks med fuld strålingsstrøm og kan slukkes og tændes igen hurtigt.

I UVC-desinfektions systemer er objektet ofte meget tæt på kilden og ofte er det ikke muligt at komme til at måle p.gr.a. pladsforholdene. Her kommer simulering i simulering software som Dialux til kort, og en mere detaljeret simulerings model, hvor det umiddelbare nærfelt omkring de enkelte UVC LED kan simuleres. Det kan man på baggrund af stråledata for LEDerne i simuleringsværktøjet Zemax. I projektet er Zemax benyttet til simulering og optimering af et UVC-desinfektions system til bakker i sikkerhedskontrol i lufthavne. I sådanne 3D modeller kan komplicerede strukturer som bakken være detektor. I dette system var kun målinger med dosimetre mulige.

Test af dosimetre viser at disse kan bruges som indikatorer under bestemte forudsætninger. I det undersøgte eksempel med 253,7 nm bestråling er der en tydelig relation mellem dosis og farveforskell fra 0 mJ/cm² til omkring 400 mJ/cm². Mens der fra 400 til 1000 mJ/cm² er en forskel i de aflæste dosisværdier på omkring 50% af den målte værdi. Det anbefales at dosimetre derfor bruges til f.eks. at tjekke om grænseværdier er overskredet. Undersøgelse af automatisk aflæsning med kamera viser lovende resultater men kræver optimering af belysning under kameraoptagelse, hvidbalancen af billederne og konverteringsmatricen til farveforskelsberegning.

Overordnet set, kan det konkluderes at de anvendte målemetoder og simuleringsmodeller giver et solidt udgangspunkt for anvendelse i forbindelse med design og karakterisering af UV-C bestråling fra LED'ere og vil blive benyttet af LED iBond i det videre udviklingsarbejde. Der har været god interesse fra industrien for de to arrangementer hvor projektets ideer og resultater er præsenteret igennem foredrag og laboratorie rundvisninger.

6.1 Perspektivering

At finde alternativer til lavtryks UVC rør er under projektperioden blevet endnu mere aktuell, med EU's udfasning af kviksløvholdige lyskilder der hovedsageligt udsender UV lys der blev annonceret i december 2021 [5] og træder i kraft fra 24. februar 2027.

Det forventes at UVC LED teknologi et godt alternativ, der forventes at øge sin effektivitet og total strålingsstrøm i de kommende årrække. Dette gør sig specielt gældende for UV-C omkring 270-280 nm hvor LED'ere er tilgængelige. Dette vil med stor sandsynlighed erstatte UV-rør med en bølgelængde på 254 nm som er blevet undersøgt i dette projekt, da forskning[12] viser at viradræbende effekt af 254 nm og 275 nm er tilsvarende høj og derfor umiddelbare substitutter. Der findes UVC LEDer med effektiviteter på omkring 4 % - 6 % som altså er dobbelt så høje som de effektiviteter der er målt i projektet på 1.5 % – 2.5 %. Hvis UVC LEDer følger nær den samme udvikling som blå LEDer har gjort frem til i dag, vil man i 2030 kunne ramme 50 % og en langt lavere pris [1]. Så vil UVC LED teknologi også være effektivitets mæssigt være bedre end lavtryk UVC teknologi, og ifølge Purizap eksemplet nås en ligelig effektivitet allerede hvis UVC LEDer opnår en effektivitet på 16 %.

De opbyggede kompetencer og testfaciliteter til UV og specielt UVC stråling, indgår allerede i undervisningen af bachelor og masterstuderende på DTU, og udbydes til industrien igennem uvildig test og rådgivning.

Specielt Covid-19 har sat fokus på verdenssamfundets udfordringer med luftbåren smitte, som ønskes bekæmpet med UV som alternativ eller supplement til andre bekæmpelsesmuligheder såsom vaccinerer, mundbind og isolation mv. Derfor forventes UV-behandling af luft og overflader de kommende år at opleve en eksplosiv vækst.

P.gr.a. et ønsket brug af UV-behandling til sygdomsbekæmpelse i det offentlige rum, er man imidlertid blevet mere opmærksom på de sundmæssige aspekter af farlig UV-bestråling af huden hos mennesker, hvilket kan lede til bla. kræftsygdomme, og derfor undersøger videnskaben i dag øget udstrækning også virkninger af forskellige UV bølgelængder i hele spektret fra 200-280nm.

Forskning[13] har vist at såkaldt far UV (fx 222 nm) sandsynligvis har mindre sundhedsmæssige konsekvenser end fx 270-280 nm, hvilket betyder at anvendelse af UV-C LED'ere i visse sammenhænge kræver et design med afskærmning, således at mennesker ikke kan blive bestrålet når de er i nærheden af et UV-apparat. I den sammenhæng er det afgørende vigtigt for LED iBond og andre, at der findes anvendelige og præcise simuleringsværktøjer, modeller af UV LED'ere og målemetoder der kan anvendes til at produktudvikling af effektive UV-C apparater som ikke giver utilsigtet helbredsmæssige bivirkninger i forbindelse med bekæmpelse af bakterier og vira.

Globalt set, er udviklingen af UV-apparater på nuværende tidspunkt forsat umoden og præget af manglende viden og praktisk erfaring med UV, men markedet vil med sikkerhed være voksende og en række toneangivende danske forskere og myndighedspersoners påpeger behov for øget fokus på området og at kunne bekæmpe fremtidige pandemier [14].

7. Referencer

- [1] M. Krames, "The rise of UV-C LEDs ," *LEDs Magazine*, 2020. <https://www.ledsmagazine.com/leds-ssl-design/article/14178371/technology-roadmap-shows-uv-c-leds-are-on-the-rise> (accessed Apr. 25, 2023).
- [2] K. Lewotsky, "Has germicidal UV-C LED technology hit an impasse? Experts says no," *LEDs Magazine*, pp. 14–16, Mar. 2023. Accessed: Apr. 25, 2023. [Online]. Available: https://digital.ledsmagazine.com/ledsmagazine/202303/MobilePagedReplica.action?u1=DA0323&utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=TXLEDS230310002A&utm_content=gtxcel&pm=2&folio=14#pg16
- [3] A. Ashok and I. Khedikar, "Overview of Water Disinfection by UV Technology -A Review," *IJSTE - International Journal of Science Technology & Engineering*], vol. 2, no. 9, pp. 213–219, Mar. 2016.
- [4] EU, "Commission Delegated Directive (EU) 2022/284 of 16 December 2021," Dec. 16, 2021. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir_del/2022/284/oj (accessed Apr. 25, 2023).
- [5] EU, "Commission Delegated Directive (EU) 2022/287 of 13 December 2021 ," Dec. 13, 2021. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir_del/2022/287/oj (accessed Apr. 25, 2023).
- [6] CIE, "CIE 233:2019 Calibration, Characterization and Use of Array Spectroradiometers," Vienna, Jun. 2019. doi: 10.25039/TR.233.2019.

- [7] CIE, *CIE S 025/E:2015: Test Method for LED Lamps, LED Luminaires and LED Modules*. CIE - International Commission on Illumination, 2015. Accessed: May 12, 2015. [Online]. Available: http://div2.cie.co.at/?i_ca_id=563&pubid=491
- [8] CEN, "EN 13032-4 Light and lighting - Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires - Part 4: LED lamps, modules and luminaires," Sep. 2015. Accessed: Apr. 26, 2023. [Online]. Available: https://www.techstreet.com/cie/standards/din-en-13032-4?product_id=2090373
- [9] ANSI/IES/IUVA, "ANSI/IES/IUVA LM-92-22 Approved Method: Optical and Electrical Measurement of Ultraviolet LEDs," 2022. Accessed: Apr. 25, 2023. [Online]. Available: https://www.techstreet.com/cie/standards/ies-lm-92-22?product_id=2251292
- [10] CIE, "CIE 247:2021 Guide for the gonioradiometric measurement of upper air ultraviolet germicidal irradiation luminaires." doi: 10.25039/TR.247.2021.
- [11] C. Dam-Hansen, A. Thorseth, and D. D. Corell, "ENERGIEFFEKTIV UV-DESINFEKTION," *LYS*, vol. 4, p. 29, 2021.
- [12] J. J. Liang *et al.*, "The effectiveness of far-ultraviolet (Uvc) light prototype devices with different wavelengths on disinfecting sars-cov-2," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 22, Nov. 2021, doi: 10.3390/app112210661.
- [13] E. Eadie, I. M. R. Barnard, S. H. Ibbotson, and K. Wood, "Extreme Exposure to Filtered Far-UVC: A Case Study†," *Photochem Photobiol*, vol. 97, no. 3, pp. 527–531, May 2021, doi: 10.1111/php.13385.
- [14] K. Mølbak and et Al, "Forskere: COVID-19-spredning med aerosoler betyder et paradigmeskifte i forebyggelse," *Ugeskr Laeger*, Mar. 2023, Accessed: Apr. 27, 2023. [Online]. Available: <https://ugeskriftet.dk/debat/forskere-covid-19-spredning-med-aerosoler-betyder-et-paradigmeskifte-i-forebyggelse>

8. Bilag A Formidlingsaktiviteter

Liste over formidlingsaktiviteter, foredrag, artikler i projektperioden:

Projekt hjemmeside, <https://orbit.dtu.dk/en/projects/elforsk-project-353-015-effective-uv-disinfection>

Elforsk projektside: <https://elforsk.dk/projektdatabase/effektiv-uv-disinfection>

Carsten Dam-Hansen "How do we verify that a UV-light source meets the required specifications?", Foredrag ved "UV-light sources for medical, industrial, and COVID-19 applications", 24-11-2021, DTU Risø, https://orbit.dtu.dk/files/264560648/UV_C_measurements_CADH_seminar_slides.pdf

Anders Thorseth, "CIEs recommendations regarding UV-light", Foredrag ved "UV-light sources for medical, industrial, and COVID-19 applications", 24-11-2021, DTU Risø, https://orbit.dtu.dk/files/264568407/Thorseth_CIE_recomendations_regarding_UV_light.pdf

"Industrien viser stor interesse for ultraviolet lys", Elforsk, 17-12-2021: <https://elforsk.dk/nyheder/projektresultat/industrien-viser-stor-interesse-ultraviolet-lys>

Carsten Dam-Hansen, Anders Thorseth, Dennis Dan Corell, "Energieffektiv UV-desinfektion", LYS, vol. 4, p. 29 (2021), <https://orbit.dtu.dk/en/publications/energieffektiv-uv-desinfektion>, og direkte link: https://elforsk.dk/files/media/document/353-015_Artikelt_LYS_04_2021_side_29.pdf [11]

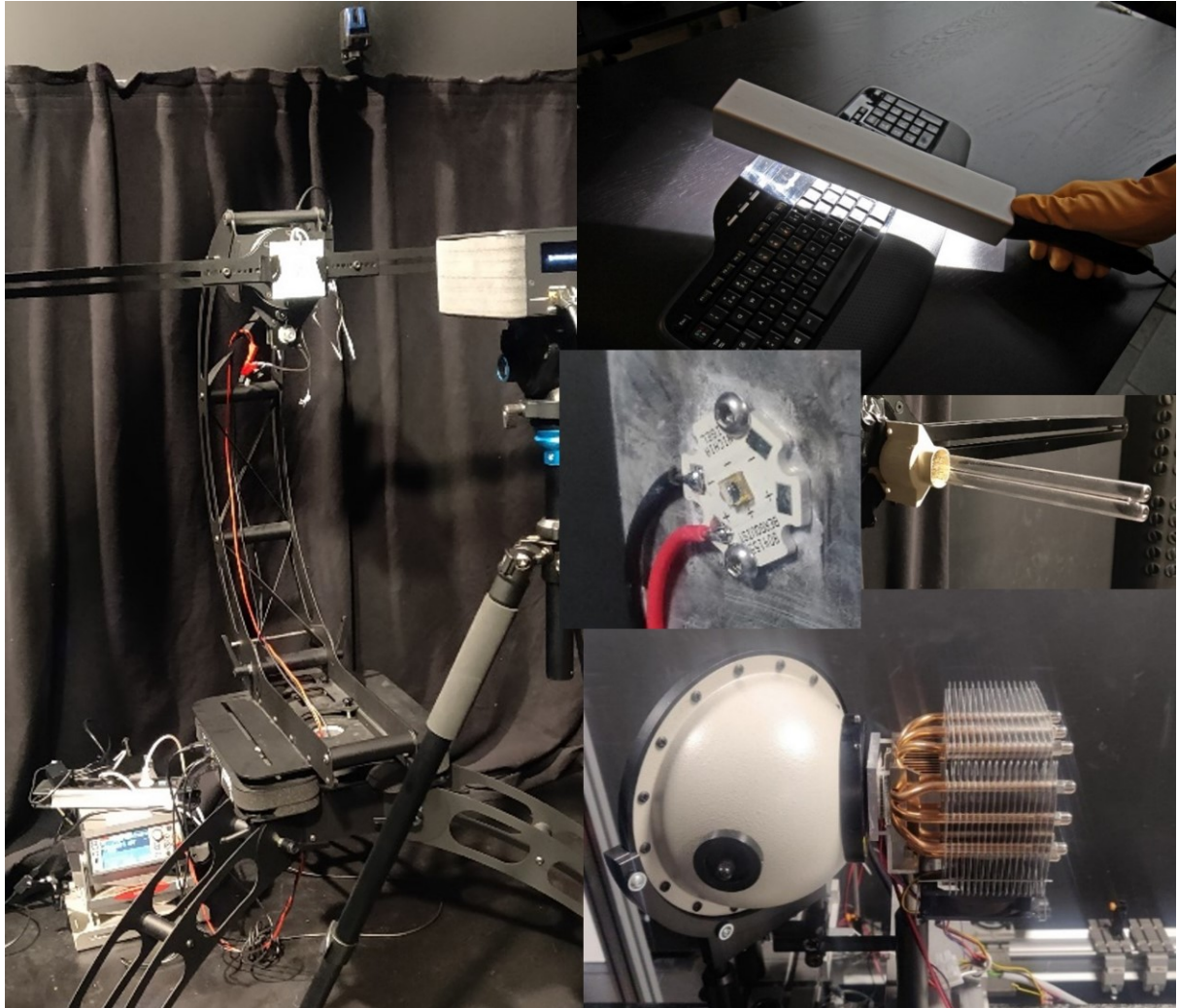
Carsten Dam-Hansen, "Velkomst", foredrag ved LED Temadag 2023, Risø DTU, 28-2-2023, https://orbit.dtu.dk/files/311768588/LED_temadag_Velkomst.pdf

Carsten Dam-Hansen, "UVC-LED effektivitet og simulering af systemer", foredrag ved LED Temadag 2023, Risø DTU, 28-2-2023 https://orbit.dtu.dk/files/311769133/LED_Temadag_UVC.pdf

Martin Løbel, "UVC hos LED iBond", foredrag ved LED Temadag 2023, Risø DTU, 28-2-2023 [link til præsentation](#).

9. Bilag B Foto til formidling

Forsidefoto, kan benyttes ved formidling af projektet r



Fototekst: Fotos af overflade UVC LED desinfektions system øverst til højre, UVC LED monteret på køleprofil, lavtryks UVC rør og laboratorie faciliteter til måling af strålingsstrøm og intensitets fordeling af UV kilder, fra Elforsk projektet "Effektiv UV desinfektion" 353-015.