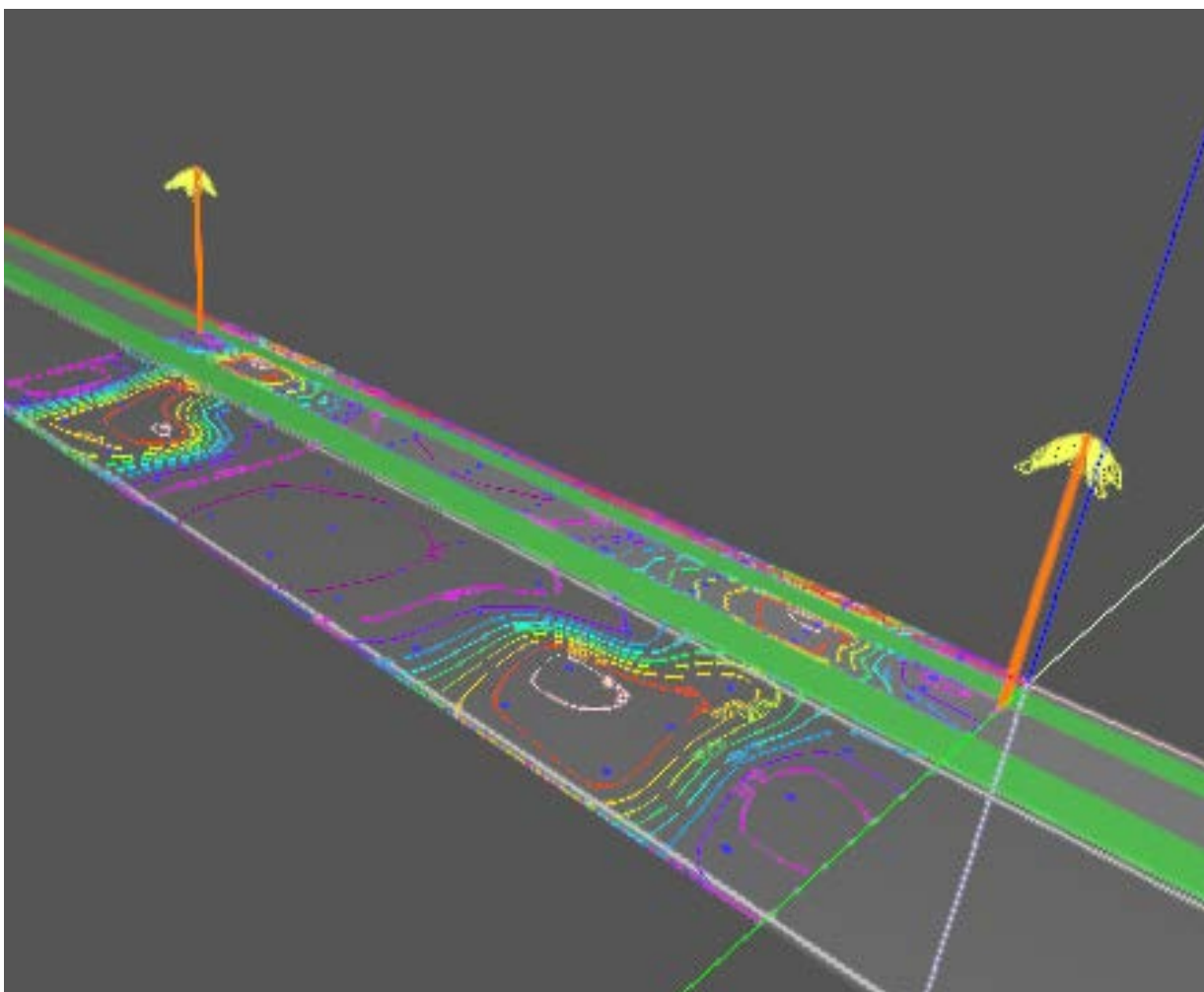


Slutrapport for

# Energioptimering af LED system til vejbelysning

PSO 347-044



Af Carsten Dam-Hansen, Jesper Wolf\*, Peter Poulsen, DTU Fotonik, Thøger Kari, Apiosoft, og Jakob M. Andersen\*, HeSaLight.

\*) har nu nyt arbejdssted

September 2018

## Forord

Denne rapport indeholder en beskrivelse af arbejdet udført i og resultaterne af forsknings- og udviklingsprojektet "Energioptimering af LED system til vejbelysning" og udgør slutrapportering for dette projekt.

Projektet er gennemført i et samarbejde imellem følgende partnere: Apiosoft ApS , HeSaLight A/S og DTU Fotonik. Projektet har været under ledelse af Jesper Wolf, DTU Fotonik, men da han har fået andet arbejde uden for DTU Fotonik, er afslutningen af projektet overtaget af:

DTU Fotonik  
Seniorforsker, Ph.d. Carsten Dam-Hansen  
Frederiksborgvej 399, Bygn. 128, Postboks 49,  
4000 Roskilde  
CVR-nr.: 30060946

Projektet var finansieret af Dansk Energi under Elforsk's PSO program, under indsatsområdet Industriens processer: 3a – LED belysning. Projektet har projekt nr. PSO 347-044, og blev startet 1. januar 2015 og er afsluttet 1. januar 2017. Afslutningen af projektet har været præget af problemer hos Hesalight, som ledte til en konkurs.

I rapportens første del gives et kortfattet resumé af projektet mål og resultater. Rapporten indeholder beskrivelse af baggrunden for og formålet med projektet, projekt gruppen, hovedresultaterne samt konklusioner og perspektiverne af projektets resultater. Rapporten indeholder en beskrivelse af arbejdet med case installationen af LED armaturer i DOLL Living lab, karakterisering af armaturet og on-site målinger af lysfordeling. Simulering og optimering af linsedesign og fremstilling af linser er beskrevet. Endelig gives en oversigt over formidlingsarbejdet i relation til projektet.



Carsten Dam-Hansen

DTU Fotonik, Roskilde, 3. september 2018.

---

## Preface

This report contains a description of the work carried out and the results of the research and development project, "Energy optimization of LED system for road illumination" and form the final report for this project.

The project is carried out in cooperation between the following partners: Apiosoft ApS, HeSaLight A/S og DTU Fotonik. The project has been led by Jesper Wolf, DTU Fotonik, but since he has gotten a new position outside DTU Fotonik, the completion of the project has been taken over by:

DTU Fotonik  
Senior scientist, Ph.d. Carsten Dam-Hansen  
Frederiksborgvej 399, Bygn. 128, Postboks 49,  
DK-4000 Roskilde  
CVR-nr.: 30060946

The project was financed by the Danish Energy Association through Elforsk's PSO program, under actions Processes of the industry: 3a – LED lighting. The project has no. PSO 347-044. It was initiated in January 2015 and was ended in January 2017. The completion of the project has been influenced by HesaLight's problems, which lead to bankruptcy.

In the first part of the report a short summary of the project aim and results is given. The report describes the background and aim of the project, the project group, the work and results together with future perspectives of the results of the project. The report contains a description of the case installation of the road luminaire in DOLL Living Lab, characterization of the luminaire and on-site measurements of the light distribution. Simulation and optimization of the lens design and production of lens elements are described. Finally, the work on communicating the results of the project is described.

## Indhold

Forord .....	2
Preface .....	3
Resumé .....	5
Summary .....	5
Baggrund .....	6
Formål .....	6
Projektgruppen .....	6
Resultater .....	7
Konklusioner og perspektiver .....	7
Case .....	9
Karakteriserings målinger .....	10
Laboratorie målinger .....	10
Onsite målinger .....	12
Custom linsedesign .....	14
Fremstilling af linser .....	16
Formidling .....	17
Videnskabelig publikation .....	18
Præsentationer .....	18

## Resumé

Projektets formål var at påvise, hvordan man, inden for LED vejbelysning, kan optimere designet af den optiske løsning til den konkrete kontekst, hvormed man både kan opnå bedre lysfordeling og energibesparelser. Og gennem analyser at redegøre for kommercielle perspektiver ift. implementering af mass customization af linser. For en case med et specifikt vejbelysningsarmatur, på en specifik type vejstrækning skulle der ved brug af ny CAD-optimeringssoftware baseret på geometrisk 3D-ray-tracing og CIE-standarderne for vejbelysning, designes, optimeres og udvikles et nyt linsesystem.

Resultatet af simuleringer af vejbelysningen med brug af det nye optimerede linsesystem viser, at det er muligt at opnå en forbedret lysfordeling, igennem mindre spildlys og bedre homogenitet og mulig energibesparelse ved afpasning af lysstrømmen. Det er vist, at der er for store designmæssige begrænsninger ved 3D printet optik og at det derfor ikke er en bæredygtig produktionsmetode i dette tilfælde på nuværende stadie. DTU Fotonik har sideløbende udviklet en coatingproces, som er en prisbillig erstatning for manuel polering eller høj præcisions fræsning af sprøjttestøbeværktøjer, som kunne være en mulig fremstillingsmetode.

De i projektet viste store perspektiver for brugen af specialdesignede optiske linser, har DTU Fotonik demonstreret i et sideløbende projekt, hvor der i stadionbelysning er opnået energibesparelser på 50% i forhold til metalhalogenbelysning og 90% mindre spildlys og bedre homogenitet.

## Summary

The aim of the project was to show, in LED road lighting, how it is possible to optimize the design of the optical solution for the actual context, and how you both can achieve better light distribution and energy savings. And through analyzes, explain commercial perspectives in implementing mass customization of lenses. For a case with a specific road lighting luminaire, on a specific type of road stretch, using new CAD optimization software based on geometric 3D-ray tracing and CIE standards for road lighting, a new lens system was to be designed, optimized and developed.

The result of simulations of road lighting using the new optimized lens system shows, that it is possible to achieve improved light distribution through less waste light and better homogeneity and possible energy saving by adjusting the total flux of light. It is shown that there are too big design restrictions on 3D printing of optics and therefore that it is not a sustainable production method in this case and at this time. DTU Fotonik has simultaneously developed a coating process that is an affordable replacement for manual polishing or high precision milling of injection molding tools that could be a possible manufacturing method.

The major perspectives shown in the project for the use of custom-designed optical lenses, has DTU Fotonik used and demonstrated in a parallel project on stadium lighting. Here energy savings of 50% and 90% less waste light and better homogeneity was achieved compared to metal halide lighting.

## Baggrund

Når det kommer til effektivitet, ydeevne og levetid er LED overlegen sammenlignet med konventionelle lyskilder. Desværre går der stadig en masse energi til spilde i LED systemer i form af lys, der aldrig forlader armaturet eller er rettet i uhensigtsmæssige retninger. Størstedelen af alle LED vejbelysningsystemer er udviklet således, at det samme system kan bestykes med forskellige standardlinser, der tilnærmelsesvist passer til den specifikke kontekst, hvori armaturet indgår. Udfordringen er blot at disse linser udvikles til et internationalt marked og skal dække bredt, hvorfor det sjældent er muligt at finde en optimal linse til den specifikke opgave. Desuden er spildlys spild af energi, hvilket naturligvis er en dårlig ting, men det er endnu værre, når lyset skaber ubehagelig blænding. I vejbelysning kan blænding forårsage alvorlige risici, som kan og skal undgås.

Typisk sættes der i forbindelse med udbud krav til selve effektiviteten af armaturet specificeret som lm/W, men som regel ingen præcise krav til selve lysfordelingen. Det fordrer producenter til at fokusere mere på at skabe meget lys i stedet for at skabe godt lys. Det skyldes, at der ofte mangler kompetencer og indsigt hos de instanser som udarbejder og vurderer udbudsmaterialet. En anden problematik er, at samme armatur skal kunne dække forskellige behov, da det er omkostningstungt at lagere og administrere en stor produktportefølje. Derfor vil man i mange sammenhænge opleve belysningsløsninger, som er baseret på armaturer, som var "det bedste alternativ".

Der sker for tiden store teknologiske fremskridt med 3D print af optiske komponenter/linser. Det er yderst interessant af flere årsager. Dels giver det formfrihed til at udføre linser med komplekse geometrier, som ikke skal kompromitteres af produktionstekniske begrænsninger, og dels kan man udføre lav volumen produktion af custom løsninger uden at tænke på store omkostninger til sprøjtstøbe værktøjer.

## Formål

Projektets formål var derfor at påvise, hvordan man, inden for LED vejbelysning, kan optimere designet af den optiske løsning til den konkrete kontekst, hvormed man både kan opnå bedre lys og energibesparelser. Og gennem analyser, at redegøre for kommercielle perspektiver ift. implementering af mass customization af linser.

For en case med et specifikt vejbelysningsarmatur, med en specifik type vejstrækning, skal der ved brug af ny CAD-optimerings-software baseret på geometrisk 3D-ray-tracing og CIE-standarderne for vejbelysning, designes og udvikles et nyt linsesystem, der optimerer lyset til denne anvendelse af armaturet. Dette gøres igennem karakteriseringsmålinger og simuleringer af LEDer, armatur, og fordelingen af lyset på vejstrækningen, og skal vise, at det er muligt at opnå bedre lysfordeling, igennem mindre spildlys, bedre homogenitet og mindre energiforbrug. 3D printning skal undersøges som en billig produktionsmulighed for lav volumen fremstilling af sådanne linsesystemer.

## Projektgruppen

Til at gennemføre og opnå dette blev en forskningsgruppe bestående af DTU Fotonik som projektledende, Apiosoft ApS og HeSaLight A/S sammensat. DTU Fotonik har kompetencer indenfor LED teknologi, beregning og måling på lys og stod for måling og karakterisering af LED system og lysfordeling på vejen. Apiosoft udvikler deres eget 3D raytracing optimeringsprogram til CAD-modeller af nye linsedesign, hvor

computersimulering/beregninger foretages ud fra gældende lovkrav for vejbelysning. HeSaLight leverer armaturer, som også er installeret i DOLL Living Lab som case for projektet. Der er endnu ingen danske virksomheder, som tilbyder 3D printning af optiske elementer, hvorfor projektet har anvendt en ekstern underleverandør til undersøgelser af denne produktionsmetode.

## Resultater

I projektet er der defineret en case med et specifikt vejbelysningsarmatur, som også er installeret på en vejstrækning på Smedeland, Glostrup i DOLL Living lab. Det valgte LED baserede armatur giver mulighed for udskiftning af det eksisterende linsesystem. Vejstrækningen består af fortov, cykelsti, vejbane med mellemliggende græsområder og er udgangspunkt for optimeringen af et nyt linsesystem til armaturet. Der er foretaget on-site målinger af lysfordelingen med det eksisterende linsesystem på vejstrækningen. Denne lysfordelingsmåling er benyttet som udgangspunkt for simuleringer og optimering. Armaturet med det eksisterende linsesystem er karakteriseret i DTU Fotoniks laboratorium med resultater for lysfordeling, total lysstrøm, effektivitet. Herudfra er tabet i det eksisterende linsesystem estimeret til 12%. Apiosoft har med deres eget 3D raytracing program, optimeret og udviklet CAD modeller af nye linsedesign til erstatning af det eksisterende linsesystem i armaturet. Simuleringer viser, at det forbedrer lysfordelingen, igennem mindre spildlys og bedre homogenitet, og det lever op til vejbelysningsreglerne. Det giver således mulighed for energibesparelser igennem optimering af armaturets totale lysstrøm.

Der er arbejdet med mulighederne for fremstilling af det optimerede linsedesign med 3D printning i samarbejde med firmaet LuxExcel. Det har vist, at der er der er for store designmæssige begrænsninger i 3D printprocessen, som gør, at det ikke er en god løsning for denne type af linsedesign. Da 3D printning ikke var en mulighed, kunne produktionen gennemføres med overfladecoating af et normalt fræset støbeværktøj. Det er en prisbillig erstatning for manuel polering eller højpræcisionsfræsning, som er meget omkostningstunge og begrænsende for lavvolumenproduktion med sprøjttestøbning af optiske elementer. Det er en ide som DTU Fotonik har udviklet sideløbende og har afprøvet med succes i andre projekter. På grund af problemer hos partneren HeSaLight, som resulterede i en konkurs, var det ikke muligt at iværksætte en produktion af det nye optimerede linsedesign med DTU Fotonik's nye metode. Det har således ikke været muligt at få fremstillet linseelementer til installation i armaturer og dermed heller ikke muligt at foretage en on-site evaluering af armaturet med den optimerede linse i DOLL Living Lab installationen.

## Konklusioner og perspektiver

Projektets undersøgelser af brugen af 3D printning af optiske elementer, har vist, at der er for store designmæssige begrænsninger ved 3D printet optik. Det kan konkluderes, at der ikke for nuværende vil være en bæredygtig forretningsmodel for brug af 3D printet optik, også selvom denne kan vise sig værende mere energieffektivt ift. tilpasning af optisk profil til den specifikke kontekst.

Perspektiverne er derimod meget store for brugen af specialdesignede optiske linser og komponenter til specifikke anvendelser, hvor fordelingen af lyset tilpasses og optimeres til den specifikke anvendelse og installation. Simuleringerne af vejbelysningen med brug af det optimerede linsesystem viser, at det er muligt at opnå en forbedret lysfordeling, igennem mindre spildlys og bedre homogenitet og mulig

---

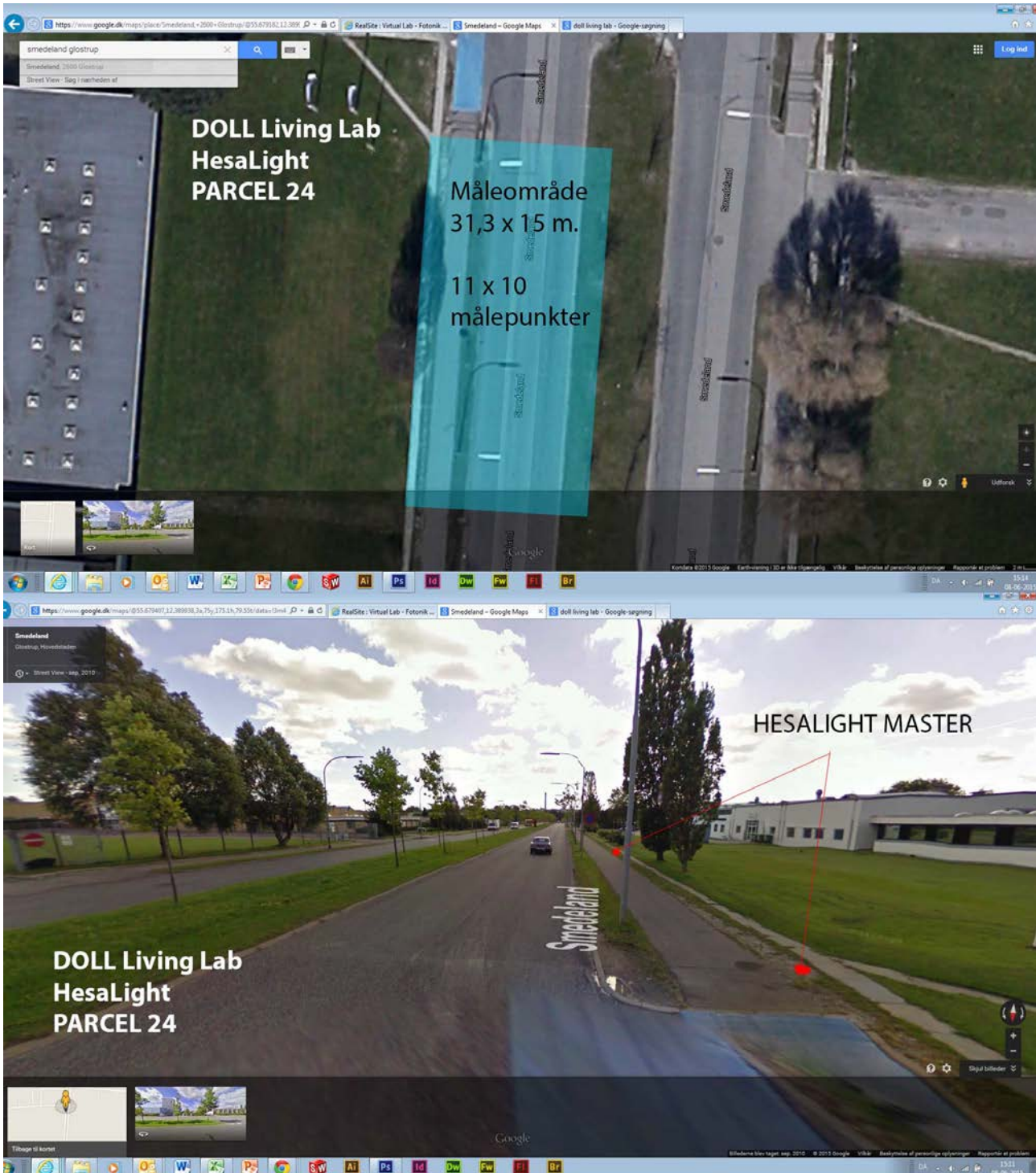
energibesparelse ved afpasning af lysstrømmen. Udnyttelse af disse resultater kræver dog forbedrede og prisbillige metoder til lav volumen produktion af optiske elementer.

DTU Fotonik har arbejdet videre med dette i en række relaterede forsknings- og udviklingsprojekter. Forsøg har været udført med fremstilling af sprøjttestøbeværktøjer med normale fræsere, som ikke giver den optiske kvalitet, men efterfølgende coates overfladen for at opnå den optiske kvalitet. Det er en prisbillig erstatning for manuel polering eller højpræcisions fræsning, som er meget omkostningstunge og begrænsende for lavvolumenproduktion med sprøjttestøbning af optiske elementer. Dette har været gjort med succes i Højteknologifondsprojektet "V8 light engine – en grøn revolution for farvet lys" med fremstilling af linsearrays til spotlyskilder. I EUDP-projektet "SportsLED" er optimeret og udviklet en ny linse til LED lyskilder, der optimerer lysfordelingen til fodboldbaner og sportsstadions og minimerer lyset uden for stadion. Her blev opnået energibesparelser på 50% i forhold til metalhalogenbelysning og 90% mindre spildlys og bedre homogenitet. Her blev polering af normalt fræset værktøj benyttet, som var mulig for denne type optik.



## Case

I samarbejdet med HeSaLight blev det valgt at benytte deres armatur, PRO 60W 4000K, som case for projektet. Her var det muligt for projektet, at benytte de nye DOLL Living Lab faciliteter, hvor HeSaLight's armaturer er opsat i parcel 24, se Figur 1.



Figur 1 Billeder af parcel 24 i DOLL Living Lab hvor HeSaLight's armaturer er sat op. Læg mærke til de nye placeringer af master.

Vejstrækningen for casen består af 0.5 m bredt fortov, 0.9 m bredt græsområde, 1,75 m bred cykelsti, 1.4 m bredt græsområde, 7.1 m bred ensrettet dobbeltsporet vejbane.

Casen er beskrevet ved følgende parametre:

Living Lab. Parcel 24 - Smedeland

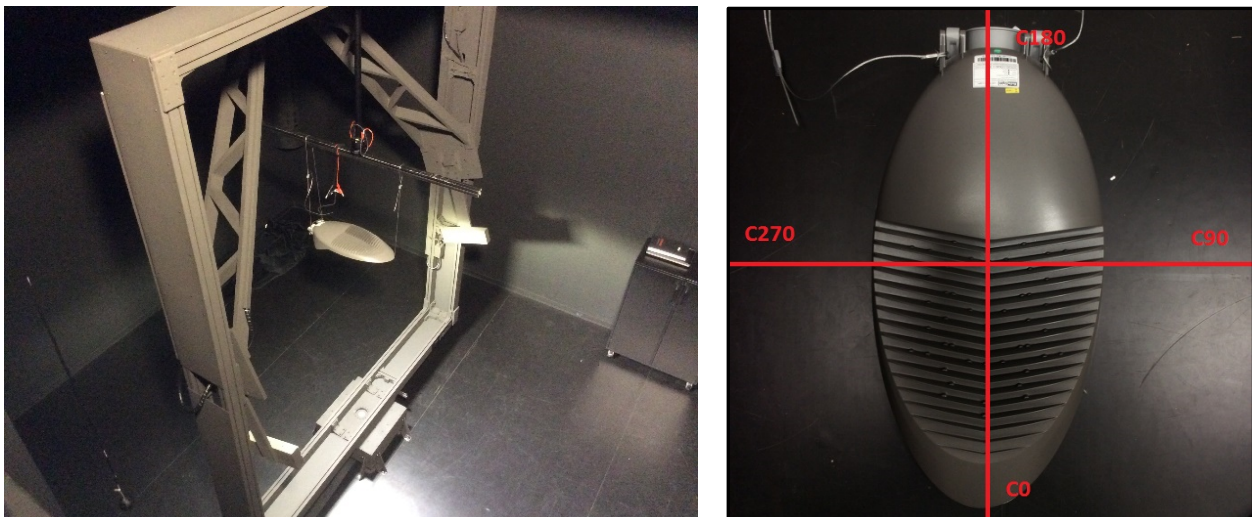
- PRO 60W 4000K
  - Antal: 5stk.
  - Dæmpning = 18,3% (49W)
  - Linsetype: Type3
- Vejklasse E1
- L7B – Trafikvej
- Afstand på master: 28 meter

## Karakteriseringsmålinger

Som baggrundsmateriale for optimeringsarbejdet i projektet er der foretaget en grundlæggende karakterisering af case armaturet og en faktisk opsætning på en vejstrækning. Der er således lavet laboratiormålinger af armaturet i DTU Fotoniks lystekniske laboratorium, og der er lavet on-site målinger af lysfordelingen på en vejstrækning i DOLL Living lab. Disse er beskrevet i de følgende afsnit.

## Laboratiormålinger

Case armaturet fra HeSaLight, PRO 60W 4000K, med betegnelsen HL-SL-PRO-60-740-L3, er blevet karakteriseret i DTU Fotoniks nær-felts goniofotometer, RiGo-801 fra Technoteam. Opsætningen og orienteringen af armaturet er vist i Figur 2. Med denne facilitet måles såvel den totale lysstrøm i lumen, som sammen med effektforbruget målt i Watt, giver effektiviteten målt i lumen/Watt.



Figur 2 Foto af opsætningen af HeSaLight's armatur i DTU Fotoniks nær-felts goniofotometer til måling af total lysstrøm og lysintensitets fordeling. Til højre ses armaturet oppefra med måleplanerne indtegnet.

Til simuleringer i Dialux er det nødvendigt at rotere den målte lysfordelingsfil således at C90 er vinkelret på vejens længderetning. De er således roteret 90 grader forud for Dialux simuleringerne.

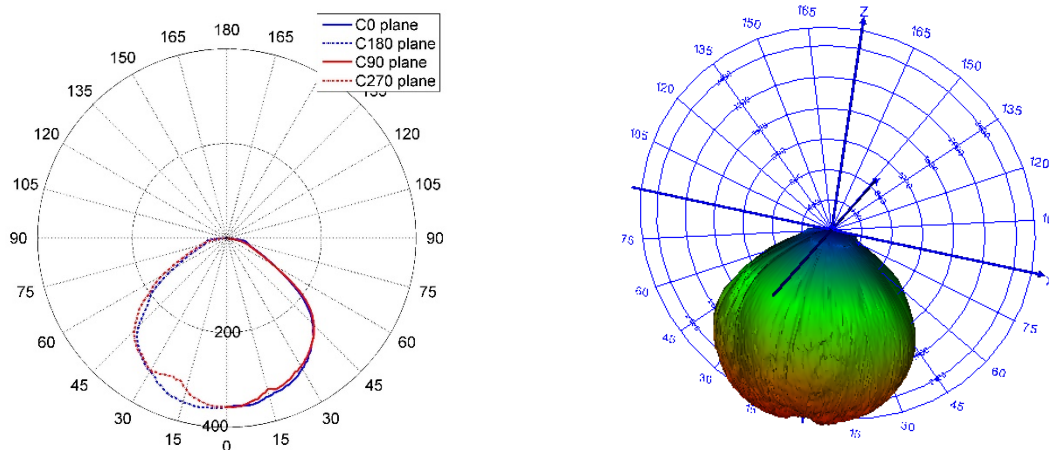
I Tabel 1 er vist måleresultaterne fra de to målinger for hhv. total lysstrøm (Luminous flux), effektforbrug (Power) og effektivitet (luminous efficiency).

Tabel 1 Tabel med måledata fra målingerne på HeSaLight's armatur, HL-SL-PRO-60-740-L3, hhv. med og uden front og linser. Tab i linser er beregnet ud fra forskel imellem målinger med og uden linser.

	Without front and lenses	With front and lenses	Loss [%]
Power [W]	56,3	56,2	-
Luminous Flux [lm]	7265	6408	11,8
Luminous Efficiency [lm/W]	129,1	113,9	11,7

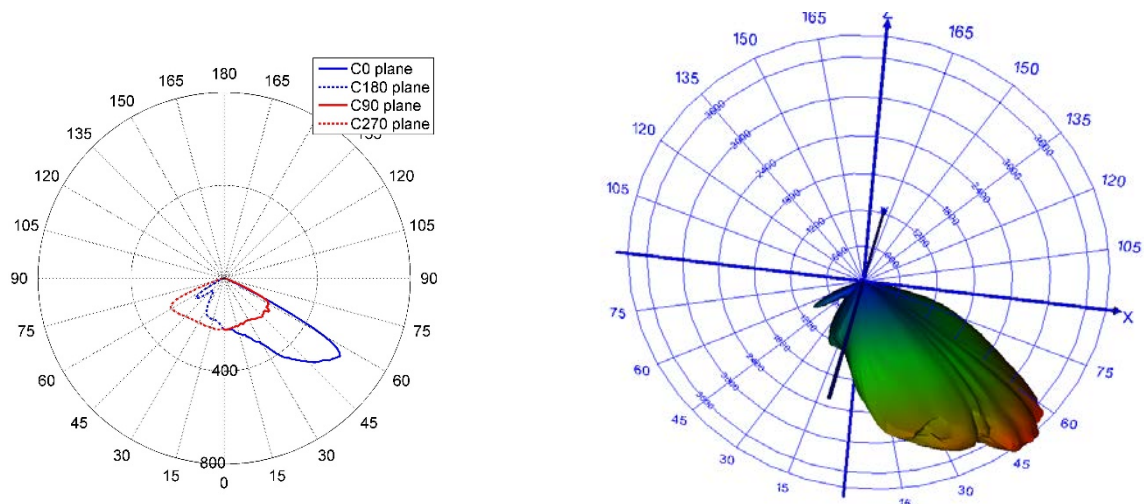
Det ses, at armaturet med linser har en effektivitet på ca. 114 lm/W, hvilket er en høj effektivitet for denne produktkategori. Yderligere ses det, at den totale lysstrøm falder med 12 % efter montering af linserne. Det er en normal og forventet værdi for tabet i linserne.

På Figur 3 er vist den målte intensitetsfordeling for HeSaLight's armatur uden front og linser.



Figur 3 Målt intensitetsfordeling for HeSaLight's armatur, HL-SL-PRO-60-740-L3, uden front og linser, til venstre ses de fire hovedplaner og til højre en 3D visualisering.

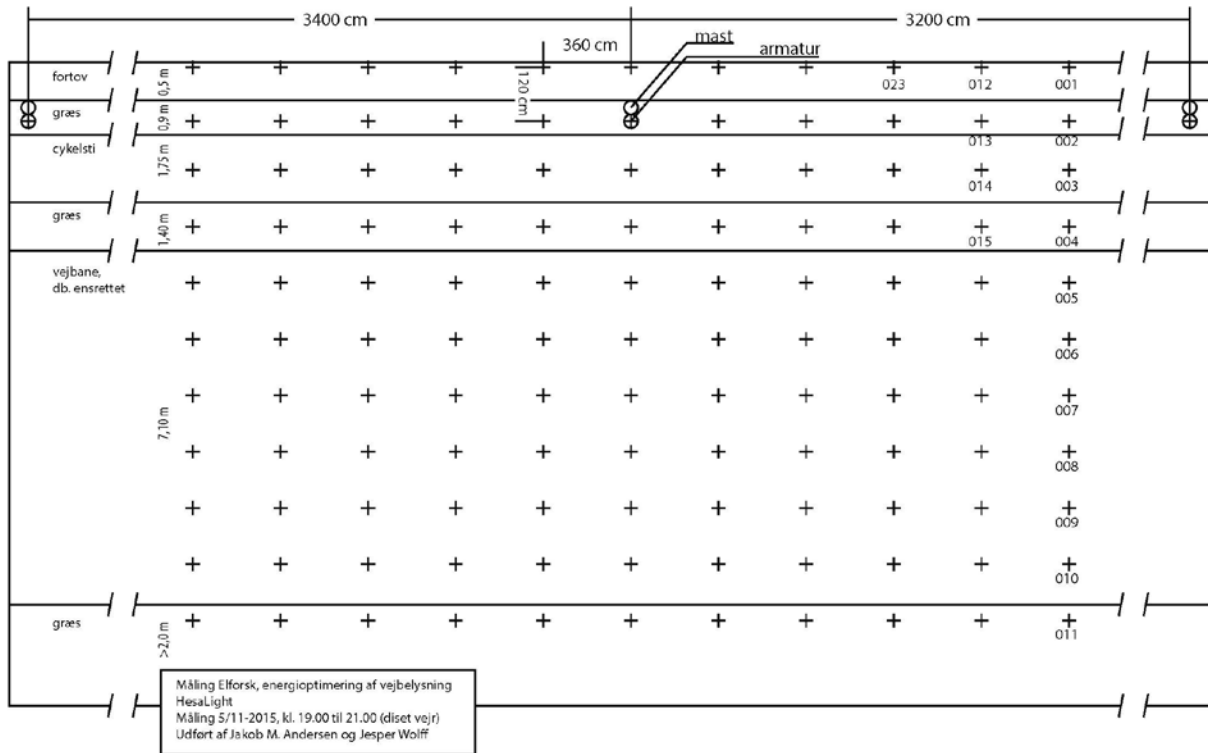
Graferne viser en meget jævn intensitetsfordeling, med maksimal intensitet i (0,0) retningen, vinkelret på armaturets LED og linseplan. På Figur 4 er vist den målte intensitetsfordeling for HeSaLight's armatur med front og linser. Med linserne installeret ses nu den ønskede asymmetri, med maksimal intensitet i retningen mod vejbanen og lav intensitet imod fortovet. På 3D visualiseringen ses, at intensiteten er høj ud mod vejbanen i et stort vinkeludsnit.



Figur 4 Målt intensitetsfordeling for HeSaLight's armatur, HL-SL-PRO-60-740-L3, med front og linser, til venstre ses de fire hovedplaner og til højre en 3D visualisering.

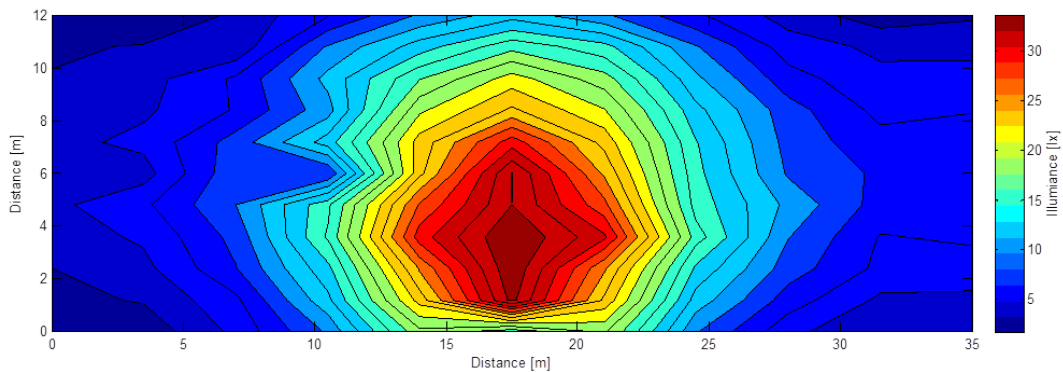
## Onsitemålinger

For at kunne sammenligne beregninger, som f.eks. simuleringer lavet i DiaLux, med de faktiske forhold når armaturer sættes op på en vejstrækning, er der foretaget en on-sitemåling af lysfordelingen i parcel 24 i DOLL Living lab, hvor HeSaLight's, PRO 60W 4000K, er opsat, se Figur 1. Her er vist måleområdet på 31.3m x 15m, som er delt op i et antal målepunkter. Disse 11x10 punkter er vist på skitsen for on-site målingen på Figur 5.



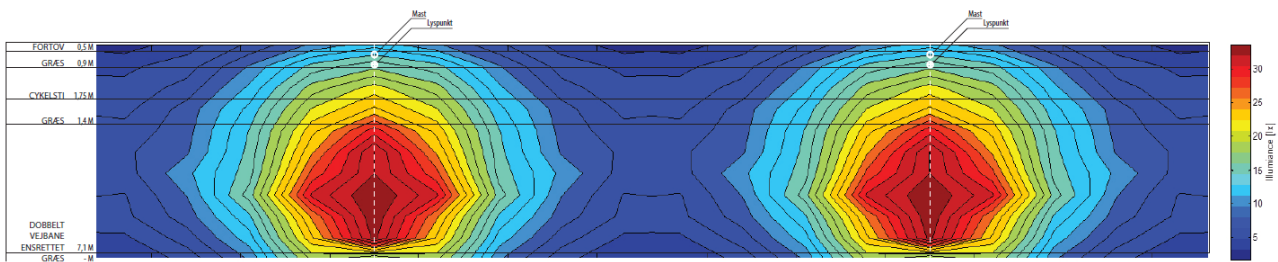
Figur 5 Opsætning af målepunkter til on-sitemåling af lysfordeling i parcel 24 med HeSaLight's armaturer installeret.

Målingen blev foretaget den 5. november 2015 i tidsrummet fra 19.00 til 21.00. En aften med diset vejr. De primære måleresultater er vist på Figur 4.



Figur 6 Måleresultater for on-site målingen i 11x10 punkter af installationen af HeSaLight's armaturer i DOLL Living Lab, med illustration af isolux linier og farveskala for illuminansen.

På Figur 5 er taget måledata fra Figur 4 og de er gentaget for to master/lyspunkter, således at det giver informationen om lysfordelingen over en strækning på ca. 62 m omkring to lyspunkter. På figuren er indtegnet fortov, cykelsti, vejbane med mellemliggende græsområder.



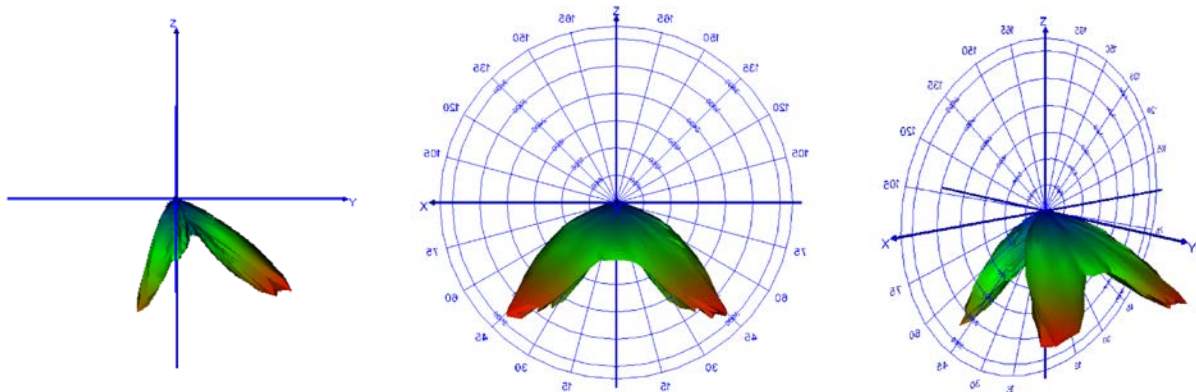
Figur 7 Illustration af illuminansfordelingen på casevejstrækningen omkring to lyspunkter, genereret ud fra målingen omkring et lyspunkt, se Figur 4.

De udførte on-site illuminansmålinger i Living Lab kan bruges til vurdering af ensartethed i lysfordelingen, men ikke til at vurdere om belysningen overholder gældende krav, da disse baseres på luminansmålinger. Der er ikke foretaget luminansmålinger på installationen i DOLL Living Lab. Der er yderligere målt på to andre installationer af Philipsarmaturer, som var tiltænkt som referencegrundlag.

## Custom linsedesign

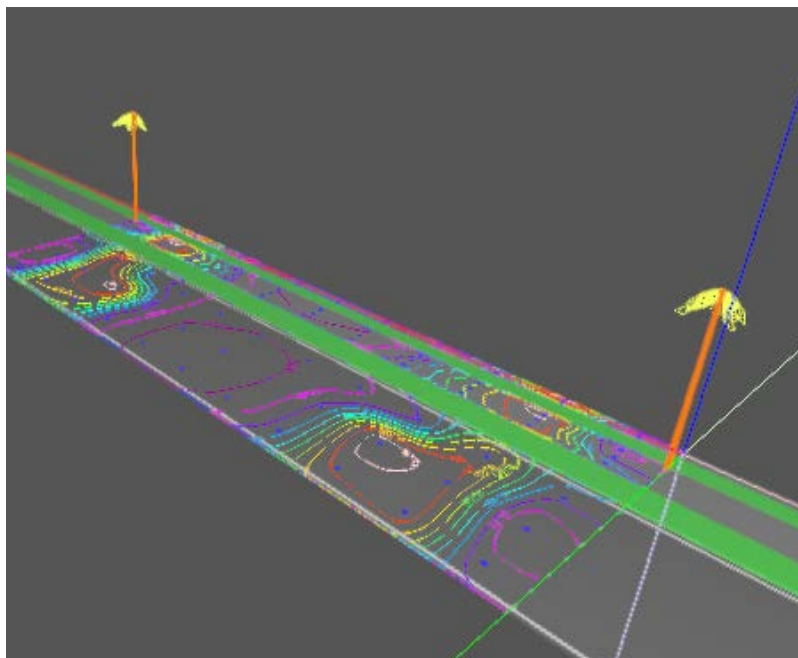
De lystekniske karakteriseringer af HeSaLightarmaturet og data for de i armaturet benyttede LED komponenter har fungeret som grundlag for udvikling af en optimeret optisk løsning og linsedesign. ApioSoft har benyttet gældende lovkrav for belysningsklasse L7B som grundlag for udviklingen af nye linsedesigns, som er baseret på computersimulering og optimering. De forskellige linsedesigns forfines/forbedres over flere iterationer, således at designet er muligt at integrere i armaturerne og muligt at fremstille til prototype og senere volumenproduktion.

Optimeringen af linsedesignet er udført i ApioSofts egen CAD-optimerings-software, der har implementeret den mest præcise optiske model til formålet, geometrisk 3D-ray-tracing, samt direkte implementeringer af CIE standarderne for vejbelysning. ApioSofts software er i modsætning til andre typer af 3D-ray-tracing i stand til at optimere meget komplekse geometrier på forholdsvis kort tid ved brug af en iterativ process, hvor kompleksiteten øges gradvist. Brugen af 3D-ray-tracing samt realistiske, målte udstrålingsprofiler fra LED'erne har gjort det muligt at undgå flere prototype-trin, da resultatet fra udregningerne er meget tæt på virkeligheden. Der er genereret flere forskellige optimerede linsedesign, som kunne passe i HeSaLight's armatur, med 6 linser pr. enhed. På Figur 8 er lysintensitetsfordeling for HeSaLight's armatur vist for det optimerede linsedesign. Det ses, at denne optimerede intensitetsfordeling har kraftigere intensitetmaksima i ca. 45 grader og lavere intensitet i retningen vinkelret ud mod vejen, end som den fordeling, der er målt for det originale HeSaLight armatur, som vist på Figur 4. Yderligere, er der i det optimerede design kraftigere intensitets maksima også i ca. 45 grader, som rettes ned mod fortovet/cykelstien.



Figur 8 3D visualisering af en optimeret lysintensitetsfordeling for HeSaLight's armatur, set hhv. langs vejen, på tværs af vejen, og skråt fra siden.

Der er lavet simuleringer i Dialux Evo for at undersøge og verificere den optimerede lysfordeling på vejen, hvor armaturer med lysintensitetsfordeling for den optimerede linse er sat ind.



Figur 9 Illustration af simulering af lysfordeling på vejen med armaturer med lysintensitetsfordeling for den optimerede linse.

Simuleringerne er udført for HeSaLight armaturet med hhv. optimeret linse og den oprindelige linse. Oversigten over resultater for simulering af lysfordelingen på vejen, cykelstien og fortovet er vist på Figur 10, Til venstre er for den optimerede linse og til højre er for den oprindelige linse.

Overview		
Wattage / km	[W/km]	0
Imax 70°	[cd/kdm]	329
Imax 80°	[cd/kdm]	34
Imax 90°	[cd/kdm]	0
Imax more than 90°	[cd/kdm]	0
Imax more than 95°	[cd/kdm]	0
Blind index class		D.6
Luminous intensity class		G6
Valuation Field (A1)	Bicycle lane 1 (A1)	
Em (hs)	<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 5.00	8.43 ✓
U0 (hs)	<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.15	0.29 ✓
Valuation Field (A1)	Sidewalk 1 (A1)	
Em (hs)	<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 5.00	6.12 ✓
U0 (hs)	<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.15	0.29 ✓
Valuation Field (MEW5)	Roadway 1 (MEW5)	
Lm	<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.50	0.85 ✓
U0	<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.35	0.36 ✓
TI	<input checked="" type="checkbox"/> ≤ 15	2 ✓
SR	<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.50	0.67 ✓
U0 (wet)	<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.15	0.29 ✓

Overview		
Imax 70°	[cd/kdm]	381
Imax 80°	[cd/kdm]	16
Imax 90°	[cd/kdm]	0.540
Imax more than 90°	[cd/kdm]	0.720
Imax more than 95°	[cd/kdm]	0.720
Blind index class		D.6
Luminous intensity class		G3
Valuation Field (A1)	Bicycle lane 1 (A1)	
Em (hs)	<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 5.00	7.88 ✓
U0 (hs)	<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.15	0.47 ✓
Valuation Field (A1)	Sidewalk 1 (A1)	
Em (hs)	<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 5.00	6.45 ✓
U0 (hs)	<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.15	0.39 ✓
Valuation Field (MEW5)	Roadway 1 (MEW5)	
Lm	<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.50	0.83 ✓
U0	<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.35	0.44 ✓
TI	<input checked="" type="checkbox"/> ≤ 15	1 ✓
SR	<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.50	0.76 ✓
U0 (wet)	<input checked="" type="checkbox"/> ≥ 0.15	0.38 ✓

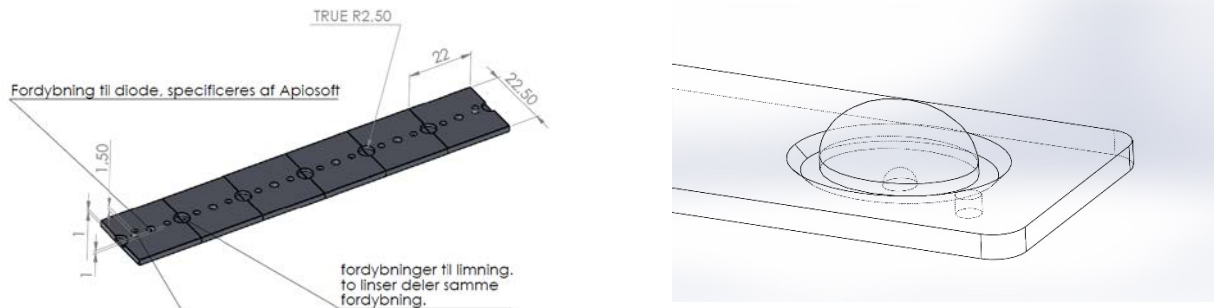
Figur 10 Oversigt over resultater for simulering af lysfordelingen på vejen for HeSaLight armaturet med hhv. optimeret linse (venstre) og den oprindelige linse.

Det ses af de simulerede værdier, at den optimerede linse er lidt bedre på nogle punkter. På grund af at de teoretiske udregninger er så skræppe, kan vi endda godt regne med lidt højere uniformity og samt højere gennemsnitlig illuminans. En klar lektie at tage med herfra er, at det er meget vigtigt ikke at lave sit montagedesign før man ved, hvordan linsen skal se ud. En anden stor begrænsende faktor er reflektoren. Man kan godt udnytte den i optimeringen og den hjælper lidt til at skærme, men den blokerer også en masse og kan gøres meget bedre. Lysbesparelsen skal opnås ved at balancere luminansen på vejen med illuminansen på fortovet, hvilket helt sikkert også kan gøres bedre. De to ting arbejder en del mod hinanden så at skabe en god balance kræver, at man eks. slækker på illuminansen. Der er således ikke simuleringer, der viser den mulige lys- og energibesparelse, men optimeringerne viser, at der er mulighed for at opnå en besparelse, men ikke hvor stor den kan være.

## Fremstilling af linser

På optikdesignet har der været flere udviklingsiterationer/optimeringer. Der er for hver udviklingsiteration været udført simuleringer, der påviste om designet kunne optimeres yderligere forud for fremstilling af prototypelinser. Der er fremstillet en 3D specifikation af linsen og monteringen af denne i elementer af 6 linser, som passer til HeSaLight armaturets LED enhed, se Figur 9.





Figur 11 3D specifikation af linsen og monteringen af denne i elementer af 6 linser til HeSaLight armaturets LED enhed.

I samarbejde med Bram Meulblok, LuxExcel, er der foretaget en vurdering af muligheden for 3D print af linserne. De designmæssige begrænsninger ved 3D printet optik, har vist sig at være meget store, og giver derfor ringe vilkår for en forbedring af lysfordelingen ift. eksisterende linser baseret på sprøjttestøbning. Og det har vist sig, at vi ikke kan bruge linserne direkte fra 3D printeren, da linserne skal fræses på den "flade" side (mod dioderne), for at skabe plads til dioderne, og at yderligere integrerede montagestag og undersænknings til limning også skal fræses. Det medfører meget høje priser på linserne, hvilket betyder, at vi i projektet måtte konkludere, at der ikke for nuværende vil være en bæredygtig forretningsmodel for brug af 3D printet optik, også selvom denne kan vise sig værende mere energieffektivt ift. tilpasning af optisk profil til den specifikke kontekst. Men det betyder ikke, at det ikke på sigt kan ændre sig, når 3D print teknologien udvikles og modnes til mindre designbegrænsninger og lavere prissætning.

DTU Fotonik har i andre projekter arbejdet med sprøjttestøbning af specialdesignede og optimerede linser. Sprøjttestøbning af linser og andre optiske elementer er meget omkostningstungt at komme i gang med da udgiften til værktøjet er stor. Det er bl.a. fordi det skal have overflade med optisk kvalitet, meget lille ruhed. Det kan opnås ved manuel efterpolering af værktøjet, hvilket er arbejdstungt og meget dyrt, eller med specielle 3D ultra-præcisionfræsere, hvilket ligeledes er dyrt. Forsøg har været udført med fremstilling af værktøjer med normale fræsere og efterfølgende coatning af overfladen for at opnå den optiske kvalitet. Dette har været gjort med succes i Højteknologifondsprojektet "V8 light engine – en grøn revolution for farvet lys" og i EUDP projektet "SportsLED" blev polering af normalt fræset værktøj benyttet. Her blev opnået energibesparelser på 50% i forhold til metalhalogenbelysning og 90% mindre spildlys og bedre homogenitet. Det var planen at fremstille et værktøj til linselementerne til HeSaLight's armatur på denne måde. Desværre kom HeSaLight i problemer og kunne ikke medfinansiere udviklingen af værktøjet, og da de kort derefter gik konkurs, blev det besluttet ikke at fremstille værktøjet, og dermed ikke muligt at demonstrere effekten af de optimerede linser i HeSaLight's armatur.

## Formidling

Der er i løbet af projektperioden udført et formidlingsarbejde for at skabe information omkring projektet og de problemstillinger og metoder og resultater som er fremkommet af projektet. Herunder er listet de forskellige formidlingstiltag:

---

## Videnskabelig publikation

- "Facility to evaluate street lightning solutions in a realistic urban setting", Andersen, Jakob Munkgaard, Anders Thorseth, and Carsten Dam-Hansen, Proceedings of 28th CIE Session 2015. 2015. 223-228.
- "Giver LED-pærer det samme lys i Kina. Danmark og USA?", Thorseth, Anders; Dam-Hansen, Carsten, Lys, No. 3, 2015, p. 28
- "Replication of optical microlens arrays using photoresist coated molds", Chakrabarti, Maumita; Dam-Hansen, Carsten; Stubager, Jørgen; Pedersen, T. F.; Pedersen, Henrik Chresten, Optics Express, Vol. **24**, No. 9, 2016, p. 9528-9540.

## Præsentationer

Projektet og dets formål og indhold er blevet præsenteret ved en række forskellige sammenhænge, kurser, foredrag for samarbejdspartnere, og ved større møder

- Carsten Dam- Hansen, *Measuring angular light distribution of lamps and luminaries*, foredrag ved LED conference, Roskilde, November 2016
- Carsten Dam- Hansen, *Test og karakteristik af LED-lyskilder og lamper*, Inviteret foredrag ved gå-hjem arrangement om "LED belysning" på DTU Fotonik, Risø for KASER – Efteruddannelsesudvalget, 16. september 2015
- Carsten Dam- Hansen, *LED possibilities and challenges*, Lecture at DTU course 33480 High-Tech Entrepreneurship, 4. januar 2016.
- Carsten Dam- Hansen, *Properties of LED – considering museum lighting*, Inviteret foredrag på DTU Bibliotek og online, 24. februar 2015