



CooLED - efficient LED bulbs with custom optics - final report

Wolff, Jesper; Corell, Dennis Dan; Dam-Hansen, Carsten; Poulsen, Peter Behrendorff; Jensen, Peter; Thorseth, Anders; Tryde, Jacob Willer; Alexiou, Alexandra; Svendsen, Carsten B.; Borup, Nicolas; Bramsen, Thor; Bruland, Jean; Rødgaard, Martin Schøler; Steenstrup, Anders Resen ; Mansfeldt, Lisbeth; Wolff, Hans-Erik

Publication date:
2016

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):

Wolff, J., Corell, D. D., Dam-Hansen, C., Poulsen, P. B., Jensen, P., Thorseth, A., ... Wolff, H-E. (2016). CooLED - efficient LED bulbs with custom optics - final report. Energiteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram.

DTU Library

Technical Information Center of Denmark

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

CooLED

– efficient LED bulbs with custom optics

SLUTRAPPORT



PH4½-3½ med CooLED pære
Foto: Carsten Dam-Hansen, DTU Fotonik

Projekt af:

DTU Fotonik

Dennis Dan Corell, Carsten Dam-Hansen, Peter B. Poulsen, Peter Jensen, Anders Thorseth, Jesper Wolff (projektleder)

AT Lighting

Jacob Willer Tryde, Alexandra Alexiou

C. B. Svendsen

Carsten B. Svendsen, Nicolas Borup

Teknologisk Institut

Thor Bramsen

Noliac

Jean Bruland, Martin Schøler Rødgaard, Anders Resen Steenstrup

Louis Poulsen

Lisbeth Mansfeldt, Hans-Erik Wolff

Støttet af:

EUDP - Energiteknologisk udvikling og demonstration

Final report

1.1 Project details

Projekt titel	EUDP- 12-II, CoolLED – en ny generation LED Lyskilde for det tidsløse high-end marked
Projekt identifikation (program abbrev. og fil)	Journalnr.: 64012-0226
Navnet på det program, der har finansieret projektet	EUDP
Projekt administrerende virksomhed/institution (navn og adresse)	DTU Fotonik, RISØ Campus, Frederiksborgvej 399, 4000 Roskilde
Projekt partnere	DTU Fotonik, AT Lighting, C. B. Svendsen, Noliac, Teknologisk Institut, Louis Poulsen
CVR (centrale virksomhedsregister)	30060946
Dato for indsendelse	29/1-2016

1.2 Kort beskrivelse af projektets mål og resultater

Mål



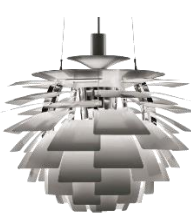
Projektet havde til formål at udvikle og demonstrere en ny type LED pære, kaldet CoolLED, med udskiftelig optik dedikeret til 3 specifikke PH lamper fra Louis Poulsen. Pæren skulle optimere energiforbruget ud fra en betragtning om LOR (light output ratio - lys ud af lampen i forhold til lys fra lyskilden). Og samtidigt skulle pæren levere et æstetisk smukt lys, der lever op til Louis Poulsen' krav, baseret på designerens intentioner (PH, Poul Henningsen). Og pæren skulle integrere ny piezokeramisk transformerteknologi, der søgtes modnet gennem projektet, samt optimere køleemnets geometri, der effektivt håndterer varmeafledning fra dioderne. Det færdige resultat var på det tekniske og produktionsmæssige niveau målsat til at levere dokumentation til 0-serie, og funktionsdygtig fysisk prototype til demonstration.

Yderligere søgte projektet at undersøge markedet og udarbejde forretningsplan for CoolLED produktet/produkterne samt forestå formidling af projektet.

Resultater

Projektet har udviklet 3 fuldt funktionsdygtige CoolLED prototyper, som er testet og demonstreret i udvalgte PH-lamper fra Louis Poulsen: PH5, PH4½-3½ og Koglen Ø48. Prototyperne har på samtlige områder, med undtagelse af modning og implementering af piezokeramisk transformer komponent, leveret tilfredsstillende resultater, der har levet op til målsætningen og i enkelte tilfælde langt overgået dem.

Der er rent lysteknisk målt markante forbedringer på LOR, samtidigt med at lyskvaliteten/lysfordelingen i lamperne vurderes tilfredsstillende:

	LOR med bedste alternativ		LOR med CoolLED	Relativ forbedring
	36,5 %	➔	51,5 %	42,6 %
	36,4 %	➔	69,7 %	91,4 %
	19.8 %	➔	24.4 %	23.2 %

Med hensyn til optimering af køleemnet har vi opnået stabil driftstemperatur på 75 gr. C. ved rumtemperatur på 25 gr. C. Dette betragtes som acceptabelt. Resultatet er opnået ved brug af ca. 38 gram. Aluminium svarende til 3,5 g pr. W brugt i hele systemet/pæren. Gængse LED retro-fit pærer anvender typisk ca. 7-8 g pr. W., hvilket er en optimering på mere en 100%.

Det mekaniske design af CoolLED pæren er ikke blevet testet, men prototyperne virker robuste og meget lovende både ud fra en kvalitetsbetragtning og rent designmæssigt. Der foreligger CAD dokumentation på alle komponenter og materialebeskrivelser. Hver komponent er tillige udformet så den kan masseproduceres.

Det er ikke lykkedes at modne og integrere Piezokeramisk transformer i CoolLED pæren. Teknologien har vist sig at have store problemer med varmeudvikling og ydelse i det ønskede effektområde. Derfor er der i projektet brugt konventionel transformer, hvilket har haft indflydelse på det overordnede design, som er blevet større end ønsket. Ved kommerciel produktion er der i stedet peget på at anvende "Very High Frequency Switch Mode Power Supplies" (VHF SMPS), leveret af Nordic Power Converters, hvilket muliggør en mere kompakt løsning.

1.3 Resumé

Baggrund

AT Lighting havde forud for nærværende projekt udviklet et lyskilde koncept og taget patent på et køleemne der søgtes integreret i lyskilden. Konceptet lagde op til en helt ny måde at tænke optik på, og særligt samspillet mellem LED pæren og lampen pæren skal monteres i. Der blev foreskrevet brug af piezokeramisk transformer teknologi, der rent designmæssigt er en meget kompakt løsning, som vil muliggøre integration af elektronikken i fatningshuset på en E27 pære. Samtidigt vil denne teknologi have store fordele ift. EMI/EMC. Konceptet var udgangspunkt for projektet og lagde op til flere innovative tiltag i ét og samme produkt/projekt.

Overblik

Projektet har været et ambitiøst projekt som har undersøgt, afprøvet, udviklet og forsøgt at skubbe til flere teknologiområder indenfor det samlede produktsystem. Således har man kunne opdele projektet i forskellige kategorier, der har været mulige at udvikle i parallelle forløb. Hver kategori har været tilknyttet en eller flere af projektpartnerne som har udviklet med udgangspunkt i designbriefet der er udarbejdet og koordineret i fællesskab. Således har projektet været opdelt i mindre projektgrupper:

Mekanisk, design og køling

- AT Lighting
- Teknologisk Institut
- DTU fotonik

LED system og optik

- DTU Fotonik

Elektronik

- Noliac (selvstændig udvikling af Piezokeramisk transformer)
- C. B. Svendsen

Elektronik

ansvarlig: C.B. Svendsen

Gruppe: C.B. Svendsen, Noliac

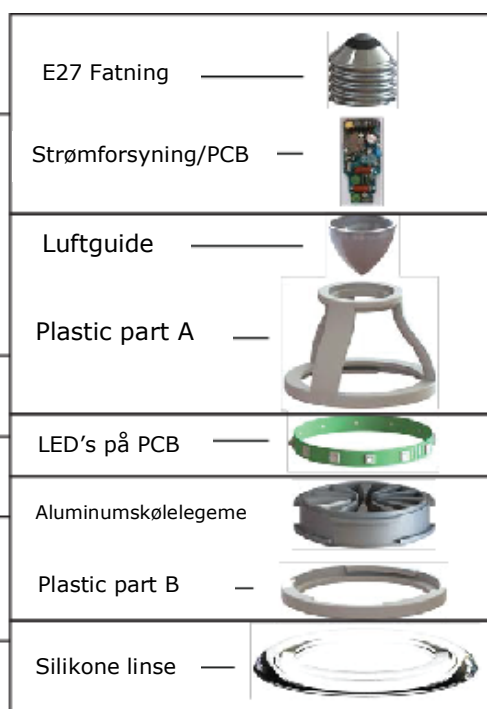
Mekanik og design

ansvarlig: Teknologisk Institut

Gruppe: Teknologisk Institut, AT Lighting

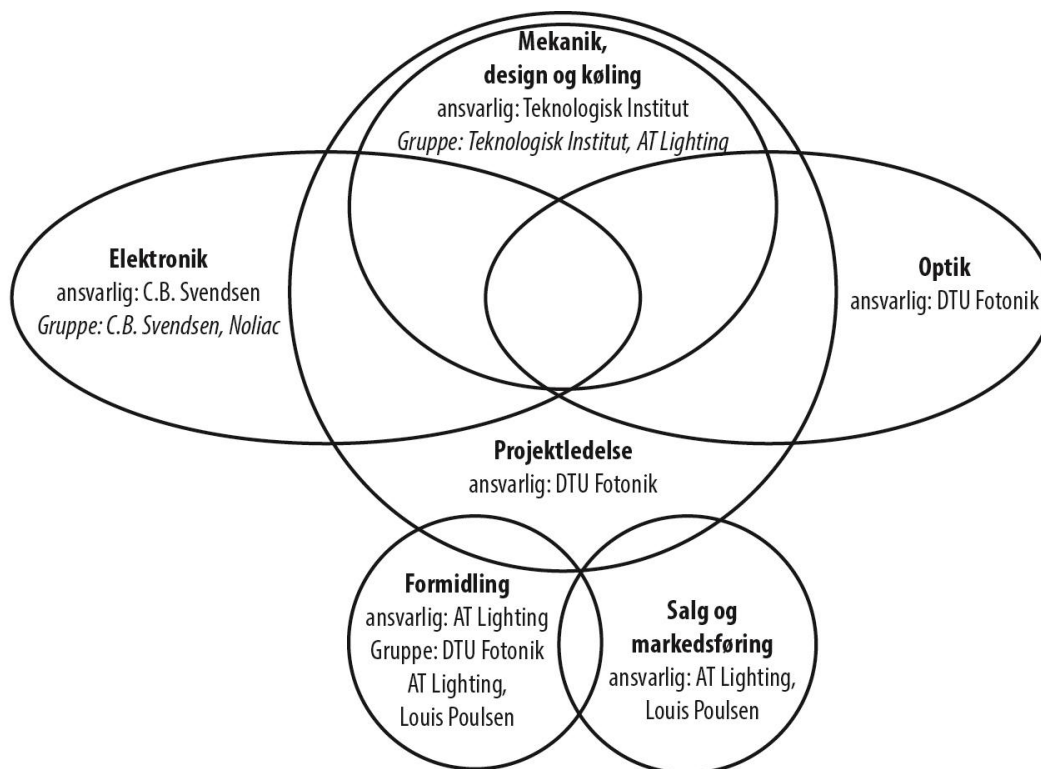
Optik

ansvarlig: DTU Fotonik



Teknologiområder og inddeling af undergrupper

Dertil kommer aktiviteterne formidling og kommercialisering hvor projektpartner Louis Poulsen har været tilknyttet. Den overordnede projektledelse har været udført af DTU Fotonik. De forskellige udviklingsområder og aktiviteter har således været inddelt iht. nedenstående diagram:



Forløb

Diagrammet viser at elektronik og optik har kørt forholdsvis selvstændige udviklingsforløb med udgangspunkt i en fælles systemforståelse. Hvorimod design og mekanik har været tættere koordineret og inkluderet sparring fra projektledelsen. Dette har været nødvendigt da konsekvenserne ved ændringer indenfor de respektive områder alle ville påvirke det overordnede design og den mekaniske konstruktion. Diagrammet viser også at formidling samt salgs- og markedsføringsaktiviteterne har været sideløbende aktiviteter, der ikke har haft direkte indflydelse på udviklingsarbejdet.

Vi står i dag med et innovativt retro-fit LED-baseret lyskildesystem, der har påvist markante forbedringer ift. alternative LED løsninger. Således har projektet opfyldt de tekniske målsætninger for effektivitet målt som lys ud af lampen per Watt. Ift., de i projektet indforskrevne lamper, har vi en lyskilde der rent designmæssigt kan skjules i armaturerne, og på den måde ikke skæmme som andre LED lyskilder gør. Dette er et vigtigt designmæssigt parameter for lampeproducent og projektpartner Louis Poulsen. Dog er der stadig behov for en tilpasning af det optiske design, eller helt udelade linsen, således at lyset fordelt i lamperne opleves mere homogent uden markante aftegninger i overgangene fra lys til mørke. Der er også opnået gode resultater på udvikling af køling til systemet. Varmeudviklingen, som er en af de store udfordringer med LED applikationer, er løst og målt til et meget tilfredsstillende niveau, hvor designet yderligere er klargjort til masseproduktion.



Foto: Seneste prototype vers. 4

Det er ikke lykkedes at modne og integrere piezokeramisk transformer til anvendelse i denne applikation, derfor er det elektriske system løst i prototyperne med brug af kendt teknologi og konventionel transformer. Det har medført en anderledes og større konstruktion end ønsket.

Der har, som det må forventes, været udfordringer der skulle løses indenfor hver af de respektive arbejdsopgaver. Projektgruppen har arbejdet godt og samstemmigt, således at projektets endelige resultat, på trods af diverse uforudsete udfordringer, er meget tæt på markedet. Der er udviklet og fremstillet 3 funktionsdygtige prototyper, én til hver af de tre lamper, der ligger til grund for måling og dokumenteret performance. Prototyperne tjener også andre formål i det videre arbejde efter projektets afslutning. Her kan peges på demonstration, formidling, salg og videre udvikling af andre produktvarianter samt optimering af eksisterende optik og/eller udvikling af fremstilling af afskærmning for dioderne uden optisk effekt.

Denne slutrapport er inddelt i forskellige afsnit som hver beskriver de mål, aktiviteter og resultater der er opnået indenfor de respektive områder. Der vil derfor forekomme overlap og gentagelser da nogle af arbejderne er tæt relaterede.

Arbejdsopgaverne i projektet har været beskrevet således:

- WP 1: Specifikation og uddybende beskrivelse af CoolLED og de tekniske komponenter heri
- WP 2: Optikudvikling
- WP 3: Optimering af kølesystemet
- WP 4: Transformerelektronikudvikling
- WP 5: Grov prototype
- WP 6: Optimering/fejlrretning
- WP 7: Prototypeserie
- WP 8: Fieldtest
- WP 9: Brugerundersøgelse og feedback
- WP 10: Markedsanalyse, markedsføring og kampagne
- WP 11: Rapportering

I praksis har vi haft yderligere en arbejdsopgave, som kunne have heddet "Design og konstruktion". Det skyldes at processen er forløbet med mange udviklingsloops med design, rapid prototyping, må-

ling, analyse, hvor det har været nødvendigt med løbende tilpasning af design og konstruktion. På den måde har arbejdsopakkerne 2, 3, 4, 5, 6 og 7 været parallelt løbende og meget overlappende.

FORSKNING OG UDVIKLING

De første tre iterationer af prototyper var uden integreret elektronik, da den piezokeramiske transformator ikke kunne udvikles og optimeres til formålet. Men ved at anvende ekstern laboratoriestrømforsyning, kunne vi måle på køle- og lysparametre i DTU Fotoniks laboratorium. Der var også lavet indledende forsøg hos C. B. Svendsen med varmemåling, hvor en funktionsmodel blev anbragt i en arkitektlampe, således pæren kunne testes under forhold hvor luftcirkulationen ikke er optimal. Fjerde og sidste iteration var en fuld funktionsdygtig prototype, baseret på konventionel transformertechnologi, med integreret elektronik og fatning. Denne kan skrues i en E27 fatning ved 220 V AC. Der blev fremstillet 5 stk., hvoraf to desværre måtte kasseres som defekte.

Anvendelse af konventionel transformator medførte at elektronikken ikke kunne gøres så kompakt som ønsket. Designet blev derfor tilpasset, men betyder at køling af dioderne får dårligere betingelser pga. forringet luft-flow gennem konstruktionen. Yderligere ændringer fra 3. til 4. iteration var også ændring af LED array fra 20 til 16 dioder. Ændringen skyldes to ting.

- En kostoptymering af pæren, da dioderne er de absolut dyreste komponenter i systemet, vil en reduktion fra 20 til 16 være lig en kostprisreduktion på mellem 15 og 20 % på hele produktet.
- Med 16 dioder kan køleemnet reducere antallet af lameller til 8 (2 dioder deler 1 lamel), hvilket gør køleemnet lettere at fremstille.

Yderligere bonus var at spændingen over dioderne falder til et niveau, hvor det vil være muligt med 16 dioder at komme under 50V, hvilket er vigtigt da man ellers skal overholde væsentligt strengere krav jf. DS/EN 62560. Det løste vi i de tidligere versioner ved at lave to parallelt løbende serier, men det er også en fordyrende løsning. Det skal dog siges seneste prototyper er fremstillet med 2 parallelle serier.

Men der var også ulemper ved at gå fra 20 til 16 dioder. Hvis man betragter det ud fra et lysteknisk synspunkt, vil færre dioder give mere markante skyggedannelser og mere synlige aftegninger af lyspunkterne – både på selve pæren, men også på de belyste lampeskærme som reflekterer lyset, og som i PH4½-3½'s tilfælde, transmitterer lyset gennem de opale glasskærme. Det er meget uhenigtsmæssigt, særligt i Louis Poulsens lamper hvor oplevelsen af lyset er meget vigtig. Og vi har yderligere målt markant højere temperaturudvikling på køleemnet ved 16 dioder kontra 20. Faktisk næsten 20 graders forskel, hvilket er uacceptabelt. Det kan diskuteres om det reducerede luft-flow, forårsaget af den større elektronik, alene er skyld i dette. Det er formentlig en kombination af begge forhold, men det skal undersøges og medbringes i fremadrettede overvejelser forbundet med produktionsmodning og kommercialisering.

Der er sidenhen kommet alternative dioder som er langt billigere, hvilket kan opveje den kostpris-mæssige ulempe ved at skifte til 20 dioder igen. AT Lighting tager efter projektet en beslutning om hvilke dioder der skal anvendes og hvor mange. Det optiske system er på den måde fleksibelt, da linserne er rotationssymmetriske og ikke følsomme overfor lyspunkternes indbyrdes spadsring.

For at lave den bedst mulige lysfordeling anbringer man en linse foran dioderne. Linsen er en ring der, som tidligere beskrevet, sidder rundt om dioderne, monteret på et puck-formet køleemne. I projektet er der arbejdet med forskellige linsedesigns baseret på forskellige principper. Af produktionstekniske og montagemæssige årsager, er det endelige design blevet rotationssymmetrisk. Der er fremstillet tre linser – én til hver af de tre PH lamper. CoolLED prototyperne er løbende blevet målt hhv. med og uden optik i integrerende kugle og nærfeltsgoniometer. Der er lavet sammenligninger ud fra reference lyskilder udpeget af Louis Poulsen, som værende de bedste alternativer til deres lamper.

Generelt

Generelt kan siges at projektgruppen har været harmonisk og de fornødne kompetencer har været til stede for at kunne løse opgaven. Dog har der været en række uforudsete udfordringer, som har forårsaget et halvt års forsinkelse af projektet, og yderligere aftunget prioritering af kapaciteten og ressourcerne. Der kan peges på 3 primære udfordringer:

Udskiftning af nøglemedarbejdere

I projektet har der været stor udskiftning af de tilknyttede medarbejdere/kontaktpersoner hos de respektive projektpartnere. Således har der været udskiftning hos Teknologisk Institut (1 medarbejder), C. B. Svendsen (2 medarbejdere), Noliac (2 medarbejdere) og DTU Fotonik (1 medarbejder). Udskiftningerne medførte naturligvis forsinkelser, da nye personer skal briefes og der skal ske en intern overlevering i virksomhederne.

Mislykket modning af PT komponent/teknologi

Noliac har forsøgt at presse og modne PT teknologien til det ønskede niveau. Men på trods af en ihærdig indsats lykkedes dette aldrig. Eftersom at den øvrige elektronikudvikling har været afhængig af at kende til kredsløbets komponenter, herunder PT komponenten, før en præcis design- og produktudvikling har kunnet finde sted, har dette forsinket projektet.

Fremstilling af linser

Grundet høj geometrisk kompleksitet i det udarbejdede linsedesign, har det være meget svært at få fremstillet de designede linser til prototyperne. Efter en stor indsats valgte vi at gå et skridt tilbage, og satse på et mere fremstillingsvenligt design som var rotationssymmetrisk, hvilket muliggjorde at prototypelinserne kunne drejes på en diamantdrejebænk. Også dette voldte problemer pga. ringe leverance fra fransk/kinesisk underleverandør. Det lykkedes til sidst at få fremstillet linser af høj kvalitet gennem en japansk underleverandør, men hele processen har medført uforudsete forsinkelser.

Eftersom den fuldt funktionsdygtige prototype først er blevet færdig meget sent ift. den skitserede tidsplan, har det har været svært (læs umuligt) at gennemføre de planlagte arbejdsplaner 8 og 9, hhv. "Fieldtest" og "Brugerundersøgelse og feedback". Fokus og højeste prioritet i projektet har været at få udviklet prototypen til et tilfredsstillende niveau, der kan bringes videre i et kommercielt perspektiv, og i stedet overlade arbejdsplaner 8 og 9 til AT Lighting, der efter projektets afslutning kan udføre disse i deres arbejde frem mod markedsintroduktion.

Jakob Tryde fra AT Lighting har under projektets forløb, sideløbende læst en MBA hos DTU Business, hvor CoolLED projektet har indgået som case story. Det har givet kvalificeret input og sparring på den udarbejdede forretningsplan, som i denne slutrapport ikke vil blive beskrevet i detaljer af hensyn til følsomme og fortrolige oplysninger.

1.4 Projekt mål

1.4.1 Projektets overordnede mål

Projektet havde til formål at udvikle og demonstrere en LED pære/system med udskiftelig optik dedikeret til 3 specifikke PH lamper fra Louis Poulsen. Udgangspunktet var CoolLED, AT Lightings innovative koncept for en LED baseret retro-fit pære, hvor en udskiftelig optik muliggør at samme platform/lysmotor, kan anvendes til at optimere lysets fordeling og oplevelse iht. den specifikke lampe den bliver monteret i. Pæren skulle optimere energiforbruget ud fra en betragtning om LOR (light output ratio - lys ud af lampen/W), og samtidigt levere et æstetisk smukt lys, der lever op til Louis Poulsen's krav). Og pæren skulle integrere ny piezo-keramisk transformerteknologi, der søgtes modnet gennem projektet, samt optimere køleemnets geometri, der effektivt håndterer varmeafledning fra dioderne. Det færdige resultat var på det tekniske og produktionsmæssige niveau målsat til at levere dokumentation til 0-serie, og funktionsdygtig fysisk prototype til demonstration. Samtidigt skulle produktet være designet med henblik på masseproduktion og kommercialisering.

I processen skulle der laves nyudviklinger og innovation indenfor flere af delkomponenterne. Således kan LED pæren deles op i forskellige dele/kategorier som hver især krævede en særlig indsats. De respektive kategorier var:

- Piezokeramisk transformer
 - o Mål: modning af teknologi til anvendelse i kompakte LED systemer
- LED system og optik
 - o Mål: design og udvikling af optisk system, herunder LED array, som markant forbedrer LOR (Light Output Ratio) i udvalgte lamper, baseret på det overordnede koncept. Samt leverer en æstetisk tilfredsstillende oplevelse af lyset i lamperne.
- Køling
 - o Mål: at produktmodne og integrere patenteret køleteknologi i CoolLED pæren, og dokumentere effekten heraf.
- Elektronik
 - o Design, udvikling og fremstilling af et kommercielt tilgængeligt kompakt kredsløb til integration i det skitserede design
- Mekanisk design
 - o Design, udvikling og dokumentation af en robust konstruktion, som muliggør masseproduktion samt let montage og samling.

Målsætningerne for hver af ovenstående kategorier er yderligere beskrevet og uddybet i de efterfølgende afsnit.

Yderligere var det målsat at projektet undersøgte markedet og udarbejdede forretningsplan for CoolLED produktet/produkterne samt forestod formidling af projektet til relevante interessenter, såvel private forbrugere som professionelle aktører.

1.4.2 Mål for udvikling af Piezo keramisk transformer (Noliac)

De traditionelle løsninger til retrofit LED-kilderne er baseret på switchede spolesystemer, der stiller store krav til skærmning for det magnetfelt, der induceres i omgivelser proportionalt med effekttransformationen. Jo større effekt man derved prøver at konvertere fra AC til DC i retrofitløsningerne, jo større bliver skærmningsudfordringen, hvilket giver nogle relativt store kredsløbsløsninger, der ikke kan være i en fatning. Ved at anvende piezokeramiske materialer til at ensrette strømmen med kommer der ikke noget magnetisk støj fra systemerne, hvilket gør, at disse kan reduceres i volumen og kan bringes til at passe i fatningen i en retro-fit LED løsning. Det danske firma Noliac er eksperter i piezoelektronik og vil i projektet udvikle en transformerløsning, der kan placeres i en E27 fatning. Mål for udvikling af PT komponent:

- Størrelsesmæssig integrerbar i en E27 fatning
- Optimere energioutput
- Minimere varmeudvikling
- Optimere ift. EMC/EMI
- Optimer montagevenlighed
- Forbered til mulig volumen produktion

1.4.3 Mål for udvikling af det optiske system

Målsætningen for udvikling af det optiske system til CoolLED pæren tog primært udgangspunkt i brief fra Louis Poulsen. Louis Poulsen har en meget kritisk holdning til lyset i deres lamper, da Louis Poulsens historie og brand bygger på æstetiske og designmæssige referencer, hvor effektivitet og energibesparelser ikke har højeste prioritet.

De summerede krav fra Louis Poulsen og overordnede mål til det optiske system og LED array var:

- Lysfordeling iht. godkendte diagrammer for de respektive lamper (visuel vurdering påkrævet)
- Ra-værdi minimum 80 (vil afhænge af den enkelte diodetype, hvorfor en visuel vurdering er nødvendig)

- Farvetemperatur 2700 - 3000K (højere skal vurderes visuelt)
- Effektivitet (LOR) > alternative LED pærer
- Levere tilsvarende eller mere lys (ud af lampen) end alternative LED pærer
- Design LED array
- Optimere design til produktion
- Optimere design til montage

1.4.4 Mål for udvikling af køling

Det er målsætningen at skabe passiv og kompakt køling der sikrer høj lysafgivelse og lang levetid af CoolLED pærens LED'er. Driftsikkerhed er prioriteret i arbejdet med at skabe en kvalitetslyskilde.

1.4.5 Mål for udvikling af elektronik

Målet for udvikling af elektronik hos CB Svendsen var:

- Udvikle, fremstille og implementere kompakt strømforsyning til CoolLED pæren.
- Ca. 10 W til dioderne
- Effekttab < 10%
- Optimer design til integration i E27 fatning
- Integrer dimming feature
- Overhold normer: EN55015
- Klargøring til mulig volumenproduktion
- Test af nye metoder for små formfaktorer inden for LED belysning.
- Test af nye grænser inden for størrelse samt antal komponenter i en LED strømforsyning.

1.4.6 Mål for udvikling af mekanisk design (AT Lighting – suppleret af Teknologisk Institut)

Det mekaniske design skal fungere optimalt i montage, styrke og æstetiske forhold. I produktionen skal det være optimeret til let og stærkt at klikke sammen til et endeligt produkt. Det skal have styrke til at bevare form, funktion og præcision af optik. Udseendet skal forstærke indtrykket af kvalitet og funktion.

Mål for udvikling af mekanisk design:

- Overhold gældende normer
- Optimeret ift. samling
- Optimeret ift. produktion
- Optimeret design og brugervenlighed

1.4.7 Mål for Formidling (AT Lighting – suppleret af DTU Fotonik)

Det er ønsket at CoolLED projektet kommunikeres bredt og fortæller hvordan der er arbejdet på at skabe ny og bedre teknologi til gavn for forbrugere og miljø. Der søges lavet formidling til professionelle interessenter, private forbrugere og til forsknings- og universitetsmiljøet. De respektive projektpartnere anvender deres respektive hjemmesider, nyhedsbreve og andre kommunikationskanaler samt direkte kontakt til mulige interessenter i deres netværk.

1.4.8 Mål for kommerialisering (AT Lighting)

At modne CoolLED til et nært produktionsmodent niveau, hvor det virker realistisk og mindre omkostningstungt at realisere opstart af produktion og implementere CoolLED pæren på markedet. Det ønskede udviklingsstadium vil desuden gøre det lettere at tiltrække investorer. Projektet skal fastholde den konceptuelle opbygning som muliggør brug af modulets kerne til andre lys områder.

AT Lighting søger at finde den/de rette samarbejdspartner(e) til at modne og producere CoolLED pæren. Teknologien er bakket op af global patentering, der sammen med CoolLED projektets resultat danner et stærkt grundlag.

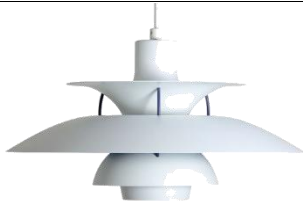


Målet er at skabe en platform hvorfra CoolLED pæren kan markedsføres og sælges til ejere af klassiske lamper med særlige lys-behov. Efterfølgende udvides der med nye applikationer for at øge modulet udbredelse.

1.5 Projekt resultater og formidling af resultaterne

1.5.1 Generelt

Projektet har udviklet 3 fuldt funktionsdygtige prototyper, som er testet og demonstreret i de udvalgte PH-lamper. PH5, PH4½-3½ og Koglen Ø48. Projektets oprindelige koncept var at påvise hvorledes man ved dedikeret optik, kan optimere lysudbyttet af lampen ift. energiforbruget. De udviklede linser har dokumenteret markante forbedringer ift. LOR på hver af de 3 lamper. Således har vi i PH5 lampen præsteret en forbedring på 41 %, i PH4½-3½ lampen har vi opnået en forbedring på 33 %, og i Koglen en forbedring på 19 %, alle sammenlignet med bedste alternativer på Louis Poulsen' positivliste over egnede lyskilder til de respektive lamper. Den æstetiske oplevelse af lyset i lamperne PH4½-3½ og PH5, blev med de udviklede prototyper, ikke vurderet tilfredsstillende af Louis Poulsen, grundet meget skarpe lys- og skyggeaftegninger på lampeskærmene. Det skyldes det meget præcise optiske design af linserne, der ikke var lykkedes med at udbløde overgangene i lyset. Derfor blev der afslutningsvist udført målinger af prototypepærerne monteret i de respektive lamper, men uden linser. Resultaterne var opsigtsvækkende:

Oplevelsen af lyset var markant forbedret og nærmest usammenligneligt med tidligere versioner med monterede linser. Lyset fordeler sig naturligt i lamperne og tilføjer tilmed den feature, at lyskilden er gemt i lampen (PH5 og PH4½-3½). De lystekniske resultater på effektiviteten (LOR – Light Output Ratio – Lys ud af lampen pr. W), var i to af lamperne næsten uændret og i den tredje markant forbedret sammenlignet med målinger med linser. Med kalkuleret lystab på 10% i alternativ afskærmning (uden optisk effekt) for dioderne, har vi således påvist forbedringer på:

	LOR med bedste alternativ		LOR med CoolLED	Relativ forbedring
	36,5 %	➔	51,5 %	42,6 %
	36,4 %	➔	69,7 %	91,4 %
	19.8 %	➔	24.4 %	23.2 %

Mht. optimering af køleemnet har vi opnået stabil driftstemperatur på 75 gr. C. ved rumtemperatur på 25 gr. C. Dette betragtes som acceptabelt. Resultatet er opnået ved brug af ca. 38 gr. Aluminium

svarende til 3,5 g. pr. W brugt i hele systemet/pæren. Gængse LED retro-fit pærer anvender typisk ca. 7-8 gr. pr. W., hvilket er en optimering på mere end 100%.

Det er ikke lykkedes at modne og integrere Piezokeramisk transformer i CoolLED pæren. Teknologien har vist sig at have store problemer med varmeudvikling og ydelse i det ønskede effektområde. Derfor er der i projektet brugt konventionel transformer, hvilket har haft indflydelse på det overordnede design, som er blevet større end ønsket. Ved kommerciel produktion er der i stedet peget på at anvende "Very High Frequency Switch Mode Power Supplies" (VHF SMPS), leveret af Nordic Power Converters, hvilket muliggør en mere kompakt løsning.

Noliac har vist stort engagement og vilje i projektet, da de, ud fra et strategisk grundlag, har valgt at satse på modning af deres piezokeramiske transformer teknologi til anvendelse i kompakte LED applikationer. Derfor har Noliac ydet betragteligt mere end hvad de har været forpligtiget til, og hvad projektbevillingen har kunnet dække.

1.5.2 Piezo keramisk transformer

Aktiviteter

Da CoolLED startede var det Noliac A/S præmis at konstruere en SST enhed der balancerede sammenspillet mellem applikation (LED pære) og piezo teknikens muligheder, som Noliac har unikt kendskab til. For at løse denne opgave er der gennem projektet lavet forskellige forslag til hvad Piezotransformeren (PT) skulle levere. Nogle af de mere udfordrende behov vi har stødt på, har været den spænding som skulle forsyne dioderne. Specielt var det ønsket at komme tæt på 50V for at kunne bruge nogle egnede LED' s.

Heraf blev der arbejdet med to forskellige spændinger én omkring 18V hvor en speciel elektroniks strømforsynings topologi kunne bruges og en anden variant hvor der måtte bruges en anden type PT for at få fuldt udbytte af SST teknologien. Dog var to ting klart, der skulle leveres 10W ved høj effektivitet og elektronik & transformer kom til at arbejde ved høje temperature idet elektronikken er kompakt placeret i en E27 sokkel hvor det er svært at komme af med varmen til omgivelserne. Ved en effektivitet på 90% være 1W kontinuerligt varme fra elektronikken der skulle håndteres.

Heraf er der lavet nogle PT' ere med lavere udgangsspænding og nogle versioner med højere udgangs spændinger for at akkommodere de forskellige designs og udfordringer gennem projektets udvikling.

Design og udviklingsprocessen indenfor Noliac' teknologiområde er desværre langsom, da fremstilling af fysiske prototyper er nødvendig for at validere deres simuleringer og designs. Selve fremstillingsprocessen er meget tidskrævende, og skal indpasses med øvrige produktionsbatches, hvorfor hver udviklings-iteration kan tage lang tid og er meget ressourcekrævende. Desuden har Noliac også været ramt af en fejl i produktionen, som har forårsaget et helt batch måtte kasseres.

Af hensyn til Noliac' store engagement og den store potentielle teknologiske gevinst, har projektet givet plads og tid til at Noliac har kunne presse og modne teknologien til det ønskede niveau. Men på trods af en ihærdig indsats lykkedes dette aldrig. Eftersom at den øvrige elektronikudvikling har været afhængig af at kende til kredsløbets komponenter, herunder PT komponenten, før en præcis design- og produktudvikling har kunnet finde sted, har dette forsinket projektet.

Tekniske resultater

Største udfordring for udviklingen af den piezoelektrisk transformer har været varmeudvikling hvilket ikke er hensigtsmæssigt i den aktuelle anvendelse. Det skyldes at den aktuelle anvendelse presser teknologien til grænsen af den ønskede effekt, størrelse samt varmeudviklingen. Piezoelektriske transformere arbejder mere komfortabel ved lavere effekter, til gengæld kan de arbejde ved høje temperature. Der er udarbejdet en separat teknisk rapport, der er vedlagt som bilag til denne slutrapport.

Kommercielle resultater

Vi har i den seneste periode oplevet interesse fra kunder om udviklingen af strømforsyninger som kan anvendes ved højere temperatur og senest har vi demonstreret funktionsduelighed op til 210°C. Noliac har valgt at flytte udviklingen af piezo transformatorer til Noliac System som ligger i Prag, da No-

liac System i forvejen har elektronik kompetencer, de udviklinger og fremstiller allerede forskellige strømforsyninger til piezo komponenter

Forventninger fremadrettet ift. projektet/produktet

Der er en forventning om at der vil komme flere kundeprojekter, men enhver ny teknologi kan være besværlig og tage lang tid at få ind på markedet.

1.5.3 Det optiske system

Aktiviteter

Før målsætningen for udvikling af det optiske system kunne fastlægges var det nødvendigt at gøre grundige undersøgelser og overvejelser omkring en lang række forhold. Først og fremmest var det afgørende at Louis Poulsen, som er producent af lamperne som pærerne skal anvendes i, kan godkende og anbefale de udviklede løsninger, rent lysteknisk. Deres succeskriterier ift. valg af lyskilde til deres lamper, beror ikke alene på effektivitet, Ra-værdi og farvetemperatur, men i ligeså høj grad – hvis ikke højere – at lyset giver en smuk æstetisk oplevelse af lampen, og understøtter designet og tankerne som designeren oprindeligt har gjort sig. Derfor har der indledningsvist været en tæt dialog med Hans-Erik Wolff og Lisbeth Mansfeldt fra Louis Poulsen omkring hvilke værdier og succeskriterier de sætter først i kvalitetsvurdering af lyskilder til deres lamper, og helt specifikt hvordan lyset optimalt skal fordeles i de respektive lamper; PH4½-3½, PH5 og Koglen (Ø48). Der blev lavet beskrivelser af hvordan de enkelte skærme ønskes oplyst ift. bløde overgange mellem lys og skygge, oplysning af kanter og det opale glas i PH4½-3½.

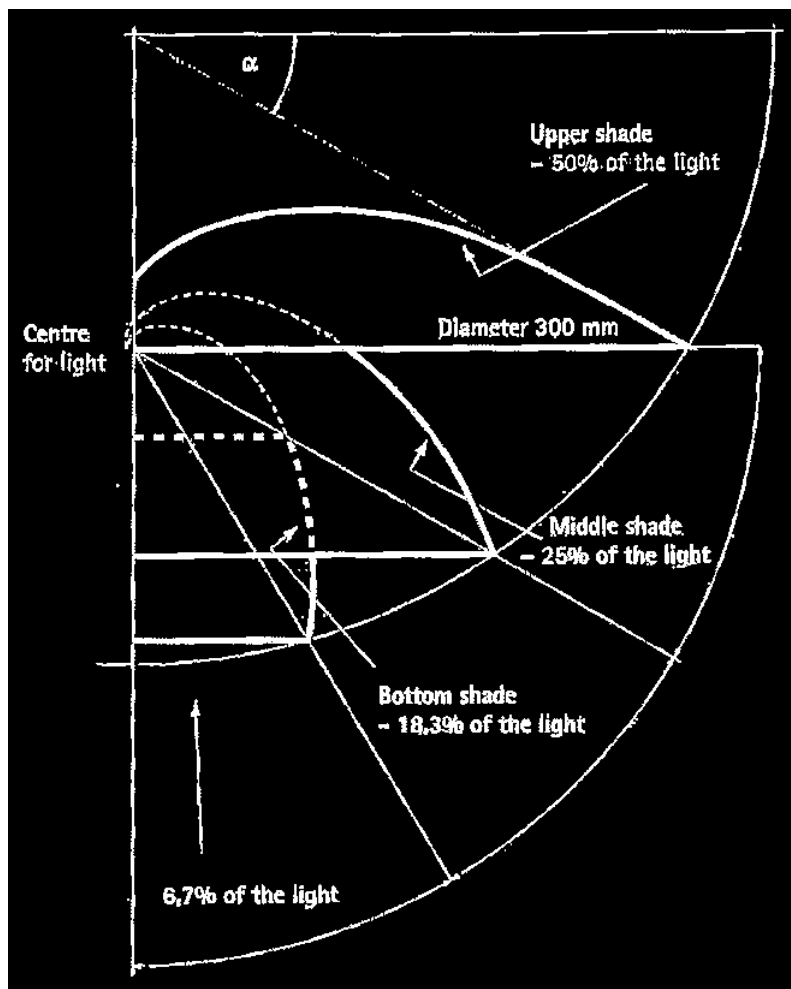


Illustration Poul Henningsen, optimal lysfordeling

Efter dialogen med Louis Poulsen, skulle de designmæssige forudsætninger for CoolLED pæren undersøges og analyseres. Konceptet fra AT Lighting lagde op til et diode-bånd som sad rundt om et "puck-formet" centrert køleemne. Dette princip for designet og konstruktionen er et af de bærende elementer i systemet, så der er ikke overvejet andre former for designkoncepter for LED arrayet.

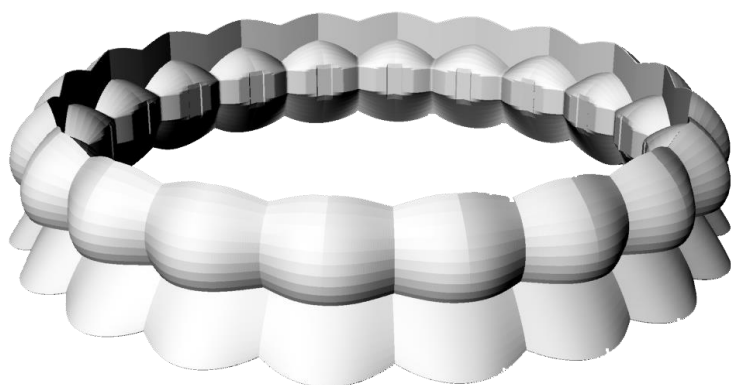
Referencer til sammenligning

Louis Poulsen har udarbejdet en positivliste de anvender til vejledning af hvilke lyskilder der er egnede til deres respektive lamper. Projektet har taget udgangspunkt i at sammenligne projektets resultater med lyskilder fra denne positivliste, da det antages at være de bedste alternativer. Der er udvalgt LED pærer fra listen, hvor det var muligt. Alle referencepærer er blevet målt hhv. isoleret lyskilde i integrerende kugle og monteret i lampe i nærfeltsgoniometer. Der er desuden taget luminansfotos af lamperne med referencepærene monteret i, så vi kan vurdere lysfordeling i lamperne, da det er et vigtigt parameter for Louis Poulsen, og afgørende for om de vil anbefale en given lyskilde til specifikke lamper.

Design af linser

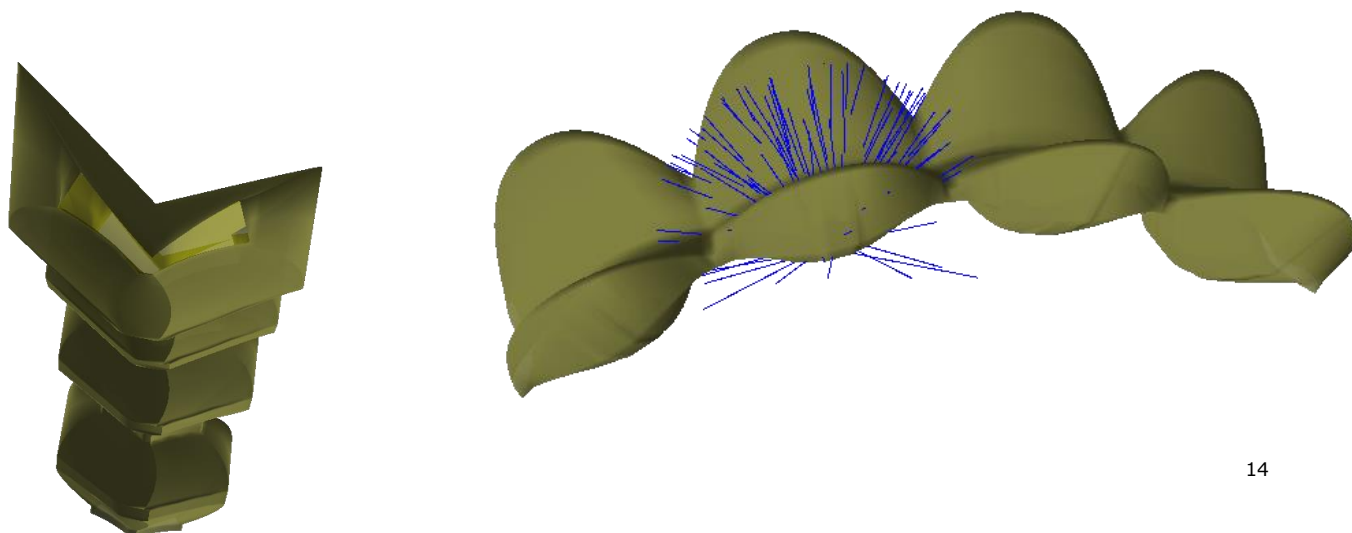
Indledningsvist skal det siges, at der i udvikling af linser til CoolLED tages udgangspunkt i et helt nyt lyskoncept, hvor dioderne sidder rundt om en cylinder og lyser horisontalt ud i 360 gr. rundt om cylinderens akse. Lysfordelingen ønskedes styret med en linse udformet som en ring rundt om dioderne. Denne type linse er ikke set før (projektgruppen bekendt), hvorfor gængs software til linsedesign ikke har været oplagt at anvende. Derfor har vi i projektet anvendt nyudviklet software i stand til at udføre "reversed engineering", hvor det er muligt at designe optik på baggrund af specifikation af ønskede værdier kombineret med designmæssige begrænsninger. Det er i sig selv en optimering af designprocessen, hvor arbejdet nu består i at beskrive og validere de data der bliver fødet ind i programmet.

De først udviklede geometrier til linserne var meget komplekse og baseret på et koncept, hvor hver enkel diode har en linse. Forstået på den måde; at vi havde 20 dioder siddende i et bånd rundt om køleemnet, og linsen/ringen var udformet med tilsvarende 20 linsegeometrier. Se eksempel nedenfor.

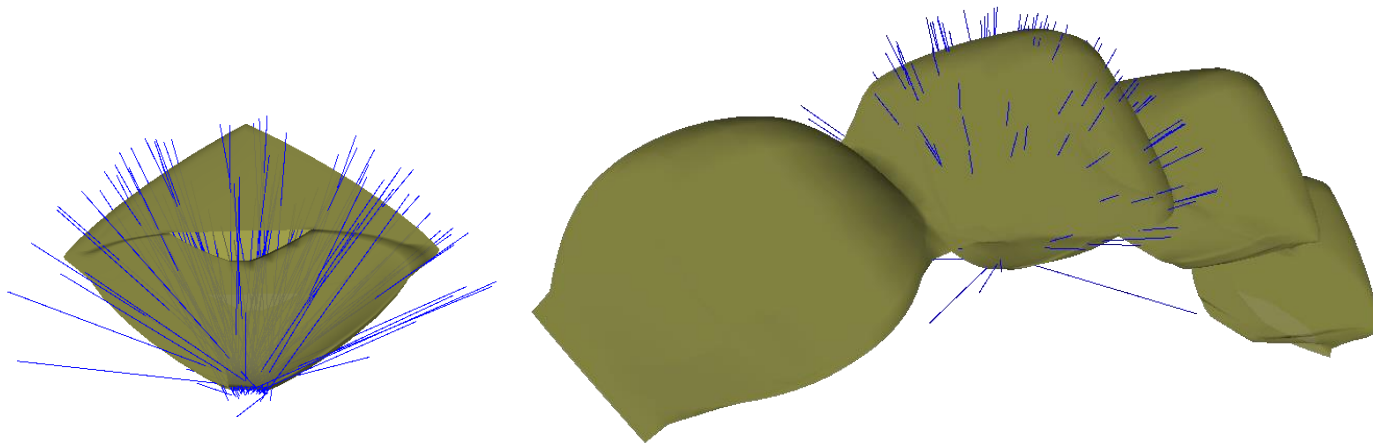


Design af linse til PH5 lampen

Linsen ovenfor blev en hybrid mellem to geometrityper med hver deres egenskaber. Nedenfor ses "kattelinsen".



Linsen nedenfor kaldte vi skildpadde-linsen. Kattelinsen og skildpaddelinsen er begge navngivet pga. deres form.



Katte-linsen er effektiv til at lyse direkte op og ned langs den vertikale akse. Og skildpadde-linsen er effektiv til at lyse ud i skæve vinkler mellem ± 30 - 60 grader fra den vertikale akse. Kombinationen af de to viste sig at være egnet til både PH5 og PH4½-3½ lampen, hvor der ønskedes mest nedadrettet og sidevers lys.

Designet var ekstremt geometrisk komplekst. Det medførte at den efterfølgende fase, hvor vi søgte at få linsen fremstillet, blev langtrukket, da vi i lang tid ikke var i stand til at finde nogen ekstern underleverandør som ville påtage sig opgaven og det medfølgende ansvar. Dog lykkedes det, i samarbejde med Kuhn, en dansk underleverandør, men omkostningerne for støbeværktøjer blev estimeret til at starte et sted mellem 5-600.000 DKK, og altså alt for store ift. projektbudgettet og formentlig også ift. markedsvurdering og det potentielle volumen. Derfor blev der besluttet at lave en fremstillingsvenlig linse til prototyperne ud fra et rotationssymmetrisk design. Den umiddelbare vurdering, baseret på forsøg med simulering, viste kun en mindre aftaget effekt ift. de geometrisk komplekse og produktionsmæssige meget omkostningstunge linser. Således kunne de nye prototypelinser drejes på specielle diamantdrejebænke. Første prototyper blev fremstillet af en fransk/kinesisk underleverandør der desværre skuffede fælt ved at levere stort set ubrugelige linser. Linserne var mattede og ikke i nærheden af de beskrevne tolerancer for ruhed. Derfor måtte de poleres efterfølgende på et dansk værksted.

Efterfølgende viste målingerne store afvigelser sammenlignet med det simulerede. Afvigelserne gav sig både til udtryk ift. uønsket asymmetri i lysfordelingen samt afvigende udstrålingsprofiler.

Vi kunne i alt pege på følgende fejlkilder:

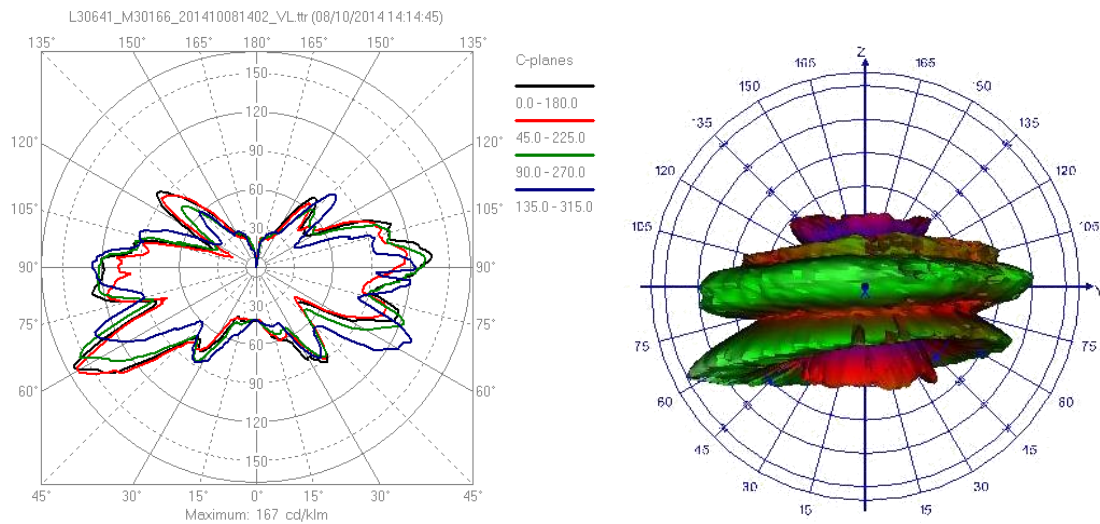
- Unøjagtig placering af linsen ift. dioderne
- Unøjagtig montage af dioderne på køleemnet, hvilket medfører unøjagtig placering ift. linsen
- Unøjagtighed i linsen
- Unøjagtig simulering

Der blev arbejdet på undersøgelse og forbedring af alle ovenstående punkter med undtagelse af det sidste.

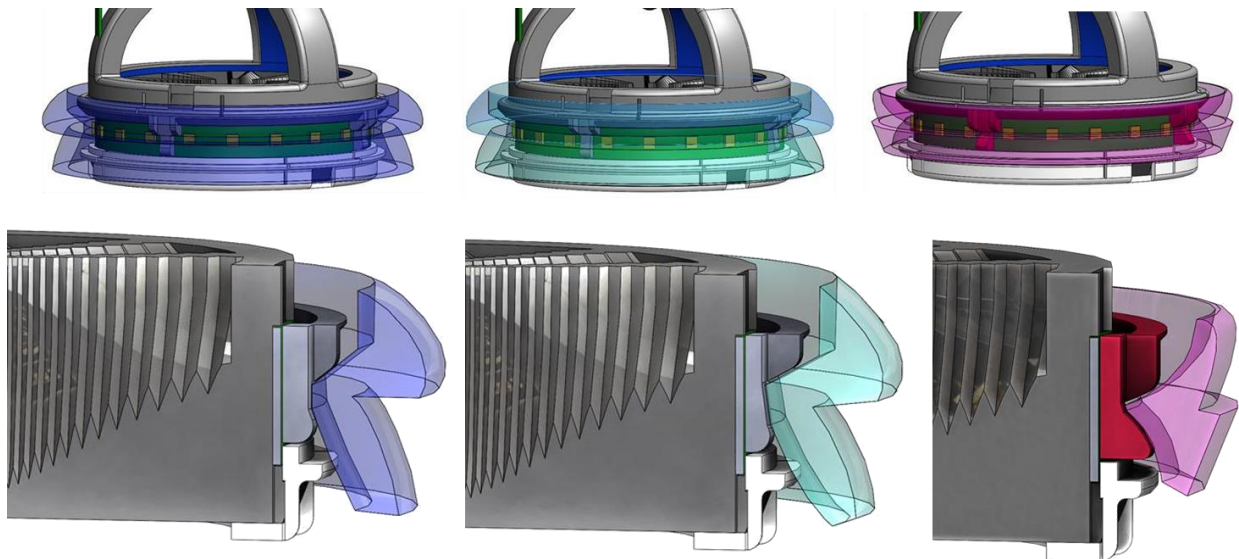
En unøjagtig placering kan forekomme på forskellig vis:

- Linsen sidder for højt ift. dioderne
- Linsen sidder for lavt ift. dioderne
- Linsen sidder skævt/tiltet ift. dioderne
- Linsen sidder ikke centreret omkring den vertikale akse

Vi har haft svært ved at identificere én af de ovenstående som den primære problematik. Det skyldes bl.a. at linsen har siddet med en lille smule slør, hvorfor den har kunnet rykke sig fra gang til gang. Men vi formoder det er en kombination af dem alle. Dog antager vi at linsen har siddet skævt/tiltet ved de målinger som påviser en asymmetrisk udstråling som vist nedenfor.



De tre linser har hver haft en dedikeret adapterring som skal bruges til montage på pæren. Se princip nedenfor:



Adapteringene har igennem projektet løbende undergået forbedringer. Der har været 4-5 udviklingsiterationer, hvor der er eksperimenteret både med materialitet og udformning. Sidste iteration vurderes til at virke tilfredsstillende, men ikke optimal ift. let montage. Og der er fortsat nogen usikkerhed omkring præcisionen på montagen af dioderne, som dog skyldes manuel montage uden brug af hjælpværktøjer. Dette problem ses ikke at være betydningsfuldt i forbindelse med industriel produktion.



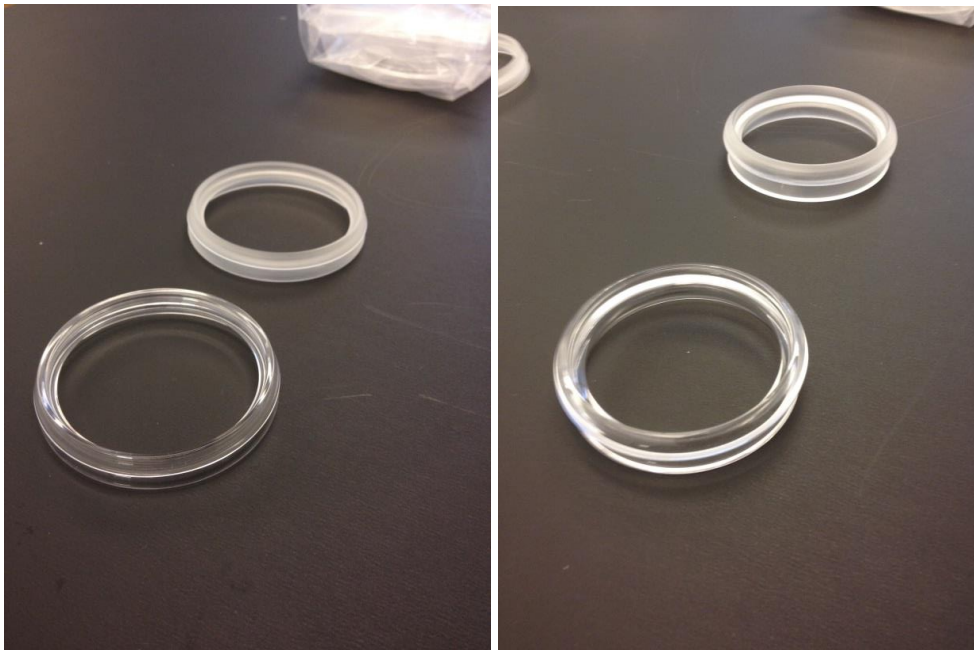
Eksempler på adapterringe udført i SLS



Seneste version (vers. 4) kølemner med manuelt monteret PCB

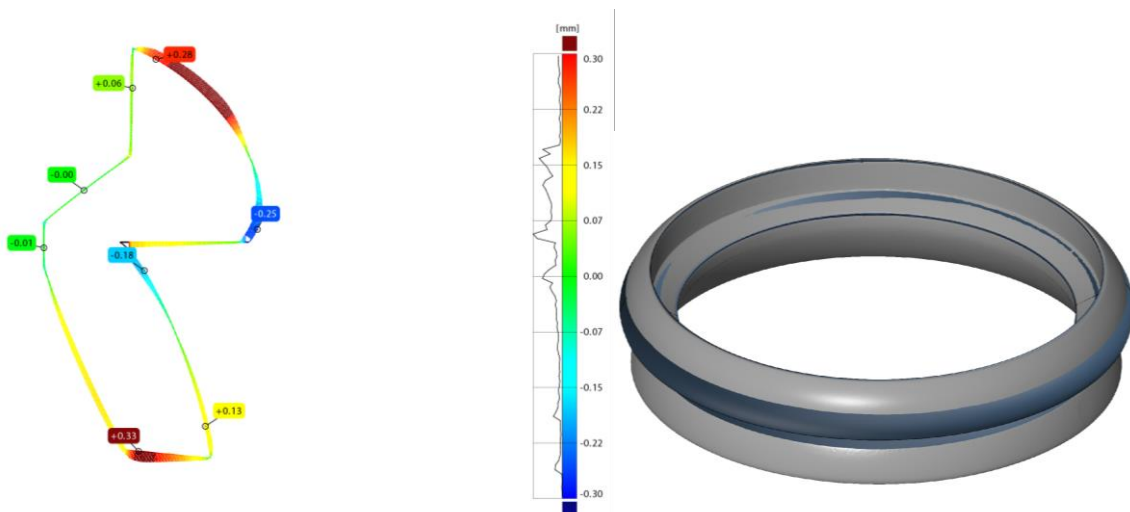
Den unøjagtige placering af linsen og montage af dioderne kan altså være årsag til asymmetrisk lysfordeling. Og selv små forskydninger mellem dioder og linse kan have store optiske konsekvenser, da lyspunktet/dioden er meget lille og linsens geometri meget præcis ift. diodens placering.

Den tidligere nævnte polering af linserne medførte også unøjagtighed, da der i selve poleringsprocessen bliver fjernet materiale af emnet, hvorfor formen ændrer sig.



Billederne viser forskellen på de fremstillede prototypelinser fra den fransk/kinesiske underleverandør hhv. før og efter efterbearbejdning/polering. Til venstre linse til Koglen, til højre linse til PH5.

For at undersøge linsernes geometriske afvigelser, blev disse sendt til ekstern samarbejdspartner, der foretog scanning og 3D dokumentation af prototypelinserne, som vi kunne sammenligne og analysere ift. designet. Billederne nedenfor viser afvigelser på én af de tre linser.



Tv.: Snit der viser positive og negative afvigelser mellem fysisk prototype og det oprindelige design

Th.: Blå områder viser positive afvigelser mellem fysisk prototype og det oprindelige design

De håndpolerede linser vil pga. en højere ruhed desuden transmittere mindre lys, hvorfor vi følte behov for at få udarbejdet et nyt sæt linser af højere kvalitet. Dette blev gjort af en japansk underleverandør. De nye linser levede op til de foreskrevne tolerancekrav og blev godkendt. Linserne indgår i vers. 4 som er den sidst udviklede og den de lystekniske projektresultater baseres på.

Senere i forløbet erfarer vi at målingerne var meget følsomme over lyskildens placering i lamperne. Lamperne er i sig selv ikke perfekte og lige, så det kan vise sig umuligt at anbringe lyskilden præcist som foreskrevet, hvilket er sårbart ift. den meget skarpe og præcise lysfordeling fra CoolLED pæren.

Der er løbende i projektet foretaget lysmålinger på komponent, lyskilde og system niveau. Yderligere er der i forbindelse med lysmålingerne udført varmemåling af driftstemperatur på køleemnet med brug af temperaturprobe og termokamera.

Det har været nødvendigt at modificere PH4½-3½ lampen, for at kunne måle på den. Det er en standardlampe, som ikke var muligt at montere direkte i nærfeltsgoniometeret.

Tekniske resultater

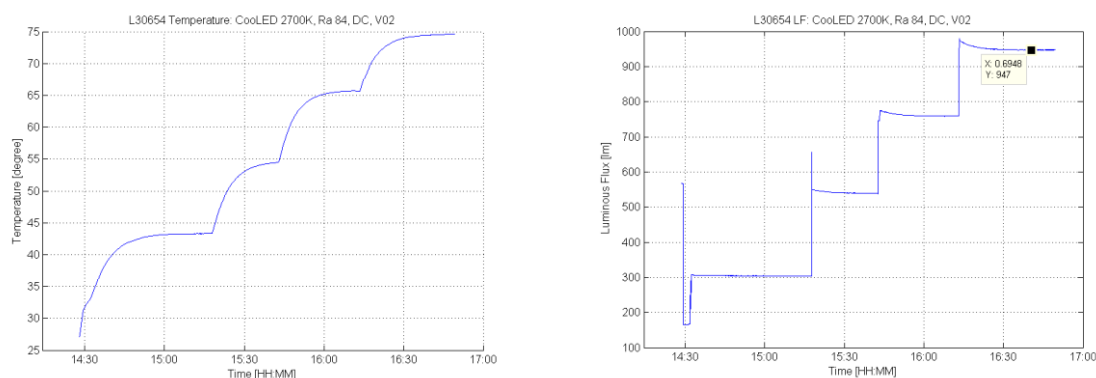
De forskellige optiske systemer, eksisterende lamper og skærme, såvel som løsningerne udviklet i projektet, blev testet i DTU Fotoniks state-of-the-art lys målelaboratorie. Denne nærhed mellem udvikling og test faciliteter er en kæmpe fordel når vi som her ønsker hurtige udviklingsiterationer. Dette betød f.eks. at sammenligningen af de opnåede resultater kunne foretages umiddelbart efter målingerne og de problemer med mekaniske og optiske tolerancer kan evalueres.

DTU Fotoniks lys målelaboratorie har integrerende kugle faciliteter til måling af total udstråling fra en lyskilde og disse er benyttet til undersøgelse af CoolLED lyskildens totale lysstrøm, effektivitet og tab i de producerede linser. Under disse målinger måles samtidig temperaturen på et valgt punkt CoolLED lyskildens kølestruktur. De to CoolLED var monteret uden AC driver og de kunne styres med en konstant strøm. Målingerne er foretaget som funktion af strømmen og resultaterne viser hvorledes lysstrømmen og temperaturen øges når strømmen øges.



Fotos af de to CoolLED lyskilder som er blevet undersøgt for effektivitet og varmeudvikling på kølestrukturen.

Figuren herunder viser resultaterne af denne måling og måleværdierne er samlet i tabellen herunder.



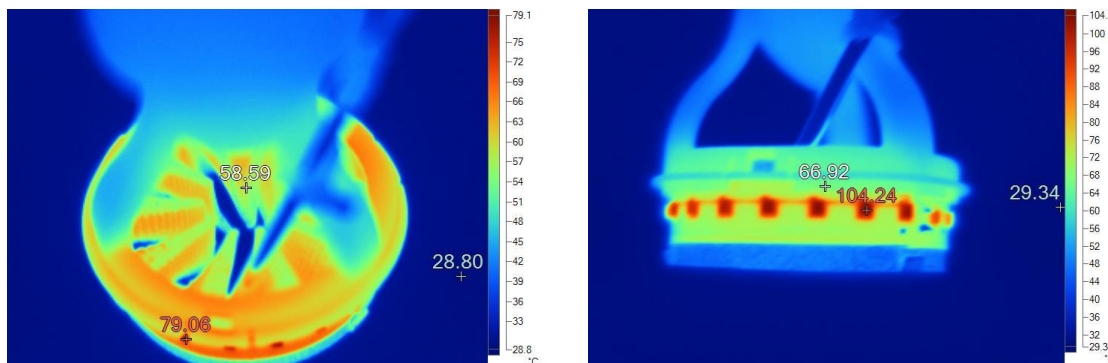
Graferne viser den målte temperatur (tv) og den totale lysstrøm (th) som funktion af tid for en CoolLED lyskilde hvor strømmen øges i fire trin fra 50 mA til 200 mA.

Tabellen viser måleresultaterne for en CoolLED lyskilde der drives med fire forskellige konstante strømme. For disse er angivet målt spænding, effekt, lysstrøm, effektivitet, farvetemperatur, temperatur på køleprofilen, lysstrøm med linse, lystab i linsen, effektivitet med linse installeret.

I	U	P	Φ	η	CCT	T	Φ_{lens}	lens loss	η_{lens}
[mA]	[V]	[W]	[lm]	[lm/W]	[K]	[°C]	[lm]	[%]	[lm/W]
53,5	52,6	2,8	304	108	2669	43	260	14	92
99,6	53	5,3	540	102	2684	54,5	486	10	92
148	52,8	7,8	760	99	2699	65,5	701	9	90
197	52,6	10,4	948	94	2715	74,5	888	9	86

Resultaterne viser at vi ved 200 mA opnår den ønskede effekt på ca. 10 W. Lysstrømmen her er 948 lm som svarer til en effektivitet på 94 lm/W. Målingerne viser tabet i linsen som er omkring 10 % og effektiviteten med linsen er således 86 lm/W. Det ses at effektiviteten er højere ved lave strømme, hvilket er en af grundene til at benytte mange LEDer ved en lav strøm. Målingen er foretaget ved lave strømme først for at sikre ikke at overbelaste LEDerne. Det ses at for alle strøm indstillingerne øges temperaturen gradvist indtil et stabilt niveau opnås, og tilsvarende reduceres lysstrømmen til et stabilt niveau. Det er disse værdier der er vist for temperatur og lysstrøm. Det ses at temperaturen på køleprofilen for den højeste belastning er 75 °C, hvilket er et meget godt resultat for køleprofilen.

Der er i denne forbindelse udført temperaturmålinger med termokamera for bedre at kunne se varmefordelingen over hele CoolLED lyskilden. To sådanne billeder er vist herunder som viser at selve LED chippen er ca. 30 grader varmere end køleprofilen.

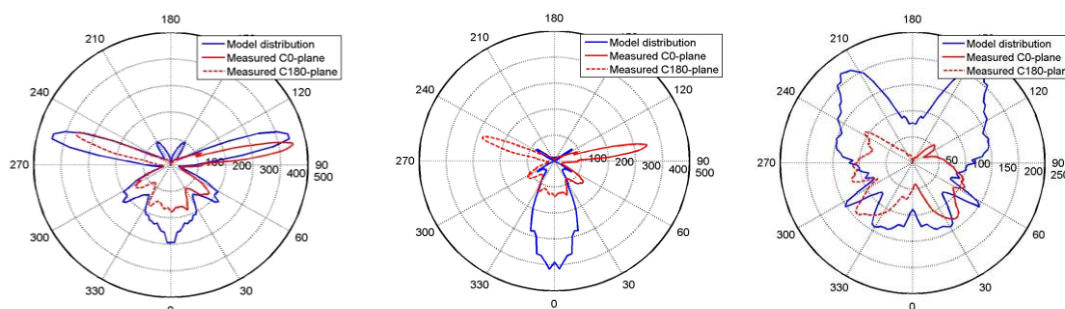


Termokamera målinger af temperatur fordelingen over hele CoolLED lyskilden.

I version 4 af CoolLED lyskilden blev køleprofilen ændret i antal af lameller fra 10 til 8 og udformningen blev også ændret. Ved de lystekniske målinger på version 4 blev målt en temperatur på ca. 90 °C, hvilket er for højt og LED chips vil have en højere temperatur tæt på maksimal chip temperatur. Det var også influeret af at den benyttede driver fyldte mere og der var mindre plads til luftstrømning igennem køleprofilen. Resultaterne vist herover er for 10 lameller hvorfor det anbefales at der i fremtidig produktion gås tilbage til minimum 10 lameller. Af lystekniske hensyn vil det også give fin mening at få flere dioder, da det vil udviske skyggedannelser og aftegninger.

Målingerne herover er foretaget med et spektroradiometer som detektor hvilket samtig med lysstrøm også giver alle den kolorimetriske parametre som korreleret farvetemperatur og farvegengivelse i form af Ra-indeks. For denne lyskilde er farvetemperaturen 2700 K, lidt varierende med strømmen, og Ra-indeks >80.

Linserne til CoolLED lyskilden er designet til at sende lyset ud i de rigtige retninger og en måling af lysfordelingen fra CoolLED lyskilderne med de forskellige linsetyper er nødvendig for at kunne vurdere om vi har opnået den ønskede fordeling.

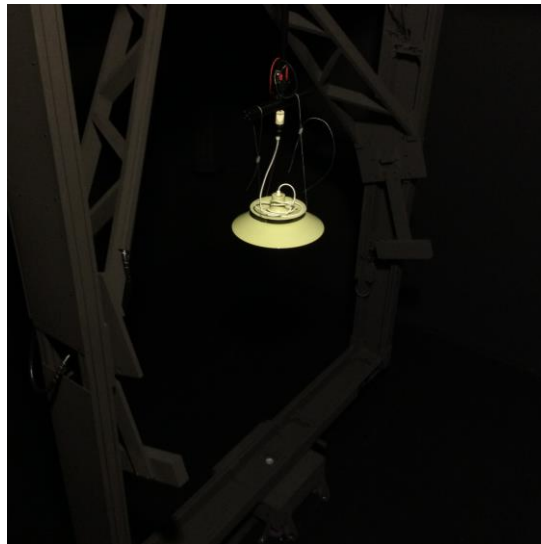
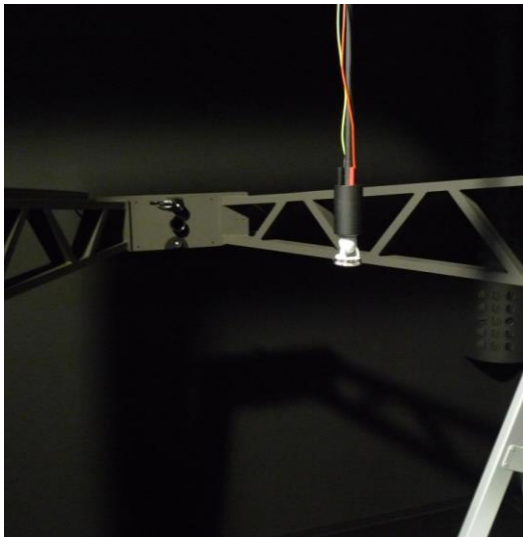


Sammenligning af målt og designet lysfordeling fra CoolLED lyskilden med de forskellige linser; PH5 (tv), PH4½-3½ (midten) og koglen (th).

På graferne herover ses det at der er en god overensstemmelse imellem designet og målt lysfordeling for CoolLED lyskilden med optik til PH5 lampen. Afvigelserne er lidt større for PH4½-3½ lampen og koglen. Men målingerne viser overensstemmelse på hovedretningerne af lysfordelingerne.

Der er lavet lysfordelingsmålinger af de tre lamper/armaturer med de forskellige lyskilder, reference lyskilder som LP anbefaler og de nye CoolLED lyskilder. Målingerne af lyskilderne og derefter af lampen med indsat lyskilde giver en relativ måling af lampens LOR for den specifikke lyskilde. LOR beregnes som forholdet imellem lysstønnen målt på lampen med indsat lyskilde og lysstrømmen målt fra lyskilden alene.

Disse lysfordelings målinger er udført i DTU Fotoniks nær felts goniofotometer som benytter hhv. et fotometer og et kamera til at måle lysintensitets fordelingen af en lyskilde, lampe eller armatur som kan være op til 2m i største dimension.



Fotos fra opsætning af hhv CoolLED lyskilde (tv) og PH5 lampe (th) med lyskilde i DTU Fotoniks nærfelts goniofotometer.

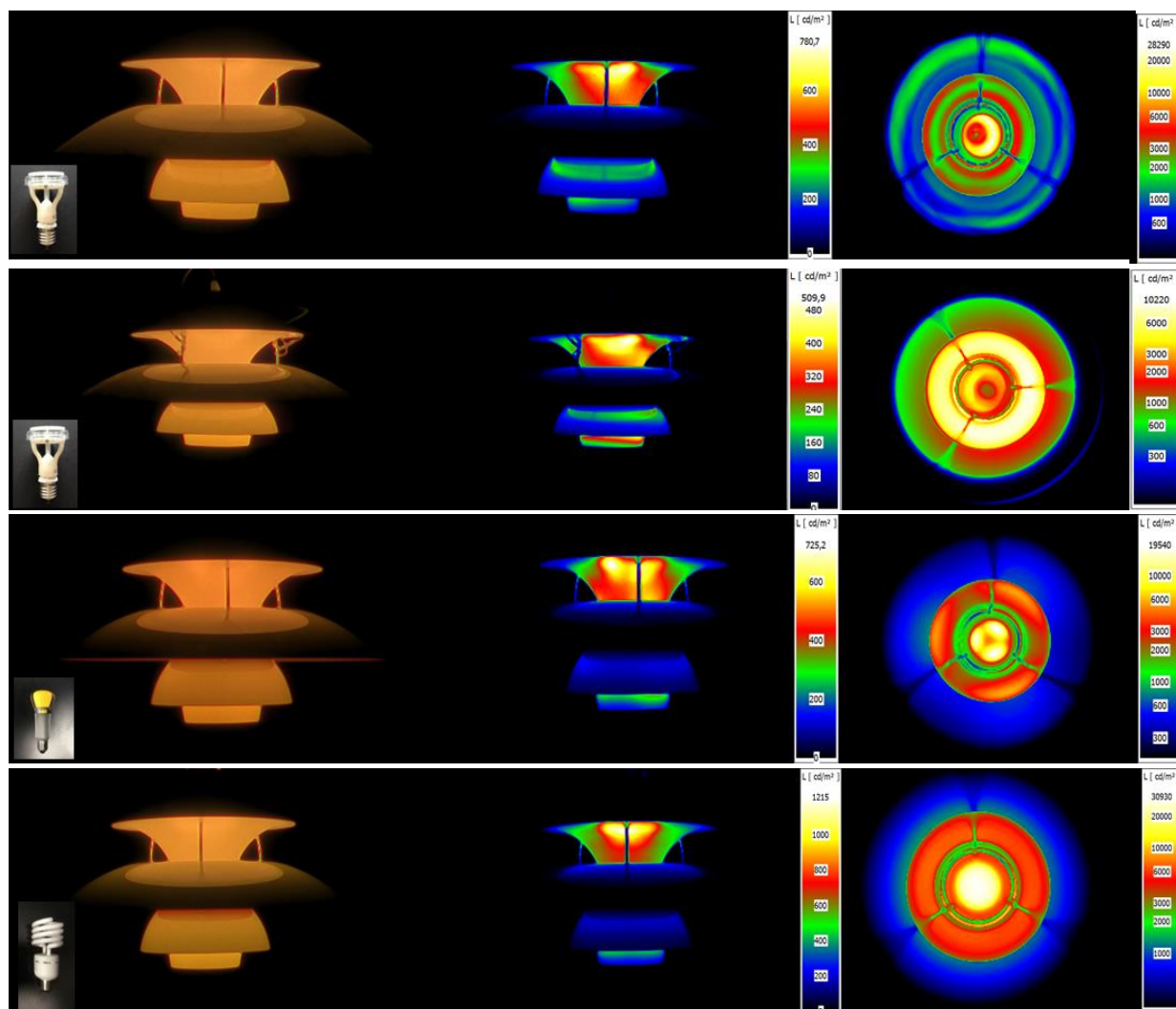
I tabellen herunder er vist resultatet af målingerne på PH5 lampen og de tilhørende lyskilder. Der er foretaget målinger på to af LP anbefalede lyskilder, en LED pære og en sparepære og med CoolLED lyskilden med PH5 optik og CoolLED lyskilden uden optik.

Tabellen viser måleresultater for lysstrøm af lyskilder alene og indsat i PH5 lampen. Effektivitet er angivet i lm/W og LOR.

Lyskilde	CooLED med PH5 linse		CooLED uden linse		Philips Master LED		DURA Lamp ECO Twist	
	Lysstrøm [lm]	977	503	1055	517	1092	399	2316
Effekt [W]	11,3	11,3	11,2	11,2	12,3	12,3	32,5	32,5
Effektivitet [lm/W]	86	45	94	46	89	32	71	23
LOR [%]		51,5		49,0		36,5		32,7

Måleresultaterne viser at LOR øges fra 32,7 % for sparepæren og 36.5 % for LED pæren til 51,5 % for CooLED lyskilden med optik. Det er en væsentlig forbedring af LOR igennem den designede lysfordeling fra linsen tilpasset PH5 lampen.

DTU Fotoniks goniofotometer er udstyret med et farvekamera der er benyttet til at tage billeder af lamperne med de forskellige lyskilder installeret. Billederne er high dynamic range og giver information om luminans og farve. Det er benyttet til at dokumentere og vurdere hvorledes lampeskærmene belyses op og om de er jævnt belyst som LP gerne vil have.



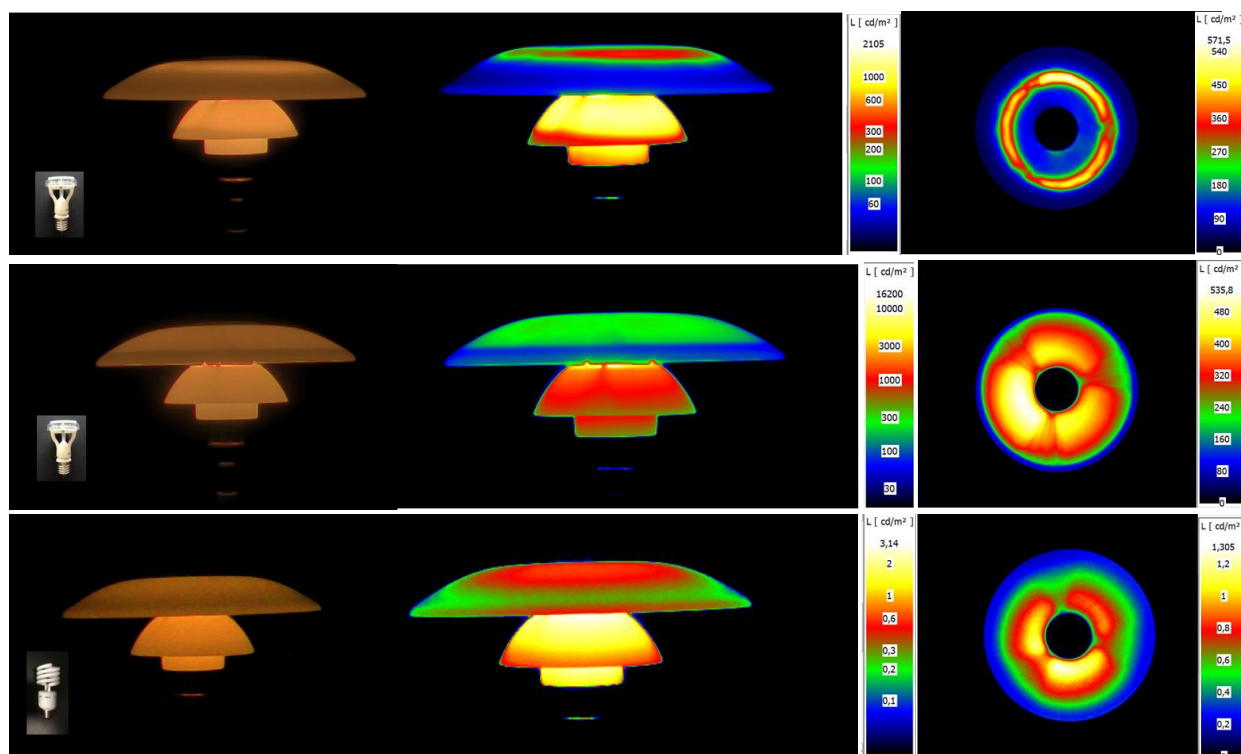
Billeder af PH5 lampen med forskellige lyskilder, CoolLED med PH5 linse (øverst), CoolLED uden linse (næstøverst), Philips Master LED pære (næstnederst) og DURA Lamp ECO Twist sparepære (nederst). Til venstre er farvebilleder af lampen set fra siden, i midten tilsvarende luminansbillede og til højre luminans billede af lampen set nedefra.

Luminans billederne viser meget tydeligt at vi med CoolLED lyskilden opnår en bedre fordeling af lyset på de tre skærme. Det ses for LED pæren og sparepæren at der er et forhold på luminansen set nedefra på ca. 30:6:1 for inderste:mellemste:yderste skærm. Med CoolLED lyskilden med optik opnås et forhold på 7:3:1, men som man kan se er der nogle skarpe kontraster på skærmene som ikke gode. De kommer fra at linsen på CoolLED lyskilden giver for skarpe peaks i de retninger. Det giver en høj effektivitet i lampen, men ikke en god lysfordeling på skærmene. Der er derfor også lavet en tilsvarende måling hvor linsen er fjernet fra CoolLED lyskilden. Det ses at give en langt bedre og jævn lysfordeling på skærmene og samtidig en udjævning af luminans forholdet til 4:6:1. Her er luminansen fra den inderste skærm mindre da CoolLED lyskilden uden optik kun sender lidt lys nedad. Dette er således en fordel i denne PH5 lampe og også i PH4½-3½ lampen. I det følgende er de tilsvarende måleresultater for hhv. Koglen og PH4½-3½ lampen vist.

Tabellen viser måleresultater for lysstrøm af lyskilder alene og indsat i PH4½-3½ lampen. Effektivitet er angivet i lm/W og LOR.

Lyskilde	CoolLED med PH4½-3½ linse		CoolLED uden linse		Duralux Twist	
	Lysstrøm [lm]	927	453	1055	735	1686
Effekt [W]	11,3	11,3	11,3	11,3	23,2	23,2
Effektivitet [lm/W]	82	40	93	65	73	26
LOR [%]		48,9		69,7		36,4

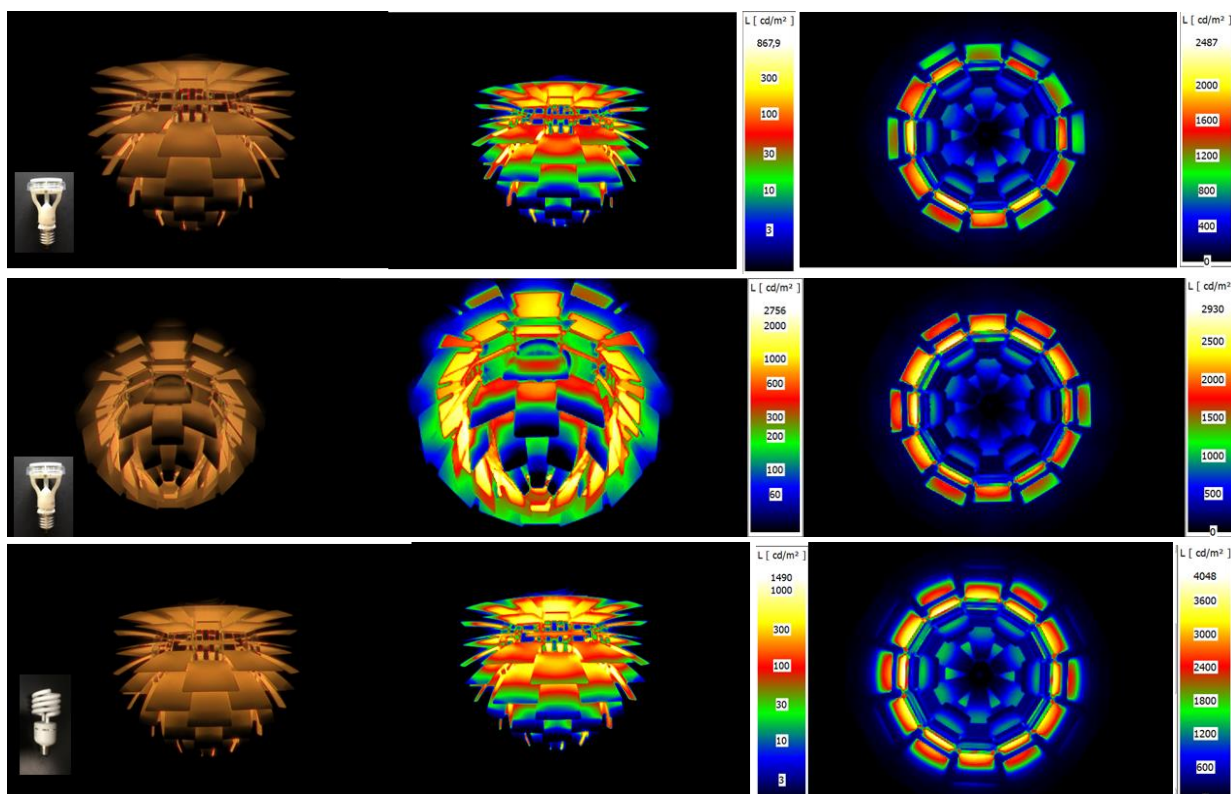
Her ses at der med CoolLED lyskilden uden linse opnås en meget høj LOR på 69,7 % og samtidig en langt bedre lysfordeling på skærmene som er diffust transmitterende. Dette kan ses på luminans billeder herunder. Det ses at CoolLED lyskilden med PH4½-3½ linse giver en meget skarp og smal aftegning midt på den øverste skærm. Det giver et udtryk i lampen som ikke er tilfredsstillende. Derimod giver CoolLED lyskilden uden optik en langt bedre fordeling af lyset, også i forhold til sparepæren, og det kombineret med en meget høj LOR.



Billeder af PH4½-3½ lampen med forskellige lyskilder, CoolLED med PH4½-3½ linse (øverst), CoolLED uden linse (næstøverst), og Duralux Twist sparepære (nederst) (denne er skaleret forkert i luminans men relativ fordeling er ok). Til venstre er farvebilleder af lampen set fra siden, i midten tilsvarende luminansbillede og til højre luminans billede af lampen set oppefra.

Tabellen viser måleresultater for lysstrøm af lyskilder alene og indsat i koglen. Effektivitet er angivet i lm/W og LOR.

Lyskilde	CooLED med koglen linse		CooLED uden linse		Super Duralux Twist	
	Lysstrøm [lm]	940	211	1055	257	2316
Effekt [W]	11,3	11,3	11,3	11,3	32,5	32,5
Effektivitet [lm/W]	83	19	93	23	71	14
LOR [%]		22,4		24,4		19,8



Billeder af koglen lampen med forskellige lyskilder, CooLED med koglen linse (øverst), CooLED uden linse (næstøverst), og Super Duralux Twist sparepære (nederst). Til venstre er farvebilleder af lampen set fra siden, i midten tilsvarende luminansbillede og til højre luminans billede af lampen set nedefra.

For koglen ses der ikke de store forskelle i effektivitet og LOR, således er LOR forbedret fra 19% med sparepære til 24 % med CooLED lyskilden uden optik. Det er svært at se nogen forskel i luminansbillederne af koglen og dens mange skærme.

1.5.4 Køling

Aktiviteter

LED'er udvikler varme af helt op til 70% af den tilførte energi. Hvis LED'erne ikke køles brænder de af på 6-7 sekunder. Køles de hensigtsmæssigt holder de i over 50.000 timer og de giver også mere lys fra sig ved lavere drifttemperaturer. Der er god grund til at bruge ressourcer på køling i LED løsninger.

Arbejdet med køling indeholder flere elementer der kan opsummeres under følgende punkter:

- **Varmetransport fra LED til kølelegemets overflade**
- **Varmens indgangsflade på kølelegemet**, areal og karakter af overflade
- **Materialet og dets varmeledende egenskaber**
- **Kølelegemets geometriske form** og den interne varmfordeling
- **Kølelegemets overflade areal** til afgivelse af varme
- **Kølelegemets aktivering af køleluftflow**

De ovenstående elementer skal fungere sammen i serie for at få et godt resultat. Fejler ét vil der opstå en flaskehals som afstedkommer forøget drifttemperatur og nedsat lys-performance og levetid. Arbejdet med alle elementerne har skabt en stærk kæde af processer der i kombination udmønter sig i en effektiv og stabil passiv køling.

- **Varmetransport fra LED til kølelegemets overflade**

LED'erne er monteret på et fleksibelt Printed-Circuit-Board (PCB) der snos omkring kølelegemet.

Varmeledende lim er brugt i de første funktionsmodeller. Det har virket efter hensigten på det termiske niveau. Montagen derimod har været præget af besvær med at placere PCB'et jævnt og præcist. Lim påføres, PCB placeres og et konstant tryk påføres og bevares indtil limen hærdner. Dette var både besværligt og meget tidskrævende og i flere tilfælde slap PCB'et i enderne og krævede ekstra limning. enkelte gange resulterede det i at LED'er faldt af PCB'et når der skulle påføres tryk.

Varmeledende dobbeltklæbende tape var en anden mulighed der præsenterede sig undervejs i projektet. 3M producerer forskellige typer og der blev indhentet prøver af 3M 8810 i 0,25 mm tykkelse fra virksomheden WALBOM, der havde gode erfaringer fra andre kunder i LED branchen.

Tape'en er svær at klippe og skære til den påkrævede bredde på 8mm, men fungerede godt ellers. Den var forholdsvis nem først af montere på kølelegemet og derefter montere PCB'et. Det krævede præcision og det var muligt at tage PCB og tape af igen og gøre nye forsøg.

Ved indkøb af tape til de endelige prototyper, blev den skåret i 8 mm's bredde. Dette fungerede godt og det var nemt at arbejde med og er at anbefale i produktion.

- **Varmens indgangsflade på kølelegemet, areal og karakter af overflade.**

Kølelegemeprototyperne er lavet ved hjælp af en 3D fil. Denne geometri bliver printet i plast og der laves en voks afstøbning. Voksafstøbningen bruges til at lave investment-castings i aluminium. Det er en metode der er forholdsvis nøjagtig men overfladen hvor varmen skal påføres kræver ekstra bearbejdning for at opnå optimal finish. I de tidlige funktionsmodeller blev dette gjort ved at slibe overfladen manuelt, men i de sidste to er kølelegemet blevet monteret i en dorn, sat i en drejebænk og 0,3 mm drejet af overfladen. En glattere overflade giver bedre kontakt og dermed bedre varmeoverførsel. I produktions-sammenhæng skal kølelegemerne højtryks støbes og emnets overflade vil have de rette tolerancer direkte ud af maskinen.

- **Materialet og dets varmeledende egenskaber**

Det er essentielt for materialet i en passiv køleløsning at have god varmeledningsevne. Aluminium er det typiske materiale i LED applikationer, men der er også det mere højtydende materiale Kobber. På

længere sigt kan man også se til kompositter og teknisk keramik, men i CoolLED projektet har vi afgrænset det.

Aluminium har en massefylde på 2,7 og en varmelednings koefficient på ca. 200 og Kobber 9 og ca. 400. Kobbers effekt er 2 gange højere, men vejer mere end 3 gange så meget og er dertil et dyrere materiale. I produkter som LED pærer har vi afgjort at Aluminium giver den bedste balance imellem ydelse, vægt og pris. Udvikles kraftigere varianter vil kobber eller teknisk keramik være oplagte materialer at undersøge.

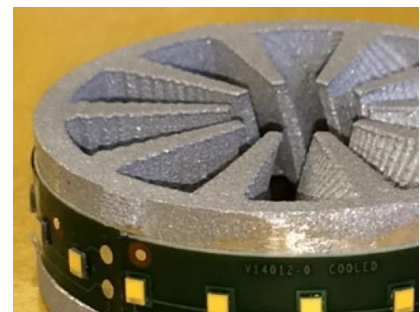
● **Kølelegemets geometriske form** og den interne varmfordeling

Udformningen af kølelegemer har teknologisk set stået meget stille, især når man parallelt ser på LED teknologiens hastige udvikling. Typiske kølelegemer er støbte med en firkantet base og en række køleribber formet som plader i ensartet tykkelse eller cylindriske ekstruderinger med køleribber fordelt rundt som en sol. Ved at undersøge disse traditionelle løsninger samt nogle fra eksisterende retrofit lyskilder er der lokaliseret typiske flaskehalse. De giver et fald i køle-performance, da varmen ikke bliver fordelt hensigtsmæssigt.

I første omgang arbejdedes der med trekantede koniske køleribber, der gav en langt bedre indre varmfordeling og en højere aktivering af overfladen til varmeafgivelse. Tests viste gode køle-takter. Ribberne havde en en hældning på ca. 10 grader, hvilket giver den gennemstrømmende køleluft et vortex-forløb der yderligere accelerere hastigheden. Termiske billeder afslørede at der i bunden af køleribberne var en langt lavere temperatur og analysen viste at fladen bremsede køleluftflowet igennem skorstenen.

Første generation af pæren havde 12 LED'er hvilket gav en meget tæt køleribbe placering, da hver LED sad ud for en dedikeret køleribbe. Da der undervejs i projektførløbet blev indført 20 LED'er, var det oplagt at have dem til parvist at have en dedikeret køleribbe. Designet gjorde køleribberne bredere og i kombination med at vi gerne ville bort fra den flade bund udvikledes en form der havde fællestræk med en fly-vinge.

Den endelige prototype blev i tråd med resten af CoolLED-udviklingen med 16 LED'er, hvilket afstedkom 8 køleribber og en geometri der nu egner sig til højtryks støbning, hvilket også er den anbefalede proces til produktion.



● **Kølelegemets overflade areal** til afgivelse af varme

Arbejdet med overfladen har vist at det ikke kun er et spørgsmål om at få størst muligt areal, men i høj grad også om placeringen af den varmeafgivende overflade i forhold til luftflow. Den strategiske placering af køleribberne i en skorsten har skabt en synergieffekt hvor alle køleribberne driver luftflowet i fællesskab. Ved at tilføje den lodret orienterede flade et "plisseret" forløb forøges arealet yderligere. Der også arbejdet med andre typer overfladeforøgelse, men de var uforenlige med støbning, da de ikke havde slip-vinkel.

● **Kølelegemets aktivering af køleluftflow**

Det stærke ved kølelegemets udformningen er at man nu i kombination udnytter naturlig konvektion, venturi-effekt og Bernoulli's princip i en rent passiv løsning. Dette muliggør en køling med under 5 gram aluminium per watt i en meget kompakt konstruktion. Essentielt for at sikre køle-effekten er at der er gode betingelser for luftens afledning over kølelegemet. I forløbet op til sidste prototype, har det oprindelige designoplæg været basis i målinger. Dette design er baseret på målet om at kunne få udviklet en mindre strømforsyning ved hjælp af piezo teknologi. Det er ikke lykkedes og den endelige prototype er istedet blevet installeret med konventionel teknologi der fylder betydelig mere. Bagsiden er det reducerede luftflow over kølelegemet, hvilket begrænser performance. I det fremadrettede forløb er det oplagt at involvere switch-mode teknologi med Mhz frekvenser der giver enheder af den halve størrelse.

Fremtiden for optimeret passiv køling

Led'er er produceret på samme måde som CPU'er i en computer og også her er et kølebehov. Arbejdet med kølingen og den viden der er genereret udmønter sig i en generel arbejdsmetode hvor man kan optimere og designe så man udnytter fysikkens love til det yderste og dermed undgår at skulle tilføje komplicerede og skrøbelige kølesystemer med blæsere, vandkøling etc.

Teknologien rummer mulighed for skalering. Det kan tænkes både i mindre løsninger, men også i større.

I projektet har der været store og grundlæggende forbedringer af kølelegeme-geometri. Arbejdet har indbefattet analyse af mange typer køling og aerodynamik og der er blevet sparrat med ingeniører undervejs i processen. Det giver et løft til hele køle-kæden og der er store fremadrettede forventninger til teknologien og produktet.

Der er store forventninger til produktet fremadrettet da det udmærker sig ved at optimere samlede lys-løsninger på en unik, simpel og fleksibel facon. Det vil være muligt at producere ved hjælp af eksisterende produktionsprincipper og der findes en oplagt niche til teknologien.

Forventninger fremadrettet ift. projektet/produktet

På sigt kan det tænkes køleløsningen også kan implementeres i andre produktkategorier som eksempelvis computere.

1.5.5 *Elektronik*

Aktiviteter

Det oprindelige projekt bestod i at udvikle og teste en LED driver med en piezo keramisk transformer. Der blev testet med forskellige opstillinger og forskellige udgaver af den piezo keramiske transformer. Det viste sig, at tabet i den piezo keramiske transformer var for stort, som derved ledte til, at temperaturen oversteg 100°C på transformeren. Af denne grund blev projektet ændret til en mere traditionel udgave af LED driver teknologi, som bruger en isoleret flyback converter.

For at kunne overholde kravet om den lille formfaktor, blev en flyback converter udviklet ud fra et udviklingskit, som blev reduceret i størrelse. Det var ikke muligt at implementere dimming med en traditionel triac dimmer funktion. Den eneste metode til dimming som kan implementeres, er dimming ved kortvarige sluk/tænd af ac spændingen. Denne metode er ikke ønskelig i dette projekt, og den indbyggede dimming funktion blev derfor slået fra i converteren.

Tekniske resultater

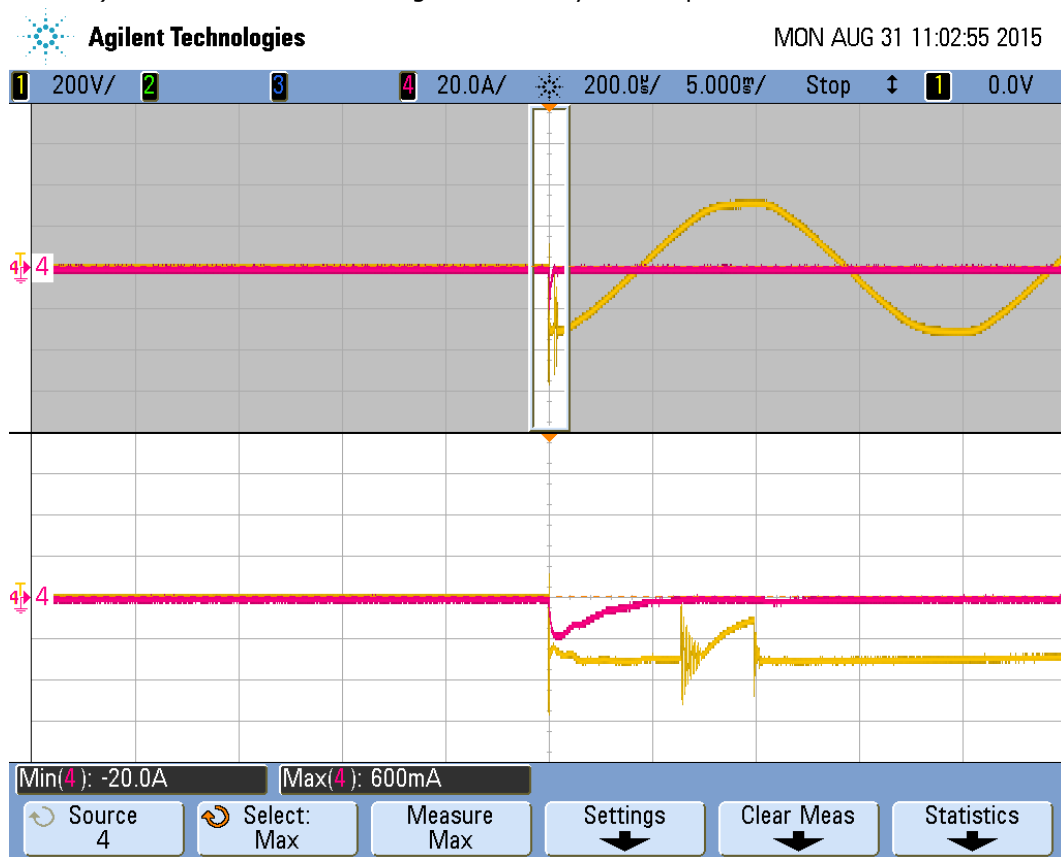
De opnåede resultater er beskrevet i skemaet herunder.

Måling	Resultat
Input spænding [Vac]	207 – 253
Nominel input effekt [W]	12
Powerfaktor ved 230Vac	0.85
Virkningsgrad ved 230Vac [%]	85
Inrush strøm [Aac]	Max. 20A peak over 100µs
Total Harmonisk støj (THD) [%]	1.45
Output strøm [mA]	455 ±3%
Maximal output spænding [Vdc]	26
Nominel output spænding [Vdc]	22
Minimum output spænding [Vdc]	8
Maximal output effekt [W]	11
Nominel output effekt [W]	10

Som det fremgår af skemaet opnås der en effektivitet på 85% ved 230Vac. Grundet valget af converter type, samt begrænset fysisk plads, er dette et pænt resultat.

Der opnås en powerfaktor på 0.85 ved 230Vac. Da der ikke er aktiv power factor correction (PFC) kan denne ikke forventes at kunne forøges. Der er intet krav omkring power faktor ved LED drivere under 25W. Dette er et meget acceptabelt niveau.

Output strømmen varierer med maksimalt 3% over hele input spændingsområdet (207Vac – 253Vac). Dette resulterer i et meget ensartet lys to lamper imellem.

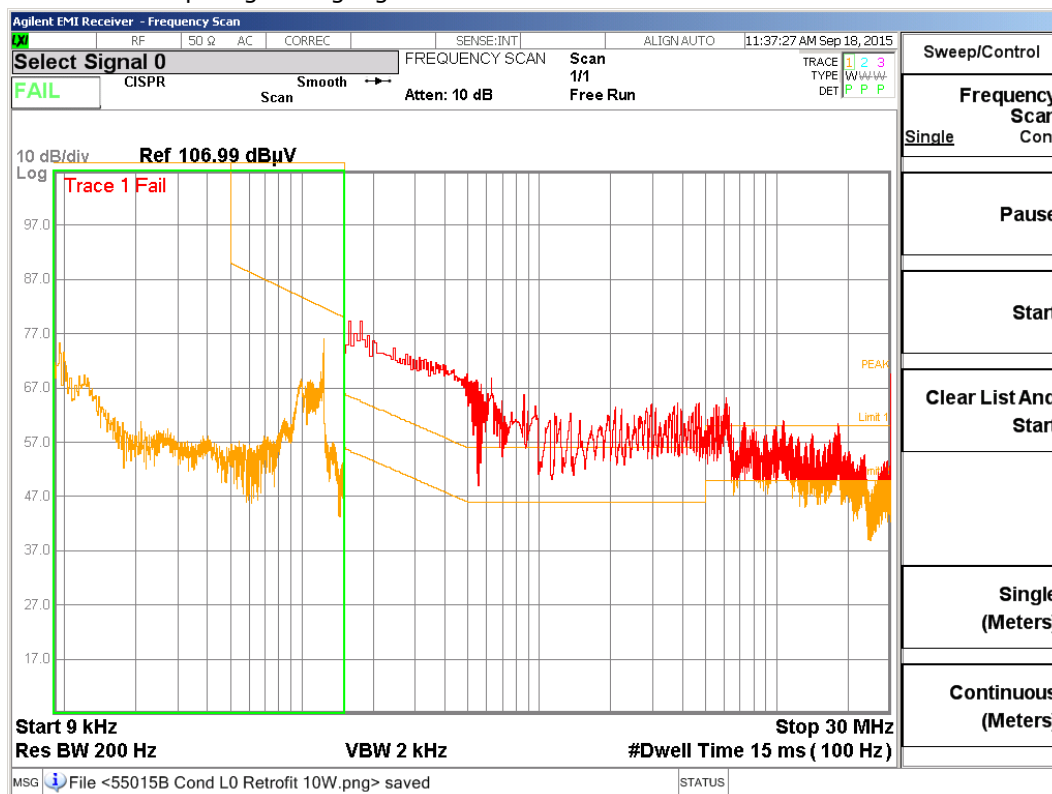


Figur 1 Inrush strøm ved 230Vac

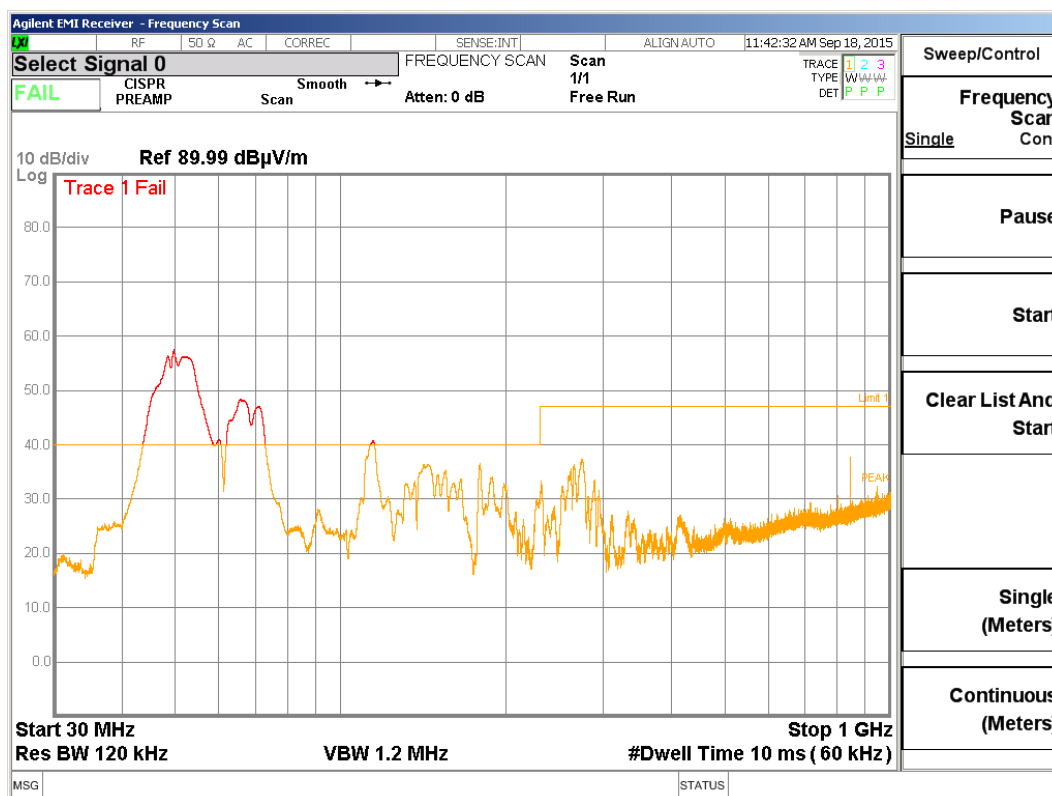
Inrush strømmen ses på Figur 1. Der opnås en peakstrøm på 20A over en periode på ca. 100µs (50% - 50%). Denne inrush strøm er lav, og vil ikke forstyrre almindelige el installationer, selv ved brug af mange lamper der tændes samtidig.

EMC

Der er kørt tests for udstrålet (radiated) og ledningsbåret (conducted) støj iht. EN 55015B. Resultaterne ses på Figur 2 og Figur 3.



Figur 2 Ledningsbåret støj iht. EN 55015B



Figur 3 Udstrålet støj iht. EN 55015B

Som det kan ses på de to billeder, kræves der en del optimering ift. Både ift. ledningsbåret (Figur 2) og udstrålet støj (Figur 3).

Kommercielle resultater

Poweren vil kunne markedsføres til LED projekter. Den udmærker sig ved sine små dimensioner og acceptable data.

Forventninger fremadrettet ift. projektet/produktet

Den vil indgå i vores standard program efter en endelig produktionsmodning.

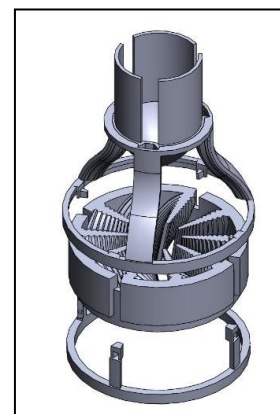
1.5.6 Det mekaniske design

Aktiviteter

AT Lighting har stået for formgivning og design af produktet. Teknologisk Institut har sammen med AT Lighting konceptudviklet på det oprindelige design for at opnå et resultat, der kan masseproduceres med konventionel teknologi med særlig fokus på design, funktionalitet, Optik og kostpris.

Det konceptuelle design er udarbejdet omkring 4 områder.

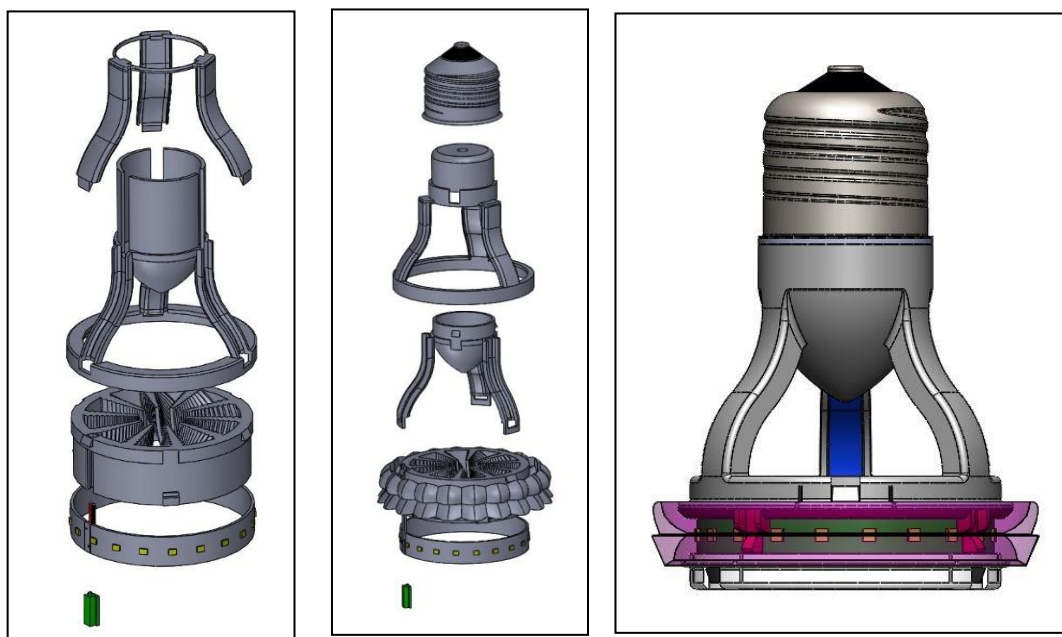
1. Opdeling af sprøjtstøbte plastdele, med fokus på produktion, funktionalitet og montage.
2. Design, udformning og optimering for trykstøbning af kølelegeme.
3. Udarbejdelse af LED design optimeret for nøjagtig og sikker positionering ved montage.
4. Linsedesign iht. Positionering og fastgørelse på lyskilde, således konfiguration til forskellige designlamper let og hurtigt kan opnås.



Design oplæg fra AT Lighting.

Det konceptuelle design har resulteret i 4 designloops der hver især er afsluttet med fremstilling af prototyper vha. 3D Print

De første 2 designloops fokuserede på de enkelte deles funktionalitet samt hvordan CoolLED pærens dele skulle samles. Hvert design loop gennemgik et konstruktions review, hvor de fremstillede prototyper blev vurderet af projektgruppen for at validere de forskellige konceptuelle design.



Det tredje design loop fokuserede på at konstruere et udskifteligt optiksystem, optimeret for produktion. Det oprindelige optiksystem viste sig svært og meget dyrt at producere i en prototypeserie. Positioneringen af LED'er og optik krævede så høj grad af præcision at det ikke kunne svare sig på dette stade af udviklingen. Optikken var designet til at have en celle per LED, hvilket stillede meget store krav til tolerancer på kølelegeme, LED'er, optik og mekanik. Optimalt set ud fra funktion er dette den

mest effektive løsning, men på prototypetadiet så ressourcekrævende at det ikke giver mening på dette tidspunkt i udviklingen. Der var også problemer med kvaliteten af overfladen på prototypelinsen. Kvalitet kan hæves til det nødvendige når linserne i det endelige produkt skal produceres ved sprøjtestøbning. Der vil det give en bedre balance imellem effekt og pris.

DTU Fotonik udarbejdede i samarbejde med Teknologisk Institut en løsning der let kunne positioneres, udskiftes og ikke mindst produceres. Linser til optik systemet blev designet som et omdrejningslegeme og drejet i stedet for støbt, hvorefter en sprøjtestøbt positioneringsring sikrede korrekt montage af linsen på CoolLED pæren.

Det tredje design loop resulterede i en funktionsdygtig pære. Da CoolLED pærens hardware ikke var færdigudviklet på dette tidspunkt benyttedes en ekstern strømforsyning for at tilføre energi til LED'erne. Prototypen blev af DTU Fotonik, testet med henblik på at validere pærens optik og evne til at køle. Testen resulterede i udarbejdelsen af et nyt koncept vedr. design, positionering og fremstilling af linser. Endvidere viste testen at CoolLED pærens kølelegeme ikke var tilstrækkeligt effektivt grundet en fejlagtig mindre ren aluminiumstype i prototyperne. Et nyt linsekoncept blev udarbejdet og sammen med det optimerede kølelegeme og reducerede antal lysdioder, integreret i fjerde design loop. CoolLED pærens hardware element "strømforsyning til LED" implementeredes også i loop 4. Det viste sig at der var et øget behov for plads, for at rumme strømforsyningen i CoolLED pærens øverste del, da man ikke havde succes med udviklingen af en piezo-transformer der kunne spare plads. Denne ændring påvirkede plastkomponenternes udformning som derfor re-designedes igen.



Design loop 4 viser projektets endelige resultat vedr. det mekaniske design. Prototyperne er printet med SLS 3D printteknologi. Kølelegeme er printet i polystyren og herefter støbt i 99,9% aluminium.

Det forventes at der fremadrettet vil blive benyttet ny og mindre teknologi til strømforsyningen så et mindre kammer er nødvendigt. Dette vil give et slankere design og en bedre køleluftstrøm, samt minimere vægt og kost og øge den samlede performance og æstetik. Anbefalet plasttype i produktion er ABS, eventuelt med additiver der øger UV-modstandsdygtighed.

1.5.7 Formidling Aktiviteter

CoolLED projektet er blevet formidlet gennem DTU's medier; DTU Avisen og Dynamo samt DTU's hjemmeside hvor det i en længere periode var på startsiden og på DTU Fotoniks institutside. Desuden har der været en artikel på det internationale nyhedssite The Murmur (www.murmur.dk). Oplaget på DTU Avisen og Dynamo er hhv. 8.800 (distribueret) og 21.000 (heraf 5.000 til intern brug).

Tekniske resultater

De kommercielle resultater opstår i forlængelse af CoolLED projektets tydelige proof-of-concept. Data fra projektet bliver anvendt som løftestang i mødet med investorer, producenter og samarbejdspartnere.

AT Lighting arbejder for definere og finde den/de rette til at modne og producere CoolLED pæren. Teknologien er bakket op af global patentering, der sammen med CoolLED projektets resultat danner et stærkt grundlag. Målet er at skabe en platform hvorfra CoolLED pæren kan markedsføres og sælges til ejere af klassiske lamper med særlige lys-behov. Efterfølgende udvides der med nye applikationer for at øge modulet udbredelse.

DTU har i kraft af sin status som universitet adgang til flere medieplatforme som også beskriver projektet. Det være sig hjemmeside, kvartals-magasin og konferencer. Disse medier er alle aktiveret og bringer historien om CoolLED pæren og de unikke nyskabelser den rummer. Aktørerne i projektet er blevet inddraget og har givet interviews og suppleret med data.

AT Lighting har til deres bredde kontaktflade formidlet historien om det gode LED lys i et optimalt format.

CoolLED konceptet har dannet grundlag for virksomhedens fortsatte køle- og designudvikling og dette fortælles ved møder, præsentationer, konferencer og i artikler. Det store nationale fokus på grøn teknologi og start-ups giver AT Lighting adgang til konferencer indenfor disse områder og det udnyttes til at skabe netværk og kendskab til virksomheden og dens teknologi.

Formidlingen vil efter projektafslutningen fortsætte for at generere omtale og interesse til produktet i den næste fase rettet imod kommercialisering.

1.6 Udnyttelse af projektresultaterne

Prototypernes udviklingsstadium er meget tæt på produktionsmoden, hvorfor man let kan kalkulere prissætning og derved understøtte den udarbejdede forretningsplan med troværdig dokumentation.

Projektresultaterne anvendes fremadrettet til at dokumentere og kommunikere produktet og dets potential ift. indgåelse af strategiske samarbejder og muligvis tiltrækning af investorkapital.

Prototyperne tjener til formål at kunne demonstrere produktet 1:1 overfor interessenter.

1.7 Projekt konklusion og perspektiver

Projektet har påvist at valg af lyskilder ikke bare handler om lyskildens effektivitet, men i langt højere grad om lyskildens effektivitet i samspil med lampen. Der er store energibesparelser at hente hvis man designer nye LED-lyskilder mere intelligent ift. de lampetyper de skal monteres i. Særligt set i lyset af, at levetiden er over 25.000 timer, endda ofte 50.000 timer.

En af de interessante opdagelser i projektet var, at man i Poul Henningsens lamper, hvor han allerede har gjort sig umage med at designe et optisk system, der rent faktisk tager udgangspunkt i en defineret lyskilde, ikke får ekstra værdi af en dedikeret optik. Men at CoolLED pærens konceptuelle opbygning med en naturlig jævn horisontalrettet lysfordeling, både gav et flot oplevet lys i lampen, og markant højere effektivitet målt som lys ud af lampen i forhold til det lys der kommer fra lyskilden selv (LOR – Light Output Ratio) og målt i energieffektivitet lm/W. Samtidigt med muliggør CoolLED pærens kompakte design at den er gemt i lampen, og derfor ikke synlig ved indkig. Det er et meget attraktivt designparameter netop for Louis Poulsens PH lamper. Resultaterne var klart bedst på PH4½-3½ pæren uden linse, hvor en LOR på 59% blev opnået, hvilket var en forbedring med en faktor 2,5 ift. bedste alternativ på Louis Poulsens positivliste. Produktionsmodning af denne CoolLED variant ses rent lysteknisk forholdsvist ukompliceret da der blot skal anbringes en transparent afdækning for dioderne. Denne har ikke behov for specielle adapterringe, og kan monteres let og præcist. Samtidigt vil den være langt billigere at fremstille sammenlignet med den dedikerede rotationssymmetriske linse. Derfor ses det som meget sandsynligt at dette produkt har store chancer for kommerciel succes.

Vi har demonstreret CoolLED som en lysmotor og en platform for mange produktvarianter. Projektet har dokumenteret at systemet virker effektivt, og at vi, med udskiftelige linser, kan rette lyset efter særlige behov. Vi har dog erfaret at lyset skal tænkes mere kategorisk og principielt, i stedet for super præcist ift. én specifik lampe, da det kræver ekstrem præcision på hele systemet, inkl. lampen og placering af lyskilden i lampen. Ved at tænke mere i lysprincipper, åbner man for at produktet matcher flere lamper, har større tolerance samt giver bedre oplevet lysfordeling i lampen. Rent kommercielt kan produktet skaleres i to retninger: Lysfordeling og kompatibilitet. Det betyder at produktporteføljen kan udbygges den ene vej ved at udvikle nye linsetyper, og den anden vej ved at udvikle pæren til andre fatningstyper. Det skaber et kommercielt interessant system, da man ved få variationer kan opnå et meget bredt produktsortiment.