

Slutrapport for

Implementering af energibesparelser ved benyttelse af højkvalitets LED belysning

PSO 339-025

Af Carsten Dam-Hansen, Anders Thorseth og Peter Poulsen, DTU Fotonik



Marts 2010

Forord

Denne rapport indeholder en beskrivelse af forsknings og udviklingsprojektet ”Implementering af energibesparelser ved benyttelse af højkvalitets LED belysning”.

Projektet er udført i et samarbejde imellem DTU Fotonik, Teknologisk Institut, De Danske Kongers Kronologiske Samling (DKKS), Lumodan, Osram, Thermex og DONG Energy under ledelse af Carsten Dam-Hansen, DTU Fotonik. Projektet er finansieret af Dansk Energi under Elforsk’s PSO program, indsatsområde 3a. LED belysning. Projektet har projekt nr. PSO 339-025 og blev startet i februar 2007 og er afsluttet i marts 2010.

I rapporten første del beskrives sammenfattende baggrunden for og formålet med projektet, arbejdet i og resultaterne af projektet samt perspektiverne af projektets resultater. Rapporten indeholder derudover to hovedafsnit omkring arbejdet med design og udvikling af nye energieffektive, højkvalitets LED belysnings systemer til hhv. montre og emhætte belysning. Sidst beskrives formidlings og markedsførings arbejdet omkring projektets resultater.

Summary

This report describes the research and development project “Energysavings by implementation of high quality LED illumination”.

The project is carried out in cooperation between DTU Fotonik, Teknologisk Institut, De Danske Kongers Kronologiske Samling (DKKS), Lumodan, Osram, Thermex and DONG Energy, headed by Carsten Dam-Hansen, DTU Fotonik. The project is financed by the Danish Energy Association through Elforsk’s PSO program, under 3a. LED illumination. The project has no. PSO 339-025 and was initiated in February 2007 and was ended in March 2010.

The first part of the report describes the background and aim of the project, the work and results together with future perspectives of the results of the project. The report further contains two sections about the work on design and development of two new energyefficient and high quality LED illumination systems for display case and cooker hood illumination. Finally the work on communicating the results of the project is described.

Carsten Dam-Hansen

DTU Fotonik, Roskilde, 31. marts 2010.

Forside billede: Foto fra skatkammerets 1. sektion med Christian den 3.s rigssværd i forgrunden. Det er montren yderst til højre på billedet, som DKKS har stillet til rådighed for projektets demonstration og afprøvning af nye LED belysningssystemer. På billedet se det ny udviklede LED system demonstreret i denne montre.

Indholdsfortegnelse

Forord	2
Summary.....	2
Baggrund og formål	4
Projektgruppen.....	4
Resultaterne	5
Konklusion og perspektiver	6
Montrebelysning	8
Skatkammeret på Rosenborg	8
Glødepære belysning.....	10
Undersøgelse af LED alternativ	11
Nyt LED system	15
Farvegivningelse	15
Optisk system til farveblanding	16
Effektivitet af det nye LED system.....	18
PinolLED	20
Emhættebelysning.....	21
Demonstrations emhætte	21
Halogen spot lyskilder	22
LED baserede erstatningslyskilder.....	23
Osram coinlight	24
Ny LED lyskilde.....	25
Sammenligning af farvegivningelse og effektivitet	29
Karakterisering af emhætte belysning	31
Måleopstilling til anvendelses effektivitet	32
Karakteriserings målinger.....	35
Bedste alternativ til halogen belysning	39
Formidling.....	40
Appendix A	43
Referencer	48

Baggrund og formål

Risø, nu DTU Fotonik, havde sammen med danske virksomheder igennem et PSO-støttet projekt¹ vist, at det er muligt at fremstille LED lyskilder med høj lyskvalitet og med et klart energibesparelspotentiale. Med høj lyskvalitet menes LED lyskilder med en specifik korreleret farvetemperatur og god farvegengivelse givet ved høje specifikke Ra-indeks.

Det var her projektet tog sit udgangspunkt, i to specifikke anvendelser hvor kravet om energibesparelser er knyttet sammen med et krav om høj lyskvalitet af belysningen. De to anvendelser er belysning i hhv. emhætter og udstillingsmontre. I begge disse anvendelser benyttes i dag enten gløde- eller halogenpærer, p.gr.a. deres meget varmt hvide lys med rigtigt gode farvegengivelsesegenskaber. Disse lyskilder har meget lav energieffektivitet i forhold til andre kunstige lyskilder og det er baggrunden for at gløde- eller halogenlys kilder i løbet af de kommende år vil blive udfaset i EU. Udfasningen startede i september 2009 og indenfor en kort årrække vil det ikke være muligt at købe mange af de lyskilder, der i dag benyttes i emhætter og montrebelysning. Denne udvikling er sket i løbet af projektperioden og har kun øget behovet for at finde alternative lyskilder, der er mere energieffektive og har høj lyskvalitet.

Energieffektiviteten af kommercielt tilgængelige varm hvide LEDs har udviklet sig meget i løbet af projektperioden, med databladsværdier fra ca. 30 lm/W til ca. 70 lm/W. Altså mere end en fordobling, og energieffektiviteten er således i dag langt højere end for gløde- og halogenpærer, som har energieffektiviteter på omkring 10-20 lm/W. Den meget lille varmestråling, lange levetid og store robusthed, der karakteriserer LED komponenter og LED lyskilder er afgørende fordele for implementeringen i såvel emhætter som udstillingsmontre. Specielt ved montrebelysning er varmestråling fra gløde- og halogenpærer er stort problem og i mange tilfælde er energikrævende køling nødvendig.

Kravene til belysningen i de to anvendelses eksempler der ses på i projektet er specielt høje, som ikke kan løses med kommercielle tilgængelige LEDs og de hidtil udviklede LED lyskilder.

Formålet med projektet er at implementere energibesparelser ved at benytte LED teknologi i to konkrete anvendelser, som høj kvalitets belysning i emhætter og i udstillingsmontre, hvor der i dag benyttes gløde- og halogenpære belysning. Dette gøres igennem design, udvikling og test af nye LED lyskilder og systemer ved brug af farveblandings teknologi og nye optiske systemer.

Projektet mål er i de to konkrete anvendelser at:

- udvikle nye LED lyskilder med meget høj lyskvalitet der matcher de tidligere benyttede gløde- og halogen lyskilder
- implementere de nye LED lyskilder i hhv. emhætter fra Thermex og i montrere i skatkammeret på Rosenborg og i forretningsmontrere.
- demonstrere implementeringer der udviser energibesparelser på mindst 50 % og hvor varmestrålingen er reduceret med over 90 % i forhold til eksisterende løsninger

Projektgruppen

Projektgruppen er tværfagligt sammensat for at løse udviklingsarbejdet bedst muligt med DKKS, Rosenborg som kunder, Osram, Lumodan og Thermex som leverandører, installatører og salgsled, Teknologisk Institut og DONG Energy som rådgivere og DTU-Fotonik som forskere i LED og lys teknologi.

I montrebelysningsdelen dækker DTU Fotonik, Lumodan og DKKS, Rosenborg værdikæden fra forskning til kunde, hvor der dog har været et producentgab. Dette er ved afslutningen af projektet udfyldt af den danske LED, elektronik og producentvirksomhed I-No (www.i-no.dk). I-No's egen driverelektronik er benyttet i projektets to demonstrationssystemer til hhv. montre og emhætte belysning.

Resultaterne

Projektgruppen har testet kommercielt tilgængelige LEDs og LED lyskilder til anvendelserne og har herigennem udviklet nye LED lyskilder, som lever op til de høje krav til lyskvaliteten i de to konkrete anvendelser. Dette er sket igennem design, udvikling og test af nye LED lyskilder og systemer ved brug af farveblandings teknologi og nye optiske systemer. Test og afprøvning er sket igennem lystekniske målinger i laboratoriet, men mindst lige så vigtigt igennem visuelle test og vurderinger af lyskilders egenskaber på stedet for anvendelserne.

Sammenfattende består projektets resultater af:

- En ny LED lyskilde til montrebelysning, der
 - visuelt matcher lyskvaliteten af de eksisterende pinolglødepærer i skatkammerets montere, med en korreleret farvetemperatur på omkring 2200 K og en farvegengivelse givet ved et generelt Ra-indeks på 95 og specifikke Ra-indeks på over 92
 - har en energieffektivitet, der er mere end 5 gange højere end for pinol glødepærer
 - med et nyt optisk system sikrer en god blanding af lys fra farvede LED og eliminerer problemet med farvede skygger bag belyste objekter
- Patentering af nyt LED optisk system
- Et nyt LED skinne system til montrebelysning som er implementeret i en montre i skatkammeret på Rosenborg, og som
 - demonstrerer en energibesparelse på mere end 70 %
 - kan dæmpes uden at ændre på den korrelerede farvetemperatur af lyset
 - reducerer varmestrålingen i monterne til under 2 % af hvad den er i montere med pinolglødepærer
 - har en meget længere levetid end pinolglødepærer og dermed reducerer vedligeholdelsesarbejdet væsentligt i monterne
 - kan ændres i farvegengivelse af blå farver til bedre gengivelse af kongebåt stof i montre, som gengives dårligt i eksisterende pinolglødepære belysning
- Implementering af nyt LED system i smykkemontre fra Ole Lynggaard Copenhagen
- En ny LED lyskilde til emhætte belysning der
 - visuelt matcher og forbedrer lyskvaliteten af de halogen lyskilder der indgår i demonstrations emhætte
 - der kan indstilles i korreleret farvetemperatur i området 2750 – 3300 K, svarende til enten gløde- eller halogenpære belysning

- har en farvegengivelse givet ved et generelt Ra-indeks i området 92-96
- har en specifik Ra-indeks for kraftigt røde objekter på 94, hvilket er væsentlig bedre end for halogen lyskilderne i demonstrationsemhætten
- kan dæmpes uden at ændre på den korrelerede farvetemperatur af lyset
- har en energieffektivitet der er 3 gange højere end for halogen lyskilderne
- reducerer varmestrålingen til under 10 % af hvad den er i halogen lyskilderne
- Ny testopstilling til test og karakterisering af lysfordeling og anvendelses effektivitet af belysning i emhætter
- Implementering af nye LED lyskilder i emhætte fra Thermex, der
 - demonstrerer en energibesparelse på 69 % for at opnå den samme lysstrøm på bord og væg under emhætten
 - giver en meget jævn belysning af arbejdsfladen i modsætning til halogen belysningen
 - giver en høj middelbelysningsstyrke på ca. 500 lux på alle kogezone

Projektets resultater er blevet formidlet igennem en lang række af foredrag, demonstrationer og artikler overfor interessenter i Danmark såvel som internationalt.

Konklusion og perspektiver

Der er således i projektet udviklet to nye LED lyskilder og systemer, der kombinerer høj energieffektivitet og høj lyskvalitet, til de to konkrete anvendelser; emhætte og montre belysning. LED lyskilderne har en meget høj lyskvalitet med hensyn til ønsket farvetemperatur og farvegengivelse, De giver en rigtigt god og i nogle tilfælde bedre erstatning for de gløde- og halogenpærer, der tidligere er benyttet i anvendelseseksemplerne.

LED lyskilderne er implementeret hhv. i et LED system i en montre i skatkammeret på Rosenborg, i en smykke montre fra Ole Lynggaard, Copenhagen og i en emhætte fra Thermex. Implementeringer demonstrerer store energibesparelser på omkring 70 %, og en varmestråling på under 2-10 % af den i tidligere benyttede lyskilder og lever således fuldt op til projektets mål.

At det er muligt i de nye LED lyskilder at kombinere høj energieffektivitet og høj lyskvalitet er nødvendig for en reel markedsintroduktion af nye lyskilder til disse anvendelser og for at det skal blive en reel driver til energibesparelser hos private og professionelle forbrugerne i disse anvendelser. Der er således store perspektiver for anvendelsen af de nye LED lyskilder som vil kunne generere store energibesparelser i samfundet.

Hvis man erstatter de konventionelle halogen lyskilder i alle danske emhætter med de i projektet ny udviklede LED lyskilder vil det føre til en energibesparelse på ca. 60 GWh årligt, hvor de nye LED lyskilder som vist har et effektforbrug som er 31 % af effektforbruget i de konventionelle halogen lyskilder. Dette er baseret på EI-Model Bolig som angiver at der er ca. 2 mio emhætter installeret i Danmark, hvis samlede årlige elforbrug andrager ca. 190 GWh og belysningens andel udgør erfaringsmæssigt mellem 40 – 70 % af dette. Det er her antaget at alle emhætter i dag benytter halogen lyskilder, hvilket ikke er helt rigtigt, men det indikerer energibesparelses potentialet.

DKKS er så tilfredse med projektets resultater, at man er indstillet på at installere det ny udviklede LED system i hele skatkammeret på Rosenborg. Hazze Nyström chefkonservator på DKKS, Rosenborg har i samarbejde med DTU Fotonik, Lumodan, I-No og Kvorning Design & Kommunikation søgt fondsmidler til en udskiftning af glødepære belysningen i alle skatkammerets 29 montre. Der er i 1. kvartal 2010 bevilliget midler fra Velux Fonden til en videreudvikling og opsætning af det nye LED belysningsystem i hele skatkammeret. Arbejdet med systemet er igangsat og opsætningen skal være afsluttet i 2010. Det vurderes at der ved reoveringen af belysningsystemet i monterne vil opnås en energibesparelse på ca. 74 % svarende til 10.600 kWh om året. Det svarer til en besparelse på kr. 21.200,- årligt, men besparelsen på vedligeholdelse i form af udskiftning af lyskilder anses at kunne udgøre en væsentlig større besparelse, p.gr.a. LED enhedernes meget længere levetid.

På Rosenborg og Amalienborg findes der en lang række armaturer som også baserer sig på pinolglødepærer og de vil være de næste som kan erstattes med det nye LED system. En række andre museer har vist stor interesse for systemet. Der arbejdes videre med en kommercialisering af det udviklede LED belysningsystem til montre, som kaldes PinolLED, som således vil generere energibesparelser i museer i de kommende år. Der lægges i udgangspunkt op til at adressere museums og smykkebranchen, men fremadrettet udvides det til flere brancher.

Montrebelysning

Til montrebelysning ønsker man ofte små lyskilder, som ikke fylder så meget og som har en god farvegengivelse, for at give en flot fremstilling af de udstillede objekter i monter. Det er ofte halogenpærer, der benyttes i udstillingsmontrer i forretninger og museer. Små glødepærer anvendes også som f.eks. på Rosenborg og Amalienborg. Glødepærer og halogenpærer har den store ulempe, at de udsender en stor del varmestråling, hvilket varmer udstillings monterne op når de er tændt. Gløde- og halogenpærer har generelt en meget lav energieffektivitet i forhold til andre lyskilder, og vil derfor i løbet af de kommende år blive udfaset i EU. For mere information om denne udfasning henvises til Dansk Center for Lys informations materiale².

Varmeproblemet i udstillingsmontrer kan elimineres ved benyttelse af fiberbaserede belysningsystemer, som f.eks. er installeret i det grønne kabinet på Rosenborg fra firmaet Roblon. Her er varmproblemet flyttet til de store lyskilder, hvor lyset kobles ind i fibersystemet, med ventilations støj som en ny og anden ulempe.

LED lyskilders mange fordele, som at det er små og robuste enheder med høj lysstrøm og effektivitet, ingen UV eller infrarød stråling, lang levetid gør dem til en meget attraktiv alternativ lyskilde til belysning i udstillingsmontrer såvel som til mange andre specielle og generelle belysnings formål. Udviklingen på området gør, at der i dag findes flere kommercielle LED belysningsssystemer til udstillingsmontrer og man vil i de kommende år se en udvikling med stadig flere og mere og mere energieffektive systemer, som LED teknologien modnes. Et af de seneste eksempler på sådanne nye LED systemer er XPO-LED³ fra firmaet Roblon. Det findes i to standard udgaver med korrelerede farvetemperaturer på hhv. 3000 K og 4500 K, med farvegengivelse karakteriseret ved Ra-indeks på hhv. 92 og 93. Sådanne systemer vil ikke ville kunne bruges til belysningen i skatkammerets monter, hvor man kræver en langt lavere korreleret farvetemperatur, altså et meget mere varmt hvidt lys med højt indhold af rødt lys.

Skatkammeret på Rosenborg

I kælderen på Rosenborg ligger skatkammeret med udstilling af bl.a. kronjuvelerne, kronregalierne, de enevældige kongers krone, dronningens krone og mange andre guld skatte. Det er De Danske Kongers Kronologiske Samling (DKKS), med chefkonservator Hazze Nyström, der står for udstillingerne. På Figur 1 og Figur 2 ses to fotos fra skatkammeret, hvor de højt sikrede monter er bygget op ad de slottets tykke vægge.



Figur 1 Foto fra skatkammerets 2. sektion med Christian den 4.s krone, som blev lavet til kroningen i 1596 i forgrunden. Foto fra www.rosenborgslot.dk.



Figur 2 Foto fra skatkammerets 1. sektion med Christian den 3.s rigssværd i forgrunden. Det er montren yderst til højre på billedet, som DKKS har stillet til rådighed for projektets demonstration og afprøvning af nye LED belysningsystemer. På billedet er LED systemet demonstreret i denne montre.

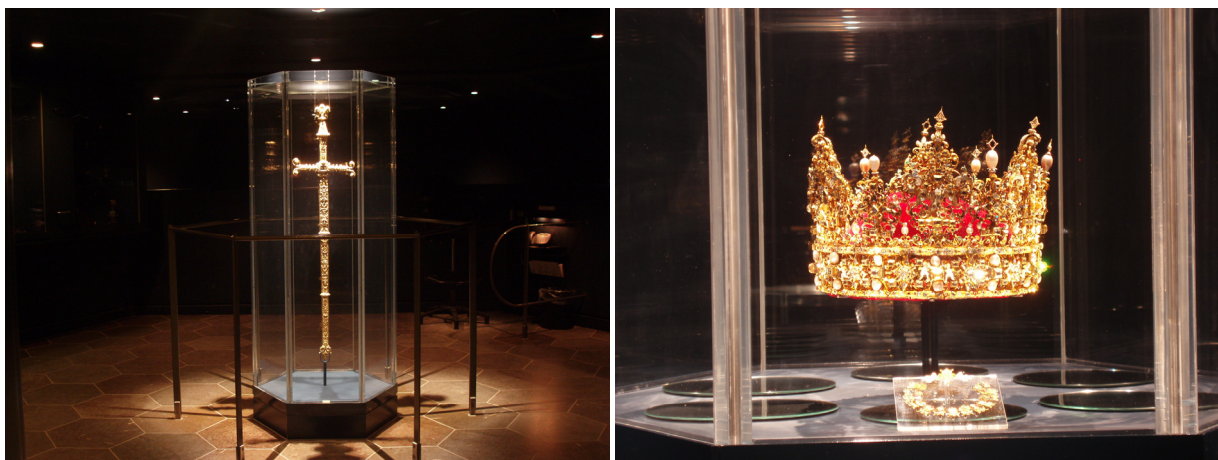
Der er 29 montre i alt, og de er ca. 100 cm høje og 70 cm brede og 25 cm dybe og der er en række montre i 2. sektion, som er lidt højere. Billederne giver et god indikation af den meget dæmpede og varm hvide belysning i kælderen, der giver de mange guldojakter i monterne den rette gulligt-røde fremtoning og giver et behageligt forhold imellem den meget lave middel belysningsstyrke i kælderen og farvetemperaturen af lyset. Det er et meget stort antal glødepærer på omkring 5 W, der danner belysningen i de mange monter. De sidder i en ramme i fronten af monterne, som det kan ses på billederne. De har en meget lav energieffektivitet, giver problemer med varmeudvikling i monterne og lyskilderne skal ofte skiftes.

Man ønsker fra DKKS side at reducere energiforbruget i monterne i skatkammeret og generelt på Rosenborg for blandt andet at opfylde kravene til energibesparelser i institutioner. Man er udstillingsmæssigt meget interesseret i at reducere varmeproblemet i monterne for at opnå et mere stabilt miljø for de udstillede objekter. LED lyskilder til generel belysning har netop denne fordel at der ikke udsendes varmestråling. Og man har udskiftet belysningen i en af udstillingerne i kælderen under Rosenborg, hvor man har installeret et LED belysningssystem fra Lumodan. Det er Brian Markussen fra projektgruppen, der har installeret systemet. Det har en korreleret farvetemperatur på 3000 K og en farvegengivelse givet ved et Ra-indeks på omkring 90. Denne belysning og andre kommercielt tilgængelige LED lyskilder og LED belysningssystemer har dog ikke den ønskede lyskvalitet i forhold til skatkammeret. Og her vil man ikke gå på kompromis med lyskvaliteten, med hensyn til farvetemperaturen og farvegengivelsen, der giver den gode varm rødlige farvegengivelse af de mange guldojakter.

Der derfor er et behov for at udvikle et nyt energieffektivt LED belysningssystem, som lyskvalitetsmæssigt kan leve op til kravene. I de følgende afsnit beskrives lyskvaliteten af den nuværende glødepærebelysning og hvordan der igennem farveblandings teknologi er udviklet et nyt LED belysningssystem, som har den ønskede lyskvalitet og en langt bedre energieffektivitet end den nuværende glødepærebelysning.

DKKS har sat en montre til rådighed for projektarbejdet, som har været benyttet til test og demonstration. Montren er i skatkammerets 1. sektion og kan ses yderst til højre på Figur 2, hvor det ny udviklede LED system er installeret i en demonstrations version.

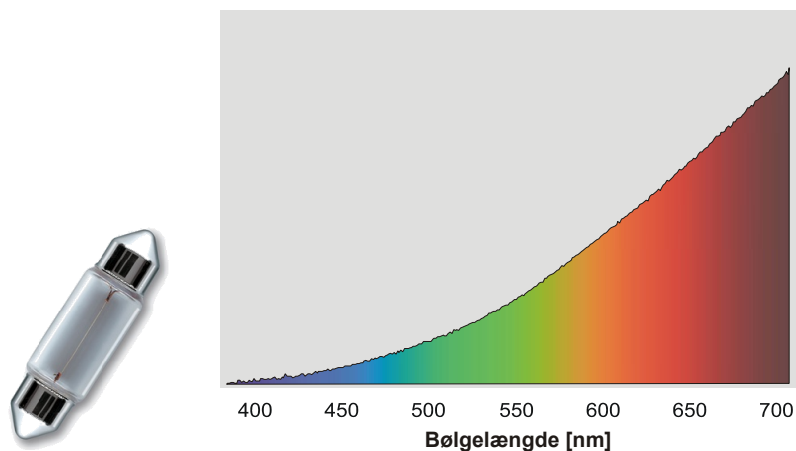
Noget af belysningen i skatkammeret er allerede erstattet med LED belysning. I midten af 1. sektion er der en montre med Christian den 3.s rigssværd og i midten af 2. sektion er Christian den 4.s krone udstillet. Disse har tidligere været belyst med 19 stk. 50 W halogen spot. Disse lyskilder giver en belysning med en farvetemperatur på omkring 3000 K, hvilket ikke er helt så varmt hvidt som i monterne. Disse lyskilder har med fordel kunnet blive erstattet af kommercielt tilgængelige LED spotlys kilder med den samme korrelerede farvetemperatur, med en udstrålingsvinkel på 12° og med et effektforbrug på 9 W. Disse montre med LED belysning er vist i Figur 3, hvor der altså er opnået en energibesparelse på omkring 80 %.



Figur 3 Fotos fra skatkammeret på Rosenborg. Montre med hhv. Christian den 3.s rigssværd og Christian den 4.s krone, hvor belysningen er ændret fra 50 W halogen spotpærer til kommercielt tilgængelige 9 W LED spot pærer. Fotos: Brian Markussen, Lumodan.

Glødepære belysning

I monterne benyttes der i dag et skinnebelysnings system med lav wattage pinolgløde pærer, som vist på Figur 4. Det er 24 V 5 W glødepærer, hvor spændingen er reduceret lidt for at få et lidt mere varmt hvidt lys. Den målte spektralfordeling af lyset fra en pinol glødepære ved 4 W effektforbrug er vist på Figur 4.



Figur 4 Foto af pinol glødepære og målt spektral fordeling af lyset fra en 5 W pinol glødepære.

Lyset fra pinolglødepærene har en meget lav farvetemperatur på omkring 2200 K, hvilket er et meget varmt hvidt lys med et meget højt indhold af rødt og infrarødt lys. Farvegengivelsen af lyset er meget nær perfekt med et Ra-indeks på 98.9, da farvefordelingen af lyset følger det af en ideel temperatur stråler ved 2200 K. Det meget varmt hvide lys er vigtigt i den mørke kælder på Rosenborg, hvor belysningsstyrken er meget lav og hvor man ønsker en god farvegengivelse af de mange guldobjekter.

Pinolglødepærene har en meget lav energieffektivitet med under 3 % af synligt lys i den udstrålede energi. Dette svarer til en meget lav energieffektivitet på under 5 lm/W. Da man ændrer lysets farvetemperatur ved at dæmpe glødepærene, regulerer man i stedet lyset i monterne ved at regulere antallet af pinolglødepærene. Hver montre er monteret med omkring 20-30 pinol glødepærene. DONG Energy har målt energiforbruget og transformeren i hver montre har et egetforbrug på 30 W, og afhængigt af antallet af installerede pinolglødepærene er det samlede effektforbrug på 130 – 150 W for hver montre. Der er 29 montre i skatkammerets tre sektioner, hvilket giver et samlet effektforbrug til montrebelysningen på omkring 4 kW.

Den store del af infrarødstråling eller varmestråling fra glødepærene giver anledning til opvarmning af monterne i løbet af en dag, hvor glødepærene er tændt. Temperatur forskellen i løbet af en dag er i området på 9-12 °C. Dette giver problemer med at holde luftfugtigheden konstant i monterne. En varierende luftfugtighed er et problem for udstillede følsomme objekter af tekstiler eller træ. Der findes et luftregulering system, men det giver problemer med støv i monterne.

Levetid af pinol glødepærene er kort < 1000 timer og p.gr.a. det store antal af lyskilder i systemet ligger der et stort arbejde i at skifte pærene. Det er samtidigt et meget dyrt arbejde, da det er høj sikkerheds montre med alarmsystemer, og det er chefkonservatoren, Hazze Nyström selv, der står for udskiftningen af pærene.

Undersøgelse af LED alternativ

Da projektet blev startet i 2007 kunne høj effekts varm hvide LEDs fås med en korreleret farvetemperatur ned til omkring 2900 K og med en god farvegengivelse givet med et Ra-indeks på omkring 90. Det er disse LEDs der er benyttet i en anden udstilling i Rosenborgs kælder. Udviklingen har gået imod stadig stigende lysstrøm og effektivitet og udvalget af hvide LEDs er blevet udvidet betydeligt. Man kan i dag få hvide LEDs, der dækker alle farver af hvidt lys fra 2700 K til 6500 K, som beskrevet i ANSI standarden⁴. Men der findes ikke høj effekts LEDs med den her ønskede korrelerede farvetemperatur på omkring 2200 K, og udviklingen vil ikke gå imod

udvikling af denne type LED, da det ikke vil være et produkt, der kan benyttes til generel belysning. Kommercielt tilgængelige varm hvide LED lyskilder og belysningsystemer fås derfor i dag med korrelerede farvetemperaturer ned til omkring 2700 K.

Farveblandings eller såkaldt RGB teknologi med blanding af lys fra forskelligt farvede LEDs giver mulighed for at design af lyskilder med en speciel farvesammensætning og farvegengivelses egenskaber. Dette er blandt andet undersøgt og beskrevet i PSO projektet "Energibesparelser med diodelys"¹, hvor LED lyskilder med glødepære og dagslys farvesammensætning og højt Ra-indeks blev udviklet. DTU Fotonik, Risø har udviklet et LED lys demonstrationssystem bestående af to ens demonstrations lys bokse, hvor der i den ene er en computer styret LED lyskilde med forskelligt farvede LED og hvide LEDs. I den anden boks er det muligt at installere en reference lyskilde som man ønsker at sammenligne LED belysningen med. Dette er et rigtig godt værktøj i udviklingen af special designet LED belysning til specielle anvendelser, hvor det er det visuelle synsindtryk af objekter, der giver den egentlige vurdering af lyskvaliteten. Disse er benyttet i udviklingsarbejdet i projektet og computer beregninger og simuleringer af mange forskellige farvesammensætninger af LED lys er blevet implementeret i demonstrationsboksen. På Figur 5 ses de to demonstrations bokse i en opsætning i skatkammeret på Rosenborg, hvor guldobjekter fra monterne blev benyttet til visuel vurdering af lysets farve og farvegengivelses egenskaber.



Figur 5 DTU Fotoniks LED demonstrations lysboks i skatkammeret til visuel undersøgelse af farvegengivelsen af guldobjekter fra monterne i forskellig belysning. I lysboksen til venstre genereres forskellige farvesammensætninger af LED lys, som kan sammenlignes med den nuværende belysning med pinolglødepærer som er installeret i lysboksen til højre. Den kraftige rødlige farve der observeres på fotoet i boksen til højre skyldes infrarødt lys der ikke er synlig, men som Digital SLR kameraet registrerer.

Der er lavet et omfattende karakteriserings og computer simulerings arbejde med spektral design af LED lyssammensætninger for at opnå den ønskede lave korrelerede farvetemperatur på omkring 2200 K og med et så højt farvegengivelses Ra-indeks som muligt. Der er udover en optimering af det generelle Ra-indeks, været fokuseret på en optimering af de specifikke Ra-indeks, Ra_9 og Ra_{10} , som angiver farvegengivelsen af kraftigt røde og gule objekter.

Beregningerne har været baseret på kommercielt tilgængelige enkelt farvede og hvide LEDs og på specielle LED clusters fra Osram (Ostar RGBW og Krios system), hvor forskelligt farvede LEDs og hvide LEDs er samlet i enheder, hvor de enkelte LED chips sidder meget tæt. Alle disse forskellige på forhånd designede LED lys farvesammensætninger blev sat op i demonstrationsboksen til venstre og blev sammenlignet med den nuværende pinolglødepære belysning, som var installeret i demonstrationsboksen til højre. Et højt beregnet Ra-indeks for en sammensætning af LED lys skulle gerne i den visuelle undersøgelse kunne observeres som stor overensstemmelse af belysningen og farvegengivelse af objekterne i de to demonstrations bokse. Dette var tilfældet for en bestemt type af farveblandingsløsning og det blev ud fra disse undersøgelser valgt hvilken LED sammensætning, der skulle benyttes i det nye LED belysningssystem.

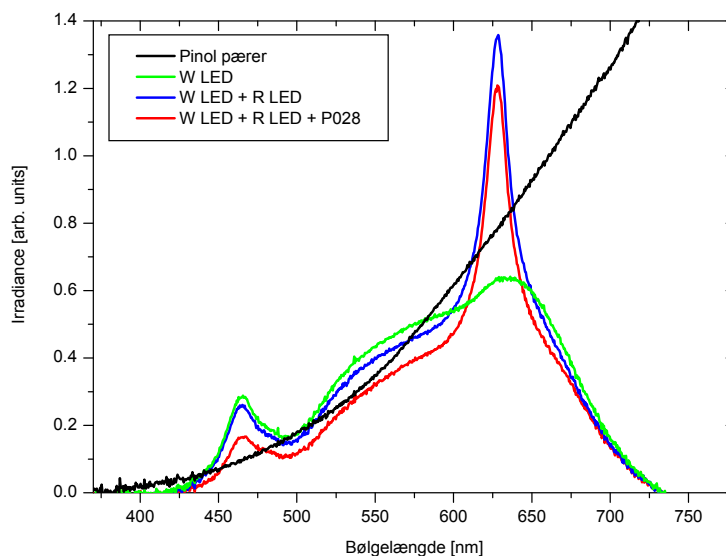
Som et eksempel på disse undersøgelser er der i Figur 6 vist en række billeder af guldoobjekter placeret i LED demonstrationsboksen. Foto a. viser belysning med en kommercielt tilgængelig varm hvid LED. Denne belysning opfattes som værende for kold hvid og det er langt fra den ønskede rødlige glød i fremtoningen af guldoobjekterne.



Figur 6 Fotos af guldoobjekter fra Rosenborgs skatkammer belyst med computerstyret LED system i demonstrations boksen. Foto a. viser belysning med en kommercielt tilgængeligt varm hvid LED og fotoene herefter b. - f. viser en gradvist øgning af det gult røde indhold af spektralfordelingen af lyset, med indikering af korreleret farvetemperatur (CCT) og Ra-indeks (CRI) for hver indstilling.

På fotoene derefter (b. - f.) vises objekterne i LED belysninger hvor lyset fra den varm hvide LED i a. gradvist er ændret ved at øge energiindholdet af gult og rødt lys i spektralsammensætningen. Det ses at det på denne

måde er muligt at sænke den korrelerede farvetemperatur og samtidig øge Ra-indekset, og det kan ses hvordan guldoobjekterne får en stadig mere rødlig fremtoning. LED belysningen i f. giver den ønskede belysning af guldoobjekterne, som med øjet er svær at skelne fra belysningen i referenceboksen med pinolglødepærer. Her er der også benyttet et varm tone filter til at sænke den blålige del af lyset. Det er i princippet denne farvesammensætning af LED belysningen, der er arbejdet videre med i projektet og som det nye LED belysningssystem er baseret på. De målte spektralfordelinger af nogle af de forskellige benyttede LED belysninger i Figur 6 er vist i Figur 7.



Figur 7 Målt og normaliseret irradians for hhv. pinol glødepære (sort linie), varm hvide LEDs (grøn linie), blandet med røde LEDs (blå linie) og blandet med røde LEDs og korrigeret med varm tone filter (rød linie).

Den sorte kurve viser spektralfordelingen ved brug af pinolglødepærer, som har en farvetemperatur på omkring 2214 K og det er denne spektralfordeling som der ønskes en LED erstatning for. Den grønne kurve viser spektret for de varm hvide LEDs, som har en for høj korreleret farvetemperatur på 2959 K. Den blå kurve viser spektralfordelingen når de varm hvide LEDs er kombineret med rødt LED lys og har en korreleret farvetemperatur på 2379 K og et meget højt Ra-indeks på 95. Den røde kurve viser spektralfordelingen ved filtrering af lyset med et varm tone filter. Det ses at den blå del af spektret dæmpes forholdsvis mere end den røde del af spektret. Herved er opnået den ønskede korrelerede farvetemperatur på 2200K, hvilket svarer til pinolglødepære belysningen. For denne belysning er opnået et meget højt generelt Ra-indeks på 95 og høje specifikke Ra-indeks, Ra_9 og Ra_{10} på hhv. 88 og 99 for kraftigt røde og gule objekter.

Det ses endvidere af Figur 7 at varmestrålingen i de undersøgte LED spektralfordelinger er langt under den i pinolglødepære lyset. Hvis man blot ser på energimængden imellem 700 og 800 nm er energiindholdet under 2 % i LED spektralfordelingerne af den i pinolglødepære spektralfordelingen. Og der er langt mere varmestråling fra pinolglødepærene over 800 nm.

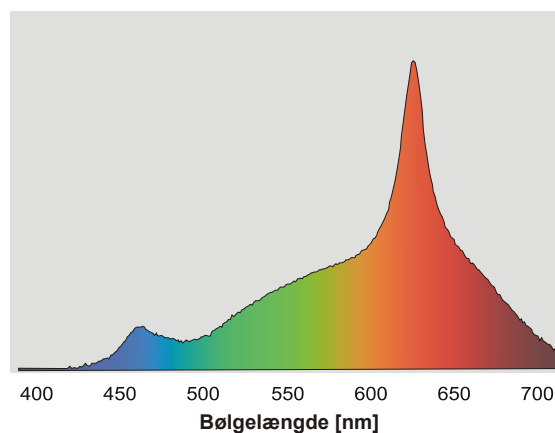
Det er således vist at det er muligt at designe en LED belysning som har den ønskede lyskvalitet, med hensyn til farvetemperatur og farvegengivelse, og det er eftervist og godkendt igennem visuel inspektion og sammenligning med pinolglødepære belysningen.

Nyt LED system

Der har i løbet af projektperioden været arbejdet med en række forskellige LED sammensætninger og optiske systemer til realisering af den i det foregående afsnit beskrevne spektralsammensætning af LED lyset. Der er i projektet udviklet et LED belysningsystem, som er opsat til test og demonstration i montren i 1. sektion af skatkammeret. Det består af fire aluminiums skinner hvori der er monteret 12 stk. LED belysnings enheder. Aluminiumsskinnerne sikrer en god varmeledning af overskudsvarmen fra LED enhederne og sikrer en god effektivitet og levetid af systemet.

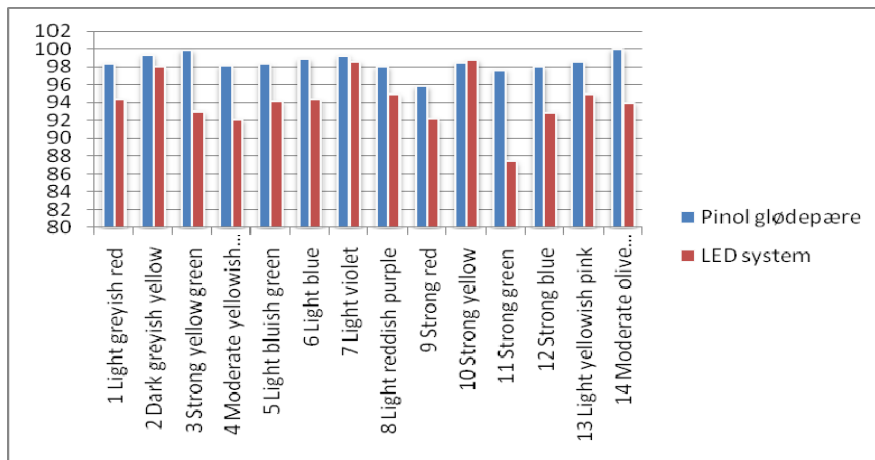
Farvegengivelse

I grafen på Figur 8 er vist den målte spektralfordeling af lyset fra en LED enhed i det nye LED belysningsystem. LED systemet består i princippet af en varm hvid og en rød LED samt et filter der giver en varm toning af lyset.



Figur 8 Målt spektralfordeling af lyset fra en LED enhed i det nye LED montrebelysnings system.

Denne spektralfordeling af lyset har en korreleret farvetemperatur på ca. 2200 K og et højt generelt Ra-indeks på 94.9. For bedre at kunne vurdere farvegengivelsen i forhold til pinolglødepærene af en række forskellige farvede objekter er der i Figur 9 vist et søjlediagram, som viser de målte specifikke Ra-indeks (1..14) for LED systemet og pinol glødepærene. Læg mærke til at skalaen for Ra-indekset er fra 80 til 100, som er den maksimale værdi. For pinolglødepæren er de specifikke Ra-indeks alle over 96, da dens spektralfordeling er meget tæt på den ideelle temperatur stråler. Det ses at for LED systemet er de specifikke Ra-indeks for alle test farveobjekterne over en værdi på 92, undtagen for nr. 11 kraftig grøn hvor den er på 87. Dette viser at der er meget stor overensstemmelse imellem farvegengivelsen af forskellige farvede objekter i lyset fra LED systemet og pinolglødepære belysningen. Den høje overensstemmelse er ikke fundet for nogen af de andre typer af undersøgte LED farveblandingsløsninger.



Figur 9 Søjlediagram, der viser de målte specifikke Ra-indeks (1..14) for hhv. pinolglødepærer og for det nye LED belysningsystem. Da begge lyskilder har meget høje specifikke Ra-indeks er skalaen på den lodrette akse for Ra-indekset fra 80 til 100, som er den maksimale værdi og svarer til en ideel temperaturstråler ved 2200 K.

Et af problemerne med LED systemer, der baserer sig på farveblanding eller RGB teknologi, er at sikre at den ønskede spektralfordeling og høje lyskvalitet som beskrevet herover opnås over hele udstrålingsfeltet fra LED systemet. En af ulemperne ved systemer, der ikke er gode nok til dette, er at der ses farvede skygger bag belyste objekter. Selv LED cluster løsninger, hvor de farvede LED chips sidder meget tæt sammen, giver problemer i den retning og det har været et problem i den første opsætning af belysningen i demonstrationsmontren i skatkammeret.

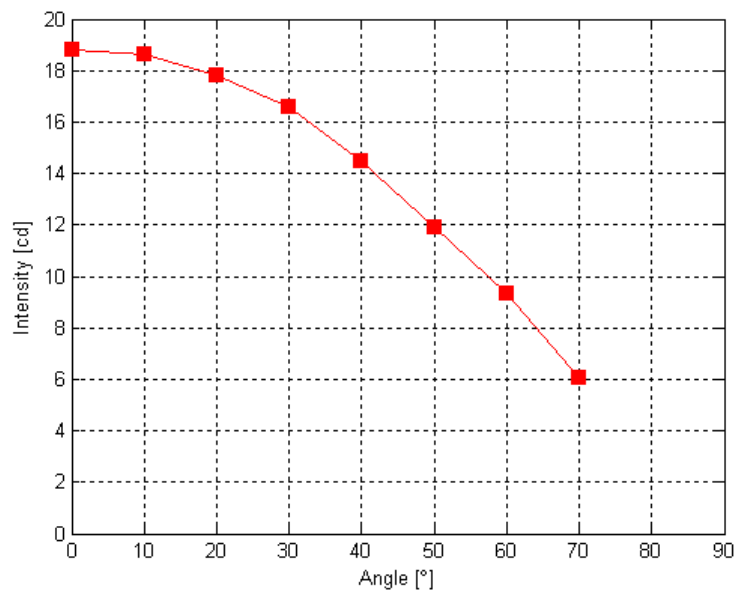
Optisk system til farveblanding

For at afhjælpe problemet med farvede skygger i monterne er der designet og udviklet et nyt optisk system til blanding og filtrering af lyset fra de to typer af LEDs i systemet. Der er indsendt en patentansøgning på LED belysningsystemet med hovedvægt på det optiske system til blanding og filtrering af lyset. Dette er gjort for at sikre kommercialiseringen af LED belysningsystemet. Da patentansøgningen endnu ikke er offentliggjort er det optiske system ikke beskrevet i detaljer i denne rapport.

Her ses der nærmere på kvaliteten af det blandede lys, som kommer ud af det LED optiske system. Systemet er udviklet til at give en perfekt blanding af lyset fra flere forskelligt farvede LEDs, således at der ikke ses farvede skygger bag objekter der belyses. Det nye LED montage belysnings systems egenskaber med hensyn til farvede skygger er undersøgt ved visuel inspektion og ved målinger af lyskvaliteten som funktion af udstrålingsvinklen.

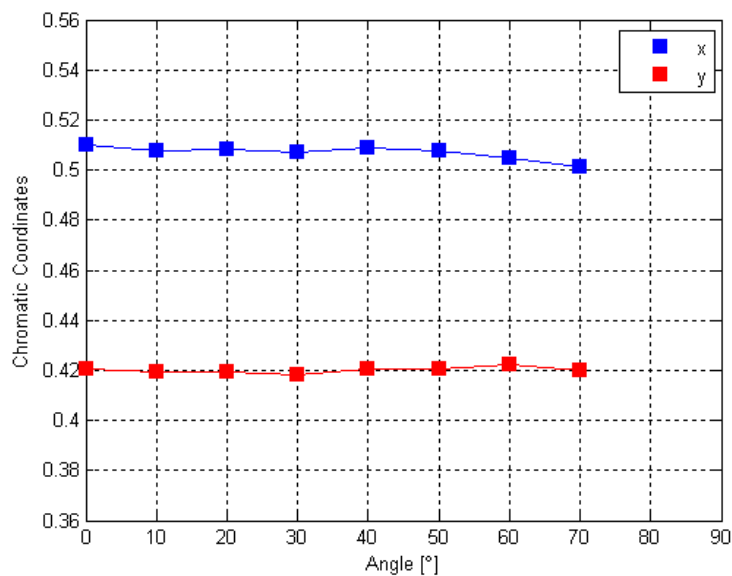
En enkelt LED optisk enhed er monteret i en goniometer opstilling, således at den kan drejes omkring et omdrejningspunkt placeret i udgangsaperturen af det optiske system. I en afstand på 0,5 m er målt den spektrale fordeling af irradiansen i $[W/m^2nm]$. Herudfra kan intensiteten eller lysstyrken i $[cd]$ beregnes, og ligeledes lysets farveegenskaber som farvekoordinater, korreleret farvetemperatur og Ra-indeks som funktion af vinklen.

På Figur 10 er vist den målte intensitet som funktion af udstrålingsvinklen. Det ses at udstrålingsfordelingen svarer til en cosinus fordeling, hvor lysstyrken er faldet til halvdelen af den maksimale lysstyrke i en vinkel på 60° . Det er således en diffus udstråling med en total udstrålingsvinkel på 120° .



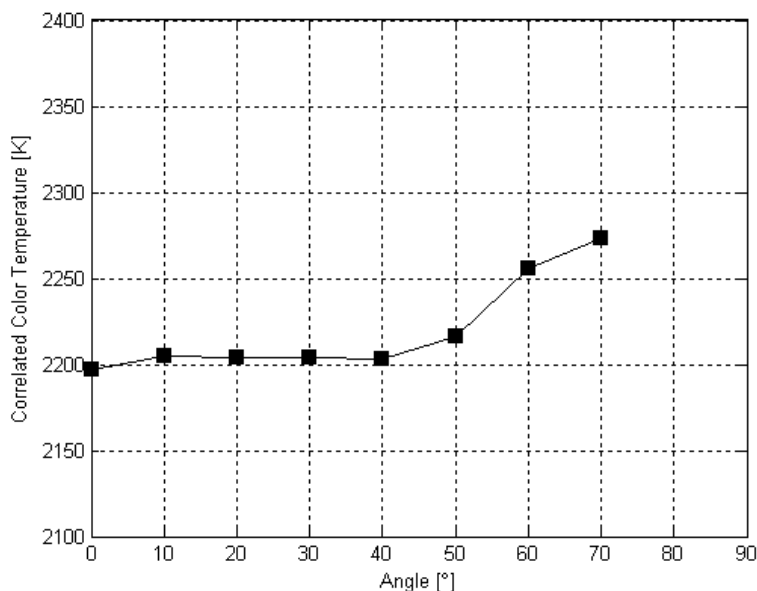
Figur 10 Målt intensitet som funktion af udstrålingsvinklen foren enkelt LED enhed i det nye montrebelysnings system.

Hvis lyset fra de forskellige farvede LED ikke er blandet godt nok, vil der kunne ses variationer i lysets farveparametre som funktion af vinklen. I Figur 11 er vist de beregnede farvekoordinater x og y svarende til CIEs 1931 kromatisitets diagram som funktion af udstrålingsvinklen.



Figur 11 Målte farvekoordinater x og y, svarende til CIEs 1931 kromatisitets diagram, som funktion af udstrålingsvinklen for lyset fra en enkelt LED enhed i det nye montrebelysnings system.

Det ses at y-kordinaten er meget stabil over hele det målte vinkel område, hvorimod der ses en lille aftagen i x-kordinaten ved store vinkler over 60°. Dette svarer til at synsindtrykket af lyset ændres meget lidt mod det blålige eller mindre rødlige område. Dette giver sig også til udtryk i den målte korrelerede farvetemperatur af lyset som funktion af udstrålingsvinklen, som er vist i Figur 12.



Figur 12 Målt korreleret farvetemperatur som funktion af udstrålingsvinklen for lyset fra en enkelt LED enhed i det nye montrebelysnings system.

Her ses netop at den korrelerede farvetemperatur af lyset er stabil på den ønskede værdi omkring 2200 K for udstrålingsvinkler op til 50°, og for større vinkler ses en lille øgning og ved 70° er målt en korreleret farvetemperatur på 2270 K. Denne variation for de store vinkler er ikke synlig ved visuel inspektion og det er vurderet at det ikke har nogen praktisk betydning, da lysstyrken er faldet til under det halve af den maksimale lysstyrke ved de store vinkler, se Figur 10.

Det udviklede optiske system har en optisk effektivitet på 50-60%. Dette er en lav optisk effektivitet i forhold til normale linser og diffusere, hvis effektivitet ligger i området 80-90%, men det sikrer en god blanding af lyset fra de forskelligt farvede LEDs, der indgår i systemet og sikrer derved at der ikke ses farvede skygger bag de belyste objekter i monterne.

Effektivitet af det nye LED system

Effektiviteten er målt via total udstrålingsmålinger, og det viser, at de enkelte LED belysnings enheder i det nye LED system udsender ca. 50 lm ved et effektforbrug på ca. 2.1 W, svarende til en effektivitet på ca. 24 lm/W. Denne lave energieffektivitet af LED enhederne hænger sammen med den meget lave korrelerede farvetemperatur, som kræver et højt energiindhold af rødt lys og at det optiske farveblanding system har en meget lav effektivitet på omkring 50-60 %. Alligevel har LED belysnings enhederne en ca. 5 gange højere energieffektivitet end pinolglødepærerne.

Det nye LED system har yderligere den fordel, at det sender al lyset ud i et halvrum med en udstrålingsvinkel på 120°. Pinolglødepærerne sender lyset ud i alle retninger i hele rummet og i et skinnesystem vil man skulle have en reflektor bag pærerne for at få en god effektivitet af udstråling i den ønskede retning. Dette giver LED systemet en yderligere effektivitets fordel i forhold til pinolglødepære belysningen.

På Figur 13 er vist to montre i skatkammerets 1. sektion. Montren til venstre er med pinolglødepære belysning og montren til højre er demonstrations montren med det nye LED belysningssystem installeret.



Figur 13 Sammenligning af belysningen i to montre i skatkammerets 1. sektion. Montren til venstre er med pinolglødepære belysning og montren til højre er demonstrations montren med det nye LED belysningssystem.

Der er installeret fire LED belysningskinner med fire LED enheder på siderne og to LED enheder i hhv. top og bund af montren. LED enhederne er monteret i et aluminiums skinne system, som sikrer en god varmeafledning fra LED enhederne og sikrer at LEDerne opereres ved en tilpas lav operationstemperatur. Dette sikrer en høj effektivitet og levetid af LEDerne i systemet.

Det nye LED belysningssystem er forsynet med en strømforsyning og en programmeret driver fra I-No, som gør det muligt at regulere belysningsstyrken i montren til det ønskede niveau uden at ændre på lyskvaliteten. Dette er en stor fordel i forhold til pinolglødepære systemet, hvor dæmpningen skete igennem regulering af antallet af pærer.

Da monterne er beklædt indvendigt med et flot kongebåt stof, er der arbejdet videre med at tilføje lidt blå lys i LED systemet, for at kunne gengive dette stofs flotte blå farve. Dette sænker LED systemets farvegengivelses egenskaber lidt, givet ved de specifikke og det generelle Ra-indeks, men det giver en ny dimension til monterne, da denne blå farve ikke tidligere er kommet til sin ret, da lyset fra pinolglødepærerne kun indeholder en meget lille andel af blå lys. Det er dog vigtigt at have for øje at indholdet af det energirige blå lys ikke bliver for højt, da det har en nedbrydende effekt på objekter i stil med ultraviolet-lys.

I montren med pinol glødepære belysningen er effektforbruget på ca. 130 W, hvor transformeren har et egetforbrug på 30 W. Afhængig af indstillingen af belysningsstyrken fra LED systemet har dette et effektforbrug på omkring 30 - 35 W. Dette svarer til en energibesparelse mere end 70 %. Det vigtige her er at

energibesparelsen kan opnås uden at gå på kompromis med lyskvaliteten. Derudover reducerer LED systemet varmestrålingen i monterne til under 2 % af hvad den er i montre med pinolglødepærer. Temperaturmålinger på tilsvarende montre med LED belysning har vist temperaturstigninger på kun omkring 1° i løbet af en dag. Dette vil reducere problemerne med at holde luftfugtigheden konstant i monterne, som er med til at sikre en lang levetid af skrøbelige udstillingsobjekter.

PinolLED

Udenfor projektet arbejdes der videre med udviklingen af det nye LED montrebelysnings system, som har fået navnet "PinolLED". Det sker i et samarbejde imellem de tidligere projektpartnere Lumodan, DTU Fotonik, DKKS og design firmaet Kvorning Design & Kommunikation og LED elektronikfirmaet I-No.

Denne gruppe har med Hazze Nyström, DKKS, i spidsen søgt fondsmidler til at installere det nye LED belysningssystem PinolLED i hele skatkammeret på Rosenborg. I første kvartal 2010 har Velux Fonden bevillet et beløb til videreudvikling, fremstilling og installation af systemet i skatkammerets 29 montre. LED systemet installeres over to omgange og skal være fuldt installeret ved udgangen af 2010. Når LED systemet er installeret vil der være opnået en energibesparelse på 10.600 kWh om året, svarende til en besparelse på kr. 21.600,- . Dette er baseret på en konservativ beregning på skatkammerets 29 montre, som antages tændt i 9 timer om dagen hele året, og en energipris på kr. 2,- pr. kWh. Besparelsen på vedligeholdelse i form af udskiftning af lyskilder anses at kunne udgøre en væsentlig større besparelse, p.gr.a. LED enhedernes meget længere levetid.

Derudover findes en stor række af andre armaturer på såvel Rosenborg som Amalienborg, som vil kunne erstattes af dette nye LED belysningssystem. Projektgruppen har været i kontakt med flere interesserede museer fra Danmark bl.a. igennem et foredrag ved Kulturhistorisk orienteringsmøde 2009, arrangeret af Organisationen af Danske Museer. Der har også været stor opmærksomhed fra museer i Sverige og Norge og det er planen at iværksætte et formidlings og demonstrations arbejde overfor disse interessenter.

Det nye LED belysningssystem er interessant til andre udstillingsmontre i f.eks. smykke forretninger. Projektgruppen har i samarbejde med I-No installeret LED belysningssystemet i en udstilling montre fra Ole Lynggaard Copenhagen. Denne montre med Lynggaard Copenhagen's smykker har været udstillet ved DTU Fotonik og Elsparefondens LED konference i Ingeniørhuset, København i december 2009, og ved COP 15 udstilling i Forum, København også i december 2009. Udstillingen med en poster til beskrivelse af projektets resultater omkring montrebelysning har givet meget og god respons fra interesserede.

Emhættebelysning

En emhætte bruges ofte til mere end blot at fjerne em. Belysningen i emhætten benyttes både som arbejdsbelysning og til grundbelysning i et køkken. Ved madlavning og specielt ved vurdering af madvarers tilstand/friskhed og køds gennemstegthed er en god farvegengivelse af lyset af meget stor betydning. For at få et fornuftigt arbejdsmiljø, bør emhætten som minimum kunne levere 200 lux på alle fire kogeplader, men helst 500 lux som anbefalet i DS700 for arbejdsplads belysning. Placeringen af lyskilder i emhætter er ofte udført således at belysningen er ujævn og kun nogle af pladerne er oplyst.

Erfaringer gjort med det nuværende marked er, at effektforbruget på emhætterne ligger på op til 80 Watt for lyset alene. Den benyttede teknologi er oftest gløde- eller halogenlyskilder, som begge har et meget lavt lysudbytte i forhold til deres effektforbrug. Dette er også grunden til at gløde- eller halogenlyskilder i løbet af de kommende år vil blive udfaset i EU. Udfasningen startede i september 2009 og indenfor en kort årrække vil det ikke være muligt at købe mange af de lyskilder, der i dag benyttes i emhætter. For mere information om denne udfasning henvises til Dansk Center for Lys informations materiale². Det er derfor vigtigt at finde et godt energibesparende alternativ til disse lyskilder. Flere producenter har forsøgt at implementere sparepærer i deres produkter. Ulempen ved disse er, at farvegengivelsen er dårlig, givet ved et egentligt højt generelt Ra-indeks på 80-85, men også ved at lysets spektralfordeling ikke er kontinuert over det synlige spektrum. Det består i princippet af et antal kraftige smalle spektrallinier, imellem hvilke der ikke er nogen nævneværdig energi. Dette gør at objekter og madvarer ikke ser helt naturlige ud og gør det svært at vurdere f.eks. gennemstegtheden af kød og lignende.

LED lyskilder er med deres høje energieffektivitet og lange levetid en mulig alternativ lyskilde til gløde- og halogenlyskilder. I dette afsnit undersøges forskellige typer af LED lyskilder som alternative lyskilder til en demonstrations emhætte fra Thermex. Først beskrives den eksisterende halogen belysning med hensyn til farve, farvegengivelse og effektivitet. Dernæst beskrives LED baserede alternativer og der fokuseres på en kommerciel tilgængelig LED lyskilde, og en i projektet ny udviklet LED lyskilde med farve kontrol (CC for color control) til optimering af farve og farvegengivelse. Lyset fra disse LED lyskilder beskrives og sammenlignes med halogen lyskilderne med hensyn til farve, farvegengivelse og effektivitet.

Endvidere beskrives en ny opstilling, som er udviklet til test og karakterisering af emhætte belysning. Denne giver mulighed for måling af lysfordelingen og specificering af lyskildernes anvendelses effektivitet, i form af det leverede lys på arbejdsfladen i forhold til effektforbruget. Denne opstilling benyttes til at karakterisere halogen belysningen og belysningen med de nye LED lyskilder installeret i demonstrationsemhætten, og sammenligne deres lysfordelinger og anvendelses effektiviteter.

Demonstrations emhætte

Det er fra Teknologisk Institut og Thermex side valgt at se på en emhætte af typen Thermex Decor 600 væghængt, som er 60 cm bred. Den er blevet testet på Teknologisk Institut og figurerer på spareemhætte listen som er tilgængelig på www.spareemhaette.dk, som er et resultat af projektet "Analyser og kriterier for energimærkning af emhætter, byggende på udsugningseffektiviteten" (PSO 336-04)⁵.

Tabel 1 Resultater af Teknologisk Instituts test af Thermex Decor 600 væghængt emhætte, fra www.spareemhaette.dk

Producent	Model	Indst. [-]	Ventilator type	Flow [m ³ /h]	Sugeevne [%]	Effektforbrug med lys	Effektforbrug uden lys	Lysstyrke gennemsnit	Lyd
Thermex	Decor 600	3	intern	331	87	162	111	436	

Det ses heraf at emhættens effektforbrug til lys er på 51 W, hvilket udgør ca. 30 % af det samlede effektforbrug. Der er derfor et behov for at finde alternative lyskilder, som kan give den ønskede lyskvalitet med et lavere energiforbrug. I det følgende er de nu anvendte halogen lyskilders lyskvalitet og effektivitet beskrevet og de er sammenlignet med alternative LED lyskilder. Der ses på en kommerciel LED lyskilde og to udgaver af en i projektet udviklet ny LED lyskilde med gode farvegengivelses egenskaber. Sidst er de forskellige belysningssystemer testet og karakteriseret ved måling af deres lysfordeling og effektivitet på arbejdsfladen under emhætten.

Halogen spot lyskilder

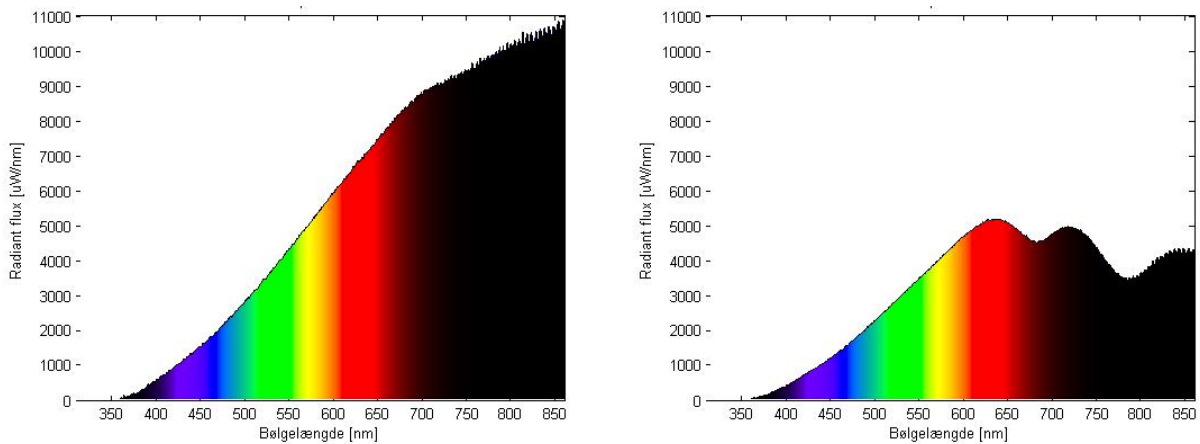
Emhætten er udstyret med to monterings huller til lyskilder, de sidder med en afstand på ca. 48 cm og med en afstand fra væggen på ca. 24 cm. De er fra Thermex side monteret med to halogen spot lyskilder, se Figur 14. Det er 12 V MR16 lyskilder med GU5.3 sokkel og med et effektforbrug på 20 W. Udstrålingsvinklen er på 38°. Lyskilderne har en diameter på 50 mm og er monteret i en kipbar holder således at lyskilderne kan drejes i den ønskede retning.



Figur 14 Foto af halogen spot lyskilde, der er monteret i Thermex emhætten.

Der er foretaget en lysteknisk karakteriserings måling af halogen lyskilderne i DTU Fotoniks LED LYS Laboratorium. Den totale lysstrøm fra lyskilden er målt som funktion af bølglængden i en integrerende kugle opstilling med et fiberkoblet spektrometer. Ved at montere lyskilden i centrum af kuglen måles den sande totale lysudstråling svarende til hele rummet (4π). En anden mulighed der ofte benyttes til LED lyskilder er at placeres lyskilden i en portåbning på siden af den integrerende kugle således at den fremadrettede lysudstråling fra lyskilden måles, svarende til udstrålingen i et halvrum (2π). For en mere uddybende beskrivelse af målemetoden henvises til rapport for PSO projektet "Kvalitetsvurdering af LED lyskilder og armaturer"⁶.

De målte totale spektralfordelinger i disse to konfigurationer er vist på Figur 15, hvor det ses at der er meget stor forskel i farvesammensætningen af lyset. Dette skyldes at en del af lyset bortfiltreres i lyskildens frontglas. Se målerapport i appendix A.



Figur 15 Målt total strålingsstrøm som funktion af bølglængden for en 20 W halogen spot lyskilde til emhætten, hvor der hhv. måles i en 4π (venstre graf) og en 2π (højre graf) konfiguration. Det ses at det fremadrettede lys fra halogenlyskilden er filtreret således at det ikke indeholder så meget infrarød- eller varme-stråling.

Lysene der benyttes i emhætten og sendes ned på arbejdsfladen er netop det fremadrettede lys, som er målt i 2π konfigurationen. Det bortfiltrerede lys, som er rødt og infrarødt lys, går tabt i det indre af emhætten.

Den totale fremadrettede lysstrøm er målt til at være 271 lm og den afsatte effekt er 21.5 W svarende til en effektivitet på 12.6 lm/W. Den korrelerede farvetemperatur af lyset fra halogen spot lyskilden er 3034 K og det generelle Ra-indeks er 95.6. Farvegengivelsen er således ikke så høj som for lys fra normale gløde/halogen lyskilder som f.eks. målt i 4π konfigurationen i Figur 15. Dette lys har et Ra-indeks på 99. Den lidt dårligere farvegengivelse af det fremadrettede lys fra denne halogenlyskilde ses specielt på det specifikke Ra-indeks for det kraftigt røde standard objekt Ra₉, som kun er 77.5, hvilket betyder at klare røde farver ikke gengives som under en ideel temperatur stråler, som er tæt på en normal halogen lyskilde.

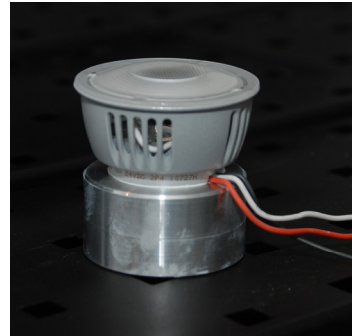
Halogenlyskilderne har en udstrålingsvinkel på 38° , hvilket giver en kraftig spot belysning af to områder på arbejdsfladen under emhætten. Se mere om dette i afsnit om lysfordeling. Effektforbruget af emhætten kun med lyset tændt er målt til at være 54.3 W, hvilket er lidt højere end den værdi der udledes af effekt angivelserne i positivlisten for denne emhætte.

LED baserede erstatningslyskilder

På markedet findes der efterhånden et meget stort udvalg af LED baserede erstatningslyskilder, som er fremstillet med de forskellige typer af sokler/fatninger og som kendes fra de traditionelle lyskilder. 12 V LED lyskilder af typen MR16 med GU5.3 sokkel har en ydre dimension på 50 mm i diameter som halogen spot lyskilderne og de passer i den benyttede fatning og i de klibbare lyskilde holdere i emhætten. Effektiviteten af disse produkter har under projektperioden fra 2007 til 2010 udviklet sig meget kraftigt med lidt mere end en fordobling. Således lå niveauet for energieffektiviteten i området 10-20 lm/W i 2007⁶, medens LED lyskilder fra det sidste kvartal i 2009 og første kvartal i 2010 udviser energieffektiviteter i området 40-50 lm/W. Disse værdier er for varm hvide LED lyskilder som matcher halogen lyskildernes farvetemperatur.



Figur 16 Foto af 12 V MR16 LED baseret erstatningslyskilde som ville kunne indsættes i emhætten.



Figur 17 Foto af Osram ostar coinlight, der er afprøvet i emhætten.

Disse LED lyskilder fås med forskellige udstrålingsvinkler og også med en udstrålingsvinkel på ca. 40° hvilket svarer til udstrålingsvinklen på 38° for halogen spot lyskilderne. De fås med lidt varierende effektforbrug, men det ligger fortrinsvist i intervallet fra 3-5 og måske op til 6 W. Det gør at den totale lysstrøm fra disse lyskilder ligger i området 150 – 250 lm, lidt afhængigt af farvetemperaturen og farvegengivelsen. En bedre farvegengivelse for kraftigt røde objekter giver generelt en lavere effektivitet. Lysstrømmen fra disse LED lyskilder er således lidt mindre end de 271 lm som vi har målt for 20 W halogen spot lyskilden. Lysstrømmen fra disse LED lyskilder ligger altså lige i underkanten af hvad halogen lyskilde udsender.

At disse lyskilder ikke har en højere lysstrøm skyldes det ikke er muligt at have et højere effektforbrug i denne størrelse LED baserede erstatnings lyskilder, da de ellers bliver for varme. Som det kan ses af Figur 16 har disse en aluminiums køleprofil på siderne for at komme af med den varme, der udvikles i LEDerne. Disse lyskilder skal derfor sidde frit således at varmen kan overføres til omgivelserne. Der vil derfor være et problem med varmen, når de indsættes i emhætten, da der her ikke er en fri luftstrøm, og det vil resultere i en højere driftstemperatur af LEDerne. Dette resulterer i en reduceret lysstrøm og dermed lavere effektivitet og ikke mindst reduceret levetid. Et andet problem med at benytte denne type lyskilder er at de normalt ikke er egnede til placering og operation i fugtige omgivelser som det vil være i en emhætte.

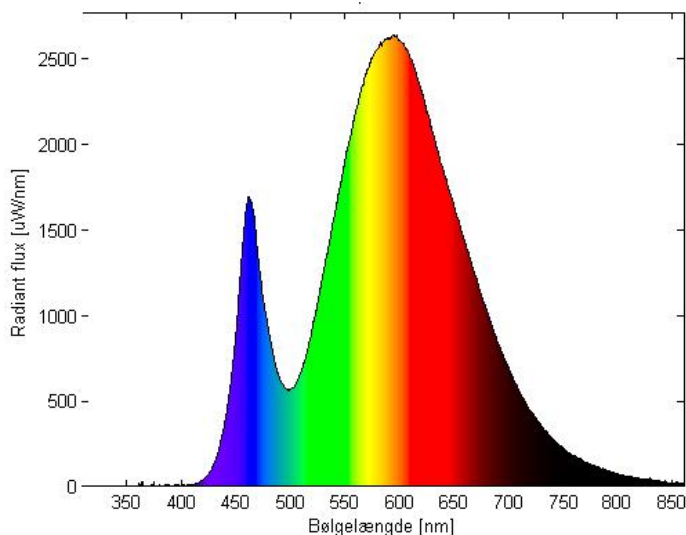
Udfra disse overvejelser konkluderes det at det ikke er muligt at benytte denne type af LED baserede erstatnings lyskilder som direkte erstatning for halogen spot lyskilderne, selv om de i mange tilfælde har en ca. 4 gange højere energieffektivitet.

Osram coinlight

Udformningen af en LED baseret erstatningslyskilde skal derfor være således at det er muligt at øge lyskildens køleareal og eventuelt koble den til emhættens metaldele. Der er god plads til at indsætte et større køleareal i form af aluminiums- profiler eller -plader indvendigt i emhætten.

Osram har i projektet leveret en anden type LED lyskilde som vil være et bedre LED alternativ til halogen spot lyskilderne. Det er en OSRAMs Ostar coinlight som er en 24 V DC lyskilde med et effektforbrug på 12 W med 38° udstrålingsvinkel og en diameter på 50 mm, se Figur 17. Den passer således direkte i den kipbare holder som halogenlys kilderne er monteret i. Lyskilden har ikke en sokkel som passer i en fatning men blot tre ledere som skal forbindes til en 24 V strømforsyning og det er muligt at dæmpe lyset, hvilket i mange tilfælde er en fordel. Hvis den blot indsættes i halogenpære holderen vil den blive for varm og LED lyskildens interne temperatur kontrol vil få lyskilden til at slukke efter et stykke tids operation på ca. 30-60 minutter. Derfor er coinlight lyskilden monteret på en aluminiumsklods som monteres direkte på emhættens rustfristål overflade.

Rustfrit stål giver ikke en speciel god varmeledning, men den er god nok her. Varmeledningsevnen for rustfrit stål er 17 W/mK, hvilket er en størrelsesorden lavere end for Aluminium, som er 220 W/mK. Køleprofiler der udformes i aluminium vil derfor være mere effektive og give en bedre køling. På Figur 18 er vist den målte spektralfordeling fra en Coinlight LED lyskilde.



Figur 18 Målt total spektral irradians fra en Osram Coinlight LED spot lyskilde, som er benyttet i demonstrationsemhætten.

Ud fra spektralfordelingen er det beregnet at Coinlight lyskilden har en korreleret farvetemperatur på 3081 K og et Ra-indeks på 75.1. Det lave generelle Ra-indeks dækker over en meget dårlig gengivelse af kraftige røde objekter givet ved det specifikke Ra-indeks Ra_9 på -7.0. Gengivelsen af klare røde farver er derfor meget forskelligt fra hvordan de ses i tilsvarende glødepærebelysning, og vil ikke virke naturlige.

Thermex emhætten er forsøgsmæssigt monteret med to stk. coinlight LED lyskilder og effektiviteten af denne LED belysning er målt igennem en lysfordelingsmåling på arbejdsfladen, som beskrevet i de følgende afsnit.

Der er siden testen af Coinlight lyskilderne kommet nye versioner af disse lyskilder og de nyeste hedder COINlight Advanced 50 - CA50 se datablad⁷, de har et noget lavere effektforbrug på 7.5 W og er specificeret med en lysstyrke på 510 cd. Denne lysstyrke vil give en belysningsstyrke på arbejdsfladen i en afstand på 60 cm på 1417 lux, hvilket er lidt mere end belysningsstyrken målt på arbejdsfladen med de Coinlight LED lyskilder på 12 W, som kommer op på 1200 lux.

Ny LED lyskilde

Der er i projektet udviklet en ny LED lyskilde som er tilpasset brug i demonstrationsemhætten. LED lyskilden er bygget op omkring et antal varm hvide LEDs og to typer af farvede LEDs i hhv. det blå-grønne og røde spektralområde. Lyskilden kan opereres med eller uden Color Control (CC), dvs. med eller uden korrektion af de varm hvide LEDs spektralfordeling med lyset fra de farvede LEDs. Uden CC svarer lyskilden til en normal varm hvid LED belysning med en korreleret farvetemperatur på 2930 K og en Ra-værdi på omkring 81. Med CC opnås en varm hvid belysning med en korreleret farvetemperatur der kan reguleres i området 2750 - 3300 K med en høj Ra-værdi på over 92. Denne kan således indstilles til den samme korrelerede farvetemperatur som halogen spot lyskilderne eller hvad der ellers ønskes.

Denne skelnen imellem med og uden CC for den nye LED lyskilde vil i det følgende være med til at vise forskellen i effektivitet og lyskvalitet for kommercielt tilgængelige varm hvide LEDs og det nyudviklede LED system optimeret med hensyn til lyskvalitet i form af meget god farvegengivelse.

LED lyskilden er baseret på et aluminiums hus med reflektor enhed, der monteres på en tynd aluminiumsplade til emhættens rustfri stål plader, se Figur 19. Dette sikrer en god varmeafledning fra LEDerne i systemet og dermed en god effektivitet og levetid af disse. Med en afsat effekt LED lyskilderne på ca. 5 W er der målt en temperatur på 50 °C ved LEDerne.



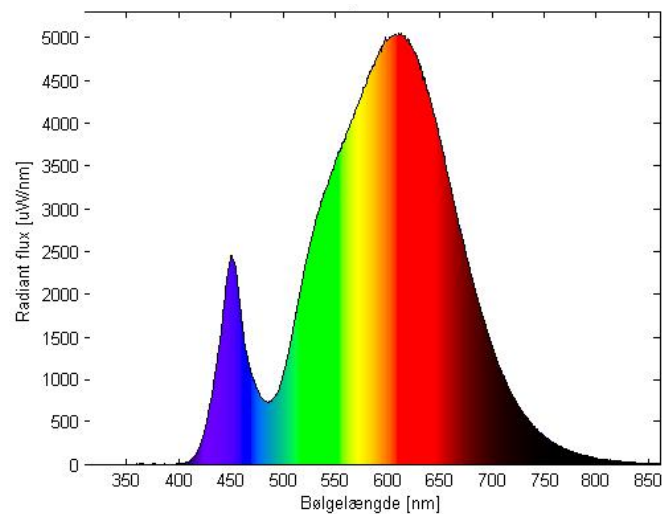
Figur 19 Ny LED lyskilde udviklet til brug i emhætter. Her monteret i demonstrationsemhætten uden diffuser installeret.

LED lyskilden er opbygget med en holografisk diffuser til at blande blødt lyset op og reducere blændingen fra systemet som vil kunne optræde ved refleksion i f.eks. glaskeramiske kogeplader. Det giver en diffus belysning med en udstrålings vinkel på omkring 100°, hvilket er væsentligt større end for halogen spot lyskilderne. Fordelen er at de giver en mere jævn og høj belysningsstyrke over hele arbejdsfladen.

I det følgende ses nærmere på lyskvaliteten for den nye LED lyskilde med og uden CC og den sammenlignes i det følgende afsnit med halogen lyskilderne og Osrams coinlight LED lyskilde med hensyn til farvegengivelses egenskaber og energieffektivitet.

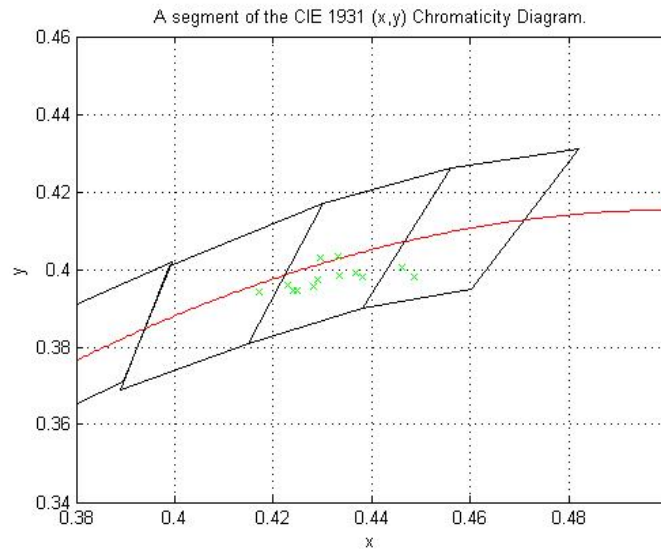
Lyskilden er baseret på en varm hvid LED med en korreleret farvetemperatur på 2930 K og et Ra-indeks på 81.3, hvilket er normalt for bedre varm hvide LEDs. Der er valgt en varm hvid LED med en flux bin der har en minimum luminous flux eller lysstrøm på 80.6 lm, svarende til en effektivitet på 67 lm/W. Dette er en databladsværdi ved 25° operations temperatur, som ikke er realistisk og ved en normal operations temperatur vil effektiviteten af LED lyskilden være lavere.

Når LED lyskilden bruges uden color control (CC), er der målt en total lysstrøm på 260 lm, se målerapport i appendix A. Det var ved et effektforbrug på 5.2 W, svarende til en effektivitet på ca. 50 lm/W. Den målte spektralfordeling for denne LED lyskilden uden CC er vist i Figur 20.



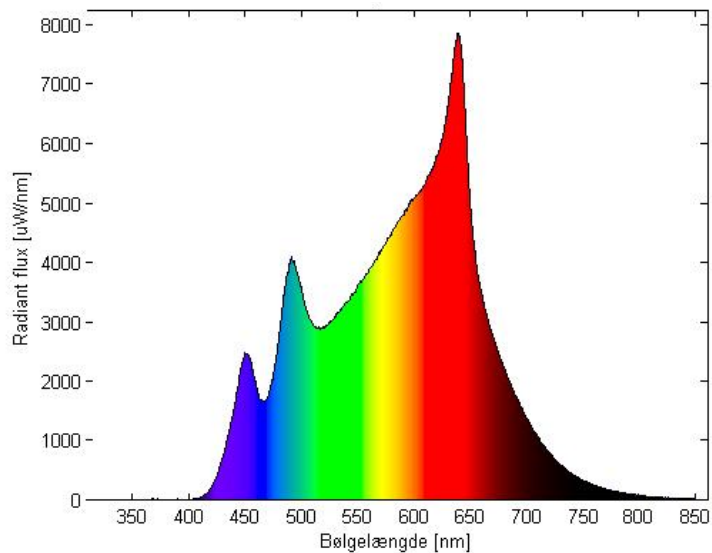
Figur 20 Målt total spektral irradians fra den nye LED lyskilde uden CC.

Ved at benytte color control (CC) og blande lyset fra denne varm hvide LED med lyset fra hhv. en blålig og en rød LED er det muligt at skabe et varmt hvidt lys med en langt bedre farvegengivelse idet der på denne måde skabes en spektralfordeling af lyset som tilføres energi hvor den hvide LED mangler energi og det er netop i den blå-grønne spektralområde omkring 490 nm og i den rødlige del af spektret ved omkring 640 nm. Ved at justere indholdet af lys fra den blålige LED er det muligt at finjustere den korrelerede farvetemperatur af lyset i området fra 2750 K til 3300 K, og samtidig opnå et meget højt Ra-indeks over hele området, som ligger imellem 92 og 96. På grafen i Figur 21 er vist farvekoordinaterne for forskellige indstillinger af den nye LED lyskilde i et udsnit af CIE's 1931 kromaticitets diagrammet. Punkterne ses at ligge meget tæt på hulrumsstråler kurven og ligger alle indenfor den af CIE anbefalede afstand til hulrumstråler kurven, som svarer til hvidt lys fra et opvarmet legeme (som f.eks. en gløde eller halogenpære). De sorte firkanter svarer til ANSI standarden⁴ for kromatisiteten af LED lyskilder. Den første firkant fra højre svarer til 2700 K, den anden til 3000 K og den tredje til 3500 K og det ses at den nye LED lyskilder kan generere lys der ligger i de tre områder, som betegnes som varmt hvidt lys.



Figur 21 Kromaticitets koordinater for lyset fra LED lyskilde med CC ved forskellige indstillinger af farve blandingen, markeret med grønne x. Den røde kurve svarer til koordinater for lys fra ideel temperaturstråling (hulrumsstråler kurven) og de sorte firkanter svarer til områder for ANSI standarden for kromaticitets koordinater for LED lyskilder. Den første firkant fra højre svarer til 2700 K, den anden til 3000 K og den tredje til 3500 K.

På Figur 22 er vist den målte spektralfordeling for denne LED lyskilde ved en bestemt indstilling af farveblandingen med blåligt og rødt LED lys.



Figur 22 Målt total spektral irradians fra den nye LED lyskilde med CC, som benyttet i demonstrationsemhætten. Den benyttede CC giver her en korreleret farvetemperatur af lyset på 3118 K, og et højt Ra-indeks på 92.9.

Denne spektralfordeling har en korreleret farvetemperatur på 3118 K og et højt Ra-indeks på 92.9. Når LED lyskilden bruges med CC, er der målt en total lysstrøm på 295 lm, se målerapport i appendix A. Det var ved et effektforbrug på 7,2 W, svarende til en effektivitet på ca. 41 lm/W. Denne effektivitet er ca. 18 % lavere end hvis lyskilden benyttes uden CC, men det giver så den langt bedre farvegengivelse.

Der er således udviklet en ny LED lyskilde til emhætte belysning som med color control (CC) kan indstilles til den ønskede korrelerede farvetemperatur i området fra 2750 til 3300 K, svarende til lys fra gløde- og halogenpærer. Lyset har i alle indstillinger et meget højt Ra-indeks på 92-96. Det er muligt at dæmpe lyset uden at ændre den korrelerede farvetemperatur ved benyttelse af en strømforsyning og programmeret driver fra I-No. LED lyskilden er installeret i demonstrations emhætten og anvendelses effektiviteten af denne LED belysning er målt igennem en lysfordelingsmåling på arbejdsfladen, som beskrevet i de følgende afsnit. Her skal de fire lyskilder først sammenlignes med hensyn til farvegengivelses egenskaber og energieffektivitet.

Sammenligning af farvegengivelse og effektivitet

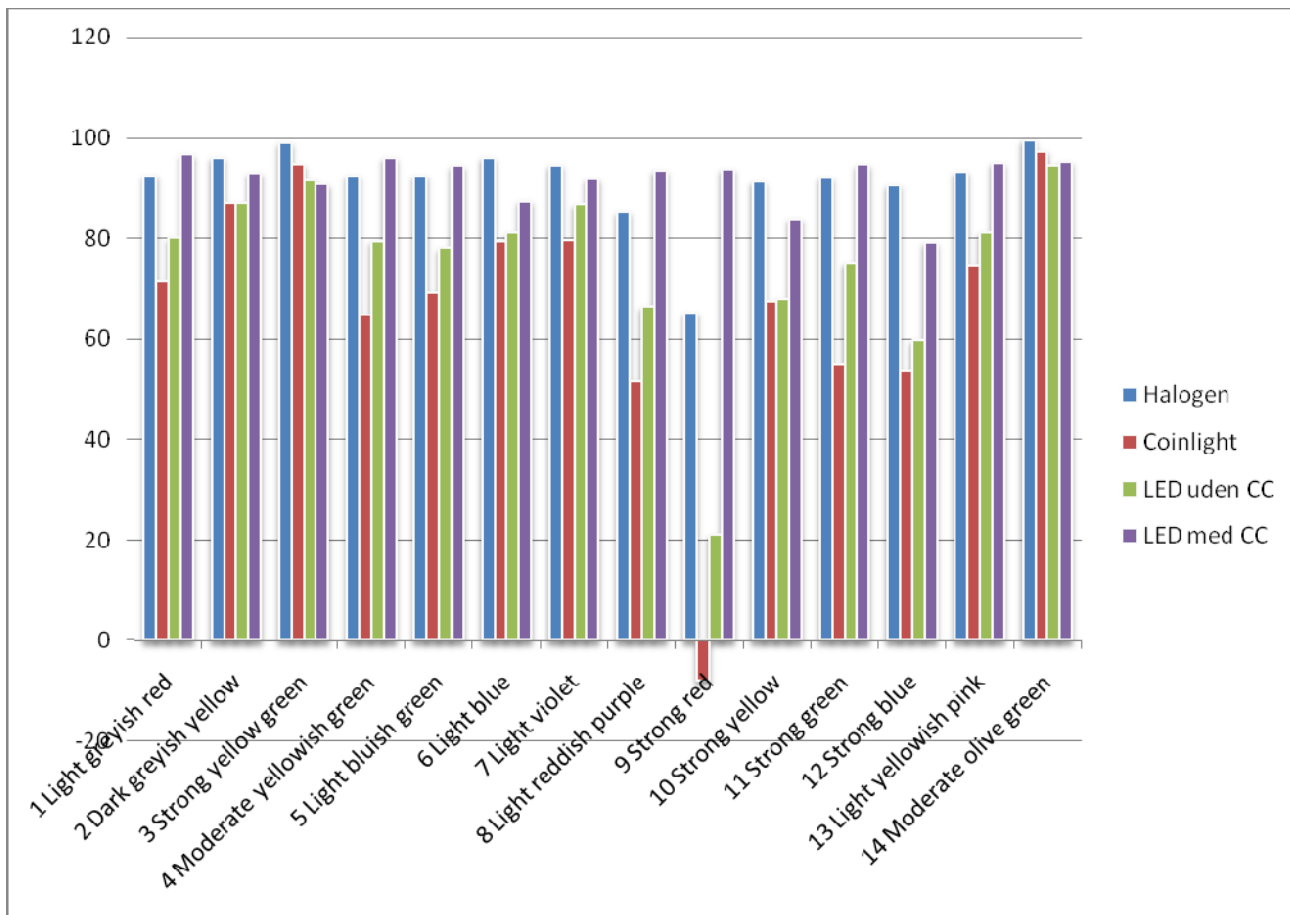
Der er foretaget testopsætninger i emhætten med de fire typer af belysning, halogen spot lyskilder, Coinlight LED spot lyskilder og den nye LED lyskilde med og uden CC. I Tabel 2 er vist farveparametrene, som korreleret farvetemperatur, kromatisk afvigelse og de generelle Ra-indeks, for de valgte typer af lyskilder. Endvidere er vist den målte lysstrøm, effektforbrug og effektivitet for de fire typer af lyskilder.

Tabel 2 Målte farveparametre, lysstrøm, effektforbrug og effektivitet for de fire typer af lyskilder der er undersøgt i emhætten.

Lyskilde	CCT [K]	DC [10^{-3}]	Ra-indeks	Φ [lm]	P [W]	Eff. [lm/W]
Halogen spot	3034	3.2	95.6	271	21.5	12.6*
Coinlight LED	3081	0.95	75.1	157	13	12**
LED lyskilde uden CC	2930	3.2	81.3	260	5.2	50
LED lyskilde med CC	3118	2.0	92.9	295	7.2	41

*) inkluderer ikke transformer tab, **) de nyeste Coinlight lyskilder har en højere effektivitet på omkring 47 lm/W.

Alle lyskilderne har således næsten den samme korrelerede farvetemperatur og vil af øjet opfattes som at have næsten den samme varm hvide farve. Hvis de placeres ved siden af hinanden vil man dog kunne se en forskel. Den nye LED lyskilde med CC kan som beskrevet indstilles til at have en specifik korreleret farvetemperatur i det varm hvide område. Farvegengivelses egenskaberne er dog vidt forskellige som det også fremgår af de målte spektralfordelinger, se de foregående afsnit. Det giver sig også til udtryk i de generelle Ra-indeks som vist i Tabel 2, som går fra 75 for coinlight lyskilden til 96 for halogenlyskilden. Den nye LED lyskilde med CC har næsten et lige så højt Ra-indeks som halogen lyskilden. For bedre at kunne vurdere de forskellige lyskilders farvegengivelse af specifikke og forskellige farver er i Figur 23 vist de specifikke Ra-indeks i et søjlediagram ved siden af hinanden for de fire typer af lyskilder.



Figur 23 Søjlediagram der viser de specifikke Ra-indeks (1..14) for de fire typer af lyskilder der er testet i demonstrationsemhætten.

Det generelle Ra-indeks er defineret⁸ som gennemsnittet af de specifikke Ra-indeks for objekt 1 til 8, og ud fra disse værdier ville man tro at halogen lyskilden havde den bedste farvegengivelse med et Ra-indeks på 96. Men hvis man ser på de specifikke kraftigt farvede objekter, nr. 9 til 14, ses det er for kraftigt røde objekter, der er den største variation i farvegengivelsen for lyset fra de forskellige typer af lyskilder. Dette hænger sammen med spektral fordelingen af lyset i den røde del af spektret og det er det specifikke Ra-indeks for objekt nr. 9 der er interessant, det betegnes Ra_9 . Coinlight lyskilden har mindst energi i den røde del af spektret, se Figur 18, og har et meget lavt Ra_9 på -7. Det er lidt bedre for LED lyskilden uden CC, den har en Ra_9 værdi på 21. For en normal halogen lyskilde vil den være på 98-99, men for denne halogenlyskilde, hvor en del af det røde og infrarøde lys er bortfiltreret, se Figur 15, er Ra_9 kun på 78. Den nye LED lyskilde med CC har et øget energi indhold i den røde del af spektret og Ra_9 er på 94 og giver altså en langt bedre farvegengivelse af de klare røde farver end hvad den her benyttede halogenlyskilde har. LED lyskilden med CC har dog en lavere specifikt Ra-indeks for det kraftigt blå testobjekt, Ra_{12} på 79. Dette er ikke et udtryk for at LED lyskilden ikke har nok energi i den blå del af spektret, men tværtimod at den indeholder mere blått lys end gløde og halogenpærer. De blå farver vil derfor forstærkes i lyset fra LED lyskilden med CC.

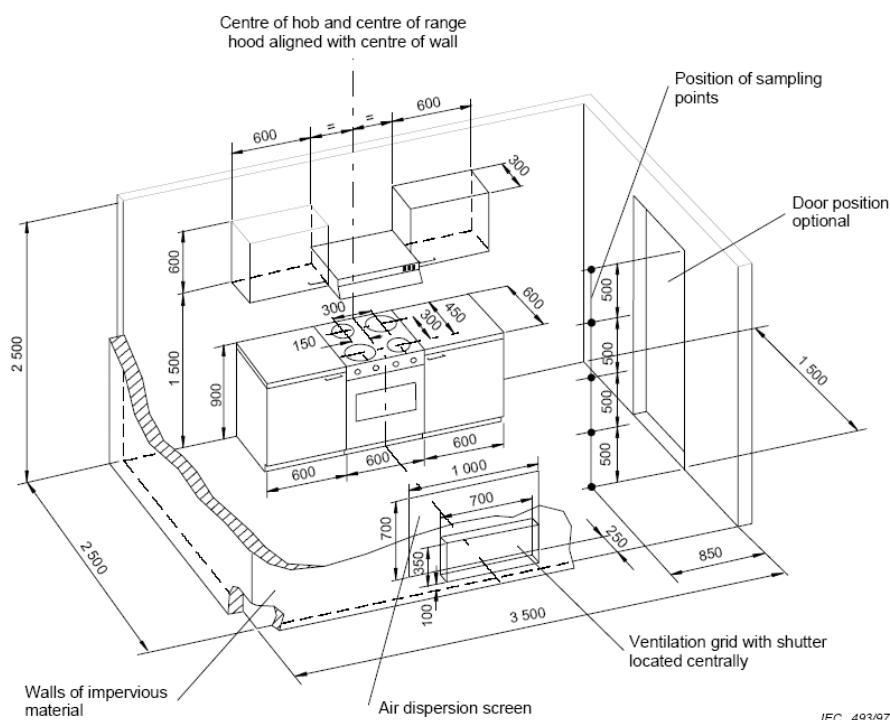
I anvendelsen af lyskilderne til belysning i en emhætte har farvegengivelsen af de røde farver en stor betydning ved madlavning som stegning af kød og vurdering af køds kvalitet og gennemstegthed. En anden fordel ved den nye LED lyskilde med CC er at den praktisk talt ikke udsender noget infrarød stråling over 750 nm, dvs. ingen varmestråling. Dette gælder også for de to andre LED lyskilder og er en generel fordel for hvide LED lyskilder til belysningsformål.

Af Tabel 2 ses det at alle LED lyskilderne har en 3-4 gange højere effektivitet end halogen lyskilden, når man tager højde for at de nyere versioner af Coinlight har en væsentlig højere effektivitet end den der er testet her. Det ses at de bedre farvegengivelse egenskaber af LED lyskilden med CC gør at effektiviteten af denne lyskilde er ca. 20 % lavere, end de andre LED lyskilder med lidt dårligere farvegengivelses egenskaber.

Det vurderes ud fra denne sammenligning at den nye LED lyskilde med CC er et rigtigt godt alternativ til halogen lyskilden, som giver en bedre farvegengivelse specielt af røde farver og desuden har en 3 gange højere energieffektivitet. I de næste afsnit testes effektiviteten af lyskilderne i emhætte opstillingen og her kommer lysfordelingen også ind i overvejelserne.

Karakterisering af emhætte belysning

For at kunne måle og vurdere effektiviteten af lyskilder der indgår som en del af emhætter, tages der udgangspunkt i standarden for test af emhætter⁹. Heri anvises et test rum til test og karakterisering af emhætter. Denne opstilling er realiseret på Teknologisk Institut i Tåstrup, hvor den benyttes til test og karakterisering af emhætter med hovedvægten på udsugningseffektiviteten. Testrummet er gengivet i Figur 24.



Figur 24 Skitse af test rum til test og karakterisering af emhætter fra DA/EN 61591⁹

Ifølge standarden benyttes denne opstilling af emhætten også til karakterisering af effektiviteten af belysningsenheden eller enhederne i emhætten. Emhætten placeres 600 mm over kogepladearealet. Indflydelsen af kogepladearealet og de tilstødende bordflader på lysmålingen skal minimeres ved at disse overfladers skal belægges med en mat sort belægning/maling for at gøre reflektansen så lille som muligt. Bordfladen skal række 500 mm ud på hver side af kogepladeområdet. Vægfladen bag kogeplade arealet skal ligeledes belægges med en mat sort belægning eller males.

Målingen foretages ved at emhætte lyset tændes og et luxmeter benyttes til at måle belysningsstyrken i fire punkter som vist på Figur 24, svarende til centerpositionen af fire kogeplader/områder. Alle andre lyskilder skal være slukkede under målingen. Middelværdien af belysningsstyrkerne for de to bagerste kogeplader og den tilsvarende værdi for de to forreste kogeplader beregnes og angives. Middelværdien for de fire målepunkter beregnes og værdien angives som luminansen/belysningsstyrken i enheden lux. Det angives ligeledes om belysningsstyrken er højest forrest eller bagerst på kogepladearealet.

Ifølge standarden vurderes lyskilden eller lyskildernes effektivitet i emhætten udelukkende på baggrund af middelbelysningsstyrken over fire punkter. Disse værdier kan i realiteten dække over mange forskellige lysfordelinger med kraftig spotbelysning af et eller flere områder eller en mere jævn fordeling af lyset ud over arbejdsfladen.

Der er derfor en god grund til at lave en mere detaljeret udmåling af lysfordelingen på arbejdsfladen, og som et mål for effektiviteten se på hvor meget lys eller hvor stor en lysstrøm der rammer arbejdsfladerne i forhold til effektforbruget, målt i lm/W. Det er den samme enhed som benyttes for en lyskildes effektivitet men hvor den betegner den totale lysstrøm fra lyskilden i forhold til den afsatte effekt. Homogeniteten af lysfordelingen over arbejdsfladen er også vigtig og kan bedre beskrives ud fra en mere detaljeret lysfordelingsmåling.

Måleopstilling til anvendelses effektivitet

LED lyskilder har en helt anden temperatur afhængighed end traditionelle lyskilder, og det gør at LED lyskilder skal testes under de forhold som de skal operere under. Den totale lysstrøm fra LED lyskilden vil aftage hvis operationstemperaturen stiger. Og dermed falder effektiviteten ligeledes og levetiden falder også ved øget operationstemperatur.

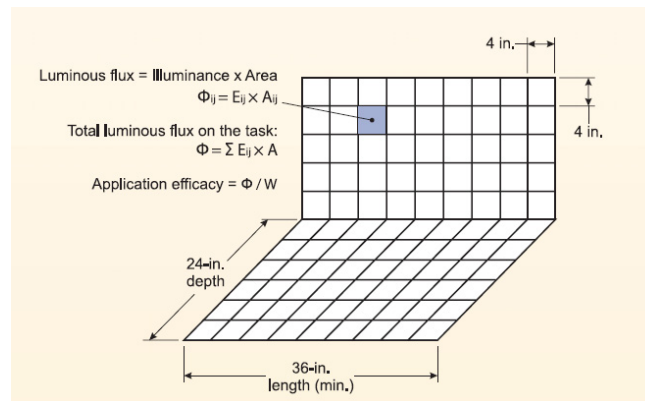
Hvis man tester en LED lyskilde i fri luft, og derefter indsætter den i en emhætte hvor der ikke er fri luft omkring lyskilden vil den i denne anvendelse opnå en øget operationstemperatur i forhold til lyskilde testen. Man kan således ikke benytte resultaterne fra almindelige fotometriske test målinger på LED lyskilder og normale fjernfelts fotometriske målinger vil ikke kunne bruges til at forudsige lyskildernes belysning og lysfordeling under en emhætte eller generelt for underskabs belysning.

Det er derfor vigtigt i emhætte opstillingen at LED lyskilderne opsættes så de opererer under normale forhold. De skal således forud for test have været tændt i så lang tid, at de har opnået en stabilt operations temperatur. Dette opnås for de fleste LED lyskilder indenfor ca. 30 minutter. Den totale lysstrøm vil falde med omkring 10-15 % i forhold til startværdien i løbet af denne tid, og hvis man måler før lyskilderne har opnået en stabil tilstand vil man overvurdere lyskildernes effektivitet.

Udgangspunktet for karakterisering af emhætten belysningen som vist i det foregående afsnit er derfor også et meget godt udgangspunkt for disse målinger med LED lyskilder. De fire enkeltpunktsmålinger giver dog en meget dårlig beskrivelse af den egentlige lysfordeling og for at få et bedre mål for effektiviteten benyttes her den såkaldte anvendelses effektivitet, som beskriver hvor meget lys der rammer arbejdsfladen under

emhætten i forhold til effektforbruget af lyskilderne. Dette følger de anbefalinger for LED og generel belysning som Lighting Research Center i USA har udgivet for "under cabinet lighting" eller "underskabs belysning" på dansk. Målemetoder og parametre er beskrevet i "Recommendations for Testing and Evaluating Under-cabinet Luminaires"¹⁰. Disse målemetoder er ligeså gyldige for traditionelle lyskilder, men for f.eks. halogenlyskilder vil man opnå en stabil lysudstråling meget hurtigere end for LED lyskilder.

Princippet for målingen af anvendelses effektiviteten er skitseret i Figur 25.



Figur 25 Skitse af princippet for måling af anvendelses effektivitet af emhætte belysning på arbejdsflader, de angivne dimensioner afviger fra opstillingen benyttet her.

Arbejdsfladerne på bord og væg deles op i et antal lige store delarealer. Belysningstyrken måles i hvert delareal E_{ij} i $[lux] = [lm/m^2]$. Lysstrømmen på dette delareal er så $\Phi_{ij} = E_{ij} \cdot A_{ij}$, hvor hvert enkelt delområde har et areal på $A_{ij} = A = 7.4 \text{ cm} \times 7.3 \text{ cm} = 0.0054 \text{ m}^2$. Den totale lysstrøm på fladen er:

$$\Phi = \sum (E_{ij} \cdot A_{ij}) = A \cdot \sum (E_{ij}), \quad (1)$$

hvor \sum betegner summationen over alle delarealer. I opstillingen måles der over 21 punkter langs bord og væg fladen og over hhv. 9 og 8 punkter i den anden retning på hhv. bord og væg.

Anvendelses effektiviteten for belysningen af en flade er så givet ved den totale lysstrøm på fladen delt med det totalt effektforbrug af belysningen P og måles i $[lm/W]$:

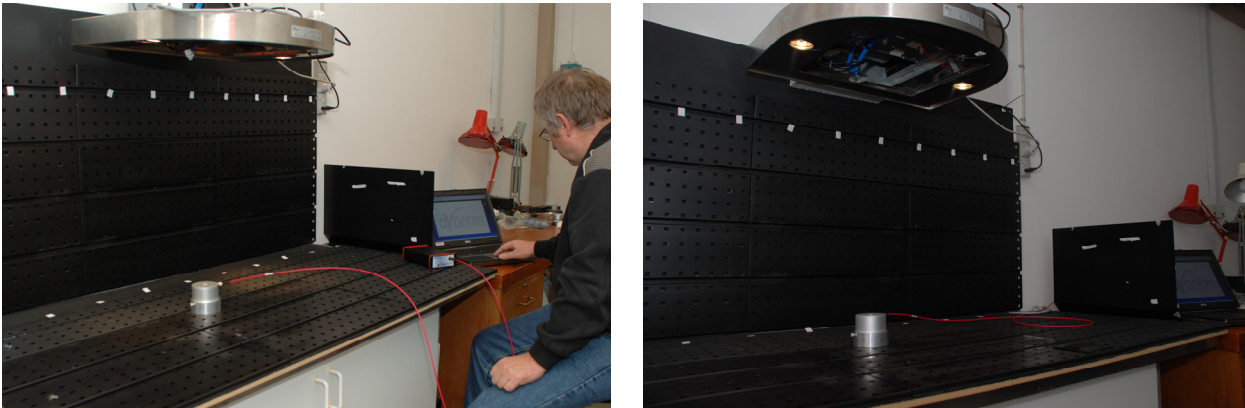
$$\eta = \Phi/P = \sum (E_{ij} \cdot A_{ij})/P = A/P \cdot \sum (E_{ij}) \quad (2)$$

Opstillingen er indrettet således at de i standarden DS/EN 61591⁹, angivne målepunkter svarende til fire kogezoneers midtpunkter svarer til delarealerne $(i,j) = (9,2), (9,6), (13,2)$ og $(13,6)$. Derved måles belysningsstyrken også i disse punkter ved denne mere detaljerede lysfordelings måling, og resultaterne heraf kan derfor også benyttes til standard karakteriseringen af emhættens belysning.

Der skal derfor foretages nærfelts fotometriske målinger til bestemmelse af lysfordelingen og lysstrømmen på bordet og væggen under emhætten i forhold til effektforbruget af lyskilderne. Der er i DTU Fotoniks laboratorium på Risø udviklet og opbygget en måleopstilling til udmåling af lysfordelingen og anvendelses effektiviteten på arbejdsfladerne under en emhætte. Lysfordelingen kan her måles på en vandret arbejdsflade og en tilstødende lodret vægflade. Arealet er på ca. $60 \times 160 \text{ cm}^2$, svarende til ca. 1 m^2 , såvel på den lodrette som vandrette flade. Målefladerne er malet med en mat sort farve som har en lav refleksions koefficient,

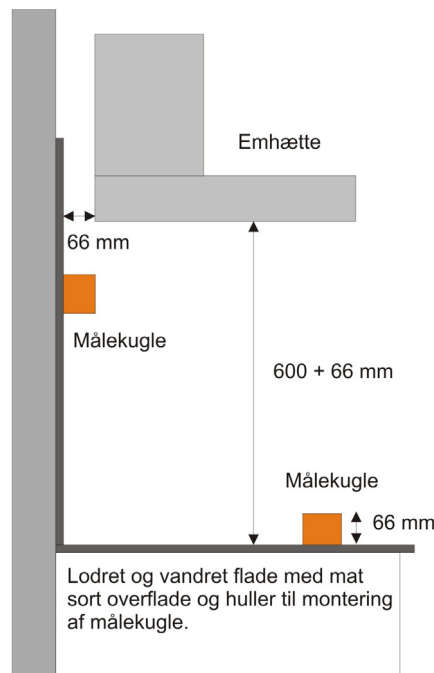
således at det med god tilnærmelse udelukkende er det direkte lys fra lyskilde opstillingen der måles. Fladerne er konstrueret med et regulært hulmønster, der muliggør placering af måleproben i faste punkter over fladerne med en indbyrdes afstand på 7.4 cm i den ene retning og 7.3 cm i den anden retning.

På de to fotos i Figur 26 ses måleopstillingen i funktion. Opstillingen er placeret i et rum som kan mørklægges således at lysmålingen ikke forstyrres af andre lyskilder.



Figur 26 Fotos af måleopstilling til karakterisering af lyskildes effektivitet og lysfordeling i en emhætte. Måleproben er en lille integrerende kugle med en måleapertur på 10 mm i diameter, som kan placeres i et regulært positions mønster over den vandrette og lodrette flade.

Emhætten fra Thermex, som er 60 cm bred, er opsat på væggen i en højde på ca. 150 cm over gulvet. De to måleplaner med mat sort malede overflader og huller til positionering af måleproben er opsat således at måleprobens front for den vandrette flade ligger 60 cm under emhættens nederste kant og i et plan der svarer til væggen, hvor emhætten er opsat. Dette er illustreret på Figur 27.



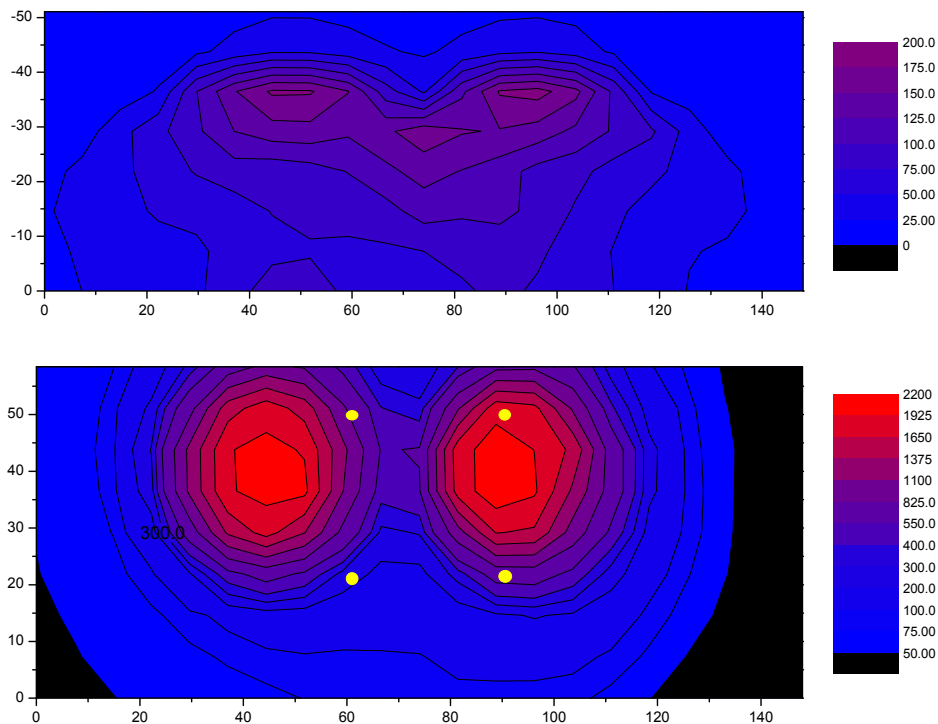
Figur 27 Skitse af opsætning af emhætte i måleopstilling med position af målekuglens måleplan i 600 mm afstand fra emhætten underside og i et plan svarende til emhættens bagside mod væggen.

Der benyttes et spektroradiometer som måleinstrument, hvorved det er muligt at måle den spektrale irradians i $[W/m^2nm]$ i hver position. Herudfra kan belysningsstyrken i $[lux] = [lm/m^2]$ beregnes, som også kan måles med et normalt luxmeter. Spektroradiometeret giver en bedre målenøjagtighed og så har vi yderligere er mulighed for at se på fordelingen af lysets farve kvalitet, idet for hvert målepunkt kan lysets farvekoordinater og korrelerede farvetemperatur beregnes. Dette er dog ikke beskrevet her i rapporten. Der benyttes en portåbning på 10 mm i diameter i en lille integrerende kugle der er fiberkoblet til et spektrometer. Systemet er kalibreret med en standard spektral irradians som er NIST sporbar.

Karakteriserings målinger

I dette afsnit vises resultatet af lysfordelings målingerne i karakteriseringsopstillingen med demonstrationsemhætten. Lysfordelingen er karakteriseret for emhætten, installeret med de fire forskellige lyskilder, som er beskrevet i de foregående afsnit med hensyn til deres lyskvalitet og effektivitet. Resultatet af de i dette afsnit viste målinger er anvendelses effektiviteten af lyskilderne i emhætten til at belyse arbejdsfladerne under emhætten.

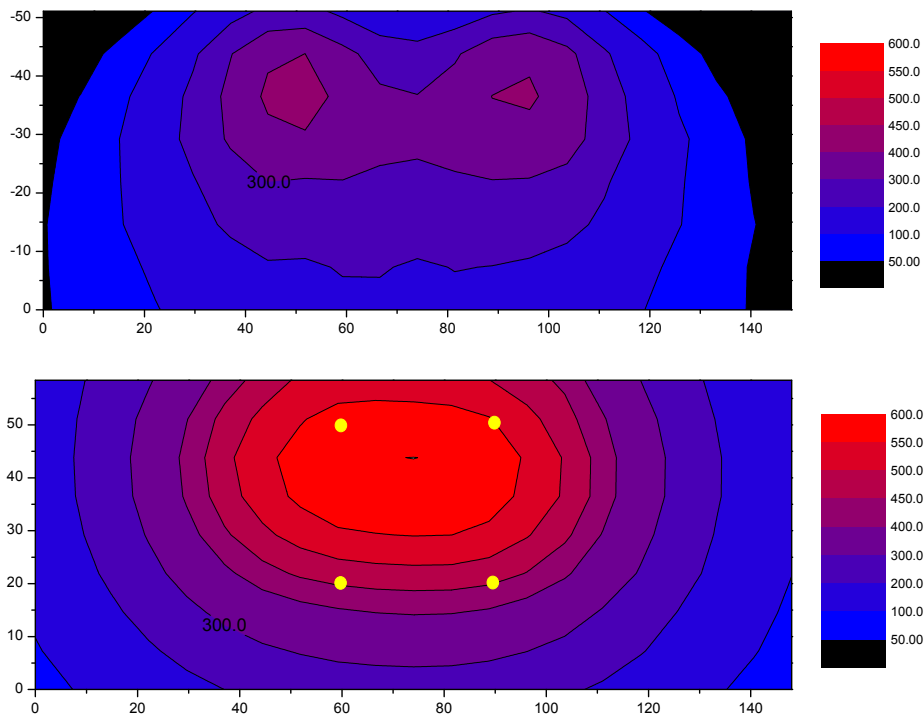
På Figur 28 er vist de målte lysfordelinger på hhv. vægfladen og bordfladen under emhætten med halogen lyskilderne installeret. Det ses at halogen belysningen giver to kraftige spots på bordfladen med belysningsstyrker på op til 2000 lux. Det er dog kun i to meget små områder på ca. 10 cm i diameter.



Figur 28 Målt lysfordeling i emhætte opstillingen med halogen spot lyskilder, med et effektforbrug på 54 W. Øverst ses den målte belyningsstyrke i væggen plan under emhætten. Nederst ses den målte belyningsstyrke i bordets plan under emhætten og de fire målepunkter ifølge DS/EN 61591⁹ er markeret med gule cirkler. Læg mærke til at farveskalaen for belyningsstyrken ikke er ens på de to grafer og går op til 2200 lux på bordet og kun til 200 lux på væggen, grænsen for et niveau på 300 lux er markeret. Positionen langs akserne er angivet i cm.

Niveauet for 1100 lux svarer til en diameter på 25 cm. Det ses at der er meget stor variation i belyningsstyrken i de fire målepunkter hvor belyningsstyrken ifølge DS/EN 61591⁹ skal måles. Da halogenlyskilderne kan kippes og drejes vil man kunne rette dem således at de bedst muligt rammer de fire punkter. I denne test lyser begge halogen spot lyskilder i en retning normalt på bordfladen. Andre indstillinger af lyskildernes retning vil give lidt andre resultater, men det vil stadig være to små områder med en meget høj belyningsstyrke i forhold til omgivelserne. Belysningsstyrken er meget lav på vægfladen med værdier under 100 lux på nær et meget smalt område højt under emhætten.

De tilsvarende målinger hvor den nye LED lyskilde med CC er installeret i emhætten er vist på Figur 29. Disse nye LED lyskilder er udviklet med en 100° udstrålingsvinkel og vil som det ses af målinger give en ganske anden og meget mere jævn fordeling af lyset på bordfladen, end som set med halogen spot lyskilderne.



Figur 29 Målt lysfordeling i emhætte opstillingen med nye LED lyskilder med CC installeret, med et effektforbrug på 16.8 W. Øverst ses den målte belysningsstyrke i væggen plan under emhætten. Nederst ses den målte belysningsstyrke i bordets plan under emhætten og de fire målepunkter ifølge DS/EN 61591⁹ er markeret med gule cirkler. Farveskalaen for belysningsstyrken er ens på de to grafer og går op til 600 lux, grænsen for et niveau på 300 lux er markeret. Positionen langs akserne er angivet i cm.

Det ses af Figur 29 at lysfordelingen på bordfladen er meget jævn og med maksimalværdien på 600 lux næsten midt imellem de fire standard målepunkter. Belysningsstyrken er meget ens i målepunkterne med samme afstand til væggen, med en lidt højere værdi for de to punkter tættest på væggen. Det ses yderligere at de nye LED lyskilder samtidig giver en god belysning af vægfladen med belysningsstyrker på over 200 lux over næsten hele arealet under emhætten. Dette er i stærk kontrast til halogenbelysningen som praktisk talt ikke belyser vægfladen, se Figur 28.

I Tabel 3 er for de forskellige lyskilder i emhætteopstillingen vist deres effektforbrug og udstrålingsvinkel og resultaterne af lysfordelingsmålingerne. I anden del af tabellen (svagt grå) er angivet de belysningsstyrker der er målt i de fire punkter efter standarden DS/EN 61591⁹, der svarer til de fire kogezoners midtpunkter. Middelværdien og forholdet imellem den minimale og maksimale belysningsstyrke er angivet, sammen med en effektivitet udtrykt i middel belysningsstyrken i de fire punkter i forhold til effektforbruget [lux/W].

I den tredje del af tabellen (grå) er den målte middel belysningsstyrke og den samlede lysstrøm på bordfladen ifølge ligning (1) angivet. Anvendelses effektiviteten efter ligning (2) er beregnet og angivet for lysstrømmen på bordfladen. I den sidste del af tabellen er middel belysningsstyrken og lysstrømmen på vægfladen samt anvendelses effektiviteten udtrykt som den totale lysstrøm på væg- og bord- flade i forhold til effektforbruget angivet. De her angivne anvendelses effektiviteter er beregnede for hele bord- og vægfladen som i opstillingen

strækker sig 50 cm på hver side af emhætten. Tilsvarende anvendelses effektiviteter kunne være specificeret for bord- og vægfladen lige under emhætten i en bredde på 60 cm, hvis det er mere relevant.

Tabel 3 Måle- og beregningsresultater af lysfordelingsmålinger under demonstrationsemhætten for de forskellige lyskilder. E betegner belysningsstyrken målt i [lux], de svagt grå felter svarer til punkt målinger og middelværdier ifølge DS/EN 61591⁹. De grå felter svarer til lysstrøm og effektivitet på bordfladen, og herunder for vægfladen. Nederst er angivet den totale lysstrøm på væg- og bordflade i forhold til effektforbruget.

Lyskilde	Halogen	Coinlight LED	Ny LED uden CC	Ny LED med CC
Effekt [W]	54	24*	12	16.8
Udstrålingsvinkel [°]	38	38	100	100
E (venstre, bagerst) [lux]	865	713	-	569
E (venstre, forest) [lux]	262	202	-	475
E (højre, bagerst) [lux]	1823	1175	-	553
E (højre, forest) [lux]	651	308	-	474
E (middel) [lux]	900	600	-	518
Eff. (middel) [lux/W]	16.7	25.0*	-	30.8
E _{min} : E _{max}	1 : 6.9	1 : 5.8	-	1 : 1.2
E (middel, bord) [lux]	427	244	271	325
Lysstrøm bord [lm]	436	249	322	332
Anv. Eff. bord [lm/W]	8.1	10.4*	26.8	19.8
E (middel, væg) [lux]	54	25	102	171
Lysstrøm væg [lm]	49	23	121	156
Total lysstrøm [lm]	485	272	443	488
Anv. Eff. total [lm/W]	9.0	11.3*	36.9	29.1

*) De nyeste Coinlight ostar lyskilder fra Osram, der har et energiforbrug på 7.5 W og de her angivne effektiviteter vil være mindst 60 % højere.

En række forskellige ting kan udtrages af resultaterne i Tabel 3. Det ses at belysningsstyrken målt i de fire målepunkter efter DS/EN 61591⁹ for såvel halogen som coinlight spot lyskilderne udviser en meget kraftig variation med et forhold imellem minimal og maksimal belysningsstyrke på ca. 1 : 6. Altså en meget dårlig lysfordeling og belysningsstyrken på en af kogezonezonen er kun på omkring 200 lux. Coinlight LED lyskilderne giver ikke helt den samme middelbelysningsstyrke, men effektiviteten er ca. 50 % højere målt i [lux/W]. Med nyere versioner af coinlight LED lyskilder vil disse have en effektivitet i middel belysningsstyrke i de fire punkter i forhold til effektforbruget på ca. 40 lux/W hvilket er væsentligt højere end for halogen spot lyskilderne. Når man ser på lysstrømmen på bordet, så er den dog næsten dobbelt så høj for halogenlys kilderne og det giver en anvendelses effektivitet på bordet, som kun er lidt højere for coinlight LED spot lyskilderne på ca. 10 lm/W. Selv om der vil være en energibesparelse ved brugen af de nyere versioner af coinlight LED lyskilder, så har de en farvegengivelse som ligger langt fra den af halogen lyskilderne. Den er givet ved et Ra-indeks på 75 som beskrevet i de foregående afsnit, og er derfor ikke det bedste alternativ.

Belysningen med de nye LED lyskilde med CC ses at give en langt mere jævn lysfordeling og de målte belysningsstyrker i de fire punkter er praktisk taget ens med en middelværdi på 518 lux og et forhold imellem den minimale og maksimale belysningsstyrke på 1 : 1.2. Denne belysningsstyrke må anses at være god til arbejdsbelysning, idet den lever op til kravene i DS700 om en anbefalet belysningsstyrke på minimum 500 lux i arbejdsområder. Effektiviteten målt i lux/W er 84 % højere end for halogen spot lyskilderne.

Det ses at de nye LED lyskilde med CC giver en lysstrøm på bordet som er 24 % lavere end for halogen belysningen, men med en anvendelses effektivitet på 19.8 lm/W, som er 144 % højere end for halogen belysningen. Den lidt lavere lysstrøm på bordet kompenseres med en langt højere lysstrøm på væggen. Den er 220 % højere end for halogenbelysningen. De nye LED lyskilder med CC giver en fordeling af lyset på hhv. bord- og vægflade i et forhold på 2:1, som svarer godt til anbefalingerne fra Lighting Research Center¹⁰. Halogen belysningen giver et forhold på 9:1, hvilket betyder at væggen er meget mørk i forhold til bordfladen.

Den samlede anvendelses effektivitet for lyset på såvel bord og vægflade, bliver således 29.1 lm/W for de nye LED lyskilder med CC, mod kun 9.0 lm/W for halogen lyskilderne. Benyttes de nye LED lyskilde uden CC ses de at give en ca. 30 % højere anvendelses effektivitet, men det er på bekostning af den langt bedre lyskvalitet, når LED lyskilden benyttes med CC, som beskrevet i de foregående afsnit.

Bedste alternativ til halogen belysning

Ved at benytte de nye LED lyskilder med CC som erstatning for halogen lyskilderne opnås en energibesparelse på 69 % for at opnå den samme lysstrøm på bord og væg under emhætten. Yderligere opnås der herved en meget mere jævn lysfordeling på såvel bord og vægflade samt bedre farvegengivelsesegenskaber. De nye LED lyskilder med CC giver mulighed for at indstille den korrelerede farvetemperatur af lyset i området 2750 – 3300 K, som således kan modsvare glødepære eller halogenpære belysning. Over hele området har de nye LED lyskilder med CC en meget god farvegengivelse givet ved Ra-indeks imellem 92 og 96, og specifikt har de en langt bedre farvegengivelse af kraftigt røde objekter end ved de her benyttede halogen lyskilder. Ved brug af en speciel driver elektronik er det muligt at dæmpe lyset uden at ændre på lyset korrelerede farvetemperatur. Endelig er varmestrålingen fra LED lyskilderne under 10 % af den fra halogen lyskilderne, som allerede er reduceret i forhold til normale halogen lyskilder.

De nye LED lyskilder med CC er derfor et meget attraktivt alternativ til belysning i emhætter, men er en type lyskilde der på en anden måde end halogen lyskilderne skal indbygges i emhætten for at opnå en god varmeafledning fra LED lyskilderne. Dette er afgørende for at opnå den høje effektivitet og lang levetid af LED lyskilderne.

Formidling

Der er igennem projektperioden udført et omfattende formidlingsarbejde omkring projektarbejdets resultater, teknologien bag og mulighederne på området. Formidlingsarbejdet har rettet sig imod forskellige segmenter fra private og professionelle forbrugere, designere, lys og armatur udviklingsvirksomheder, og til forskere såvel nationalt som internationalt. Det er sket igennem artikler i fagpressen, dagspressen, videnskabelige tidsskrifter, foredrag i virksomheder, institutioner, museer og foredrag, udstillinger og postere ved konferencer i Danmark og i udlandet.

Budskabet i formidlingsarbejdet er at sandsynliggøre de mulige store energibesparelser uden at gå på kompromis med lyskvaliteten ved benyttelsen af ny udviklet LED belysning. Med lyskvalitet er det forhold omkring lysets farve givet ved den korrelerede farvetemperatur og lysets farvegengivelses egenskaber, samt farvede skygger ved farveblanding samt blanding der har været fokuseret på.

Det vurderes at projektet er blevet omtalt og præsenteret over for mere end 1500 interesserede ved foredrag og mindst lige så mange igennem poster og demonstrations udstillinger.

I listen herunder er angivet foredrag hvor projektets resultater og muligheder er præsenteret, listen omfatter foredrag afholdt hos belysningsfirmaer, uddannelsesinstitutioner, seminarer og konferencer:

- 6-07-2007 *"LED Activities at Risø"*, af Carsten Dam-Hansen, præsentations foredrag ved projektmøde hos Philips Lighting, Horticulture i Holland (ca. 8 deltagere)
- 15-11-2007 *"LEDs til belysning"*, af Carsten Dam-Hansen, inviteret foredrag til ERFA møde for Statens Institutioner hos DONG Energy (ca. 40 deltagere)
- 27-11-2007 *"LEDs til belysning"*, af Carsten Dam-Hansen, foredrag hos Administrationsafdelingen på Risø, for patentagenter og jurister. (ca. 15 deltagere)
- 6-12-2007 *"Farveegenskaber og forskning i lysdioder"*, af Carsten Dam-Hansen, inviteret foredrag ved Lysteknisk selskabs og Elsparefondens LED seminar i Bellacenteret. (ca. 200 deltagere)
- 5-03-2008 *"Farveegenskaber og forskning i lysdioder"*, af Carsten Dam-Hansen, foredrag for en gruppe af Roundtable i Danmark afholdt på Risø. (ca. 10 deltagere)
- 16-04-2008 *"LED teknologi til belysning"*, af Carsten Dam-Hansen, foredrag for 3.g. klasse fra Roskilde Katedralskole (ca. 30 deltagere)
- 23-04-2008 *"LED teknologi til belysning"*, af Carsten Dam-Hansen, inviteret foredrag ved SSIDs Årskonference afholdt på Comwell i Kolding. (ca. 35 deltagere)
- 07-07-2008 *"LED- fremtidens lyskilde"*, af Carsten Dam-Hansen foredrag ved Optics Camp'08 sommerskole i optik afholdt af DTU Fotonik (ca. 45 deltagere)
- 03-09-2008 *"LED-teknologi til belysning og eksempler"*, af Carsten Dam-Hansen, foredrag afholdt hos DTU Fotonik, Risø for Elfaglærere fra TEC Teknisk Erhvervsskole Center på Frederiksberg (ca. 16 deltagere)
- 26-09-2008 *"Nyt lys med LED"* af Carsten Dam-Hansen, foredrag afholdt hos Roskilde Gymnasium udbudt som foredrag under Dansk Naturvidenskabsfestival (ca. 50 deltagere)

- 03-10-2008 *"Nyt lys med LED"* af Carsten Dam-Hansen, foredrag afholdt hos DTU Fotonik, Risø for Novo Nordisk, (ca. 12 deltagere)
- 23-10-2008 *"Color Quality of white LEDs"*, af Carsten Dam-Hansen, inviteret foredrag afholdt ved konferencen Light Visions 2008, 23.-24. oktober 2008 i Frederikshavn.
www.lightvisions.dk/conference (ca. 110 deltagere)
- 25-11-2008 *"LED til generel belysning"*, af Carsten Dam-Hansen, foredrag ved DTU Fotoniks to dages kursus omkring LED teknologi *"Lysdioder - en energieffektiv belysningsteknologi"* afholdt i Oticonsalen på DTU i Lyngby. (ca. 80 deltagere)
- 03-03-2009 *"Test og karakterisering af LED"*, af Carsten Dam-Hansen, foredrag afholdt ved LYSnET møde afholdt på Risø. (ca. 30 deltagere)
- 30-03-2009 *"LED til generel belysning"*, af Carsten Dam-Hansen, foredrag afholdt hos Flashlight A/S, Karlslunde (ca. 15 deltagere)
- 24-04-2009 *"LED teknologi"* af Carsten Dam-Hansen og Brian Markussen, foredrag, demonstration og rundvisning på Roskilde museet hvor al belysning er udskiftet til LED belysning af Lumodan, som et led i forskningens døgn. (ca. 15 deltagere)
- 11-05-2009 *"Nyeste LED"*, af Carsten Dam-Hansen, inviteret foredrag ved Belysningsseminar arrangeret af Energitjenesten Nordjylland, afholdt i Ingeniørhuset i Aalborg (ca. 45 deltagere)
- 13-05-2009 *"LED til generel belysning"*, af Carsten Dam-Hansen, foredrag afholdt hos Riegens A/S, Odense (ca. 25 deltagere)
- 26-10-2009 *"LED research at DTU Fotonik"* af Carsten Dam-Hansen og Beata Kardynal foredrag afholdt på DTU ved besøg fra KAIST Korea Advanced Institute of Science and Technology (ca. 30 deltagere)
- 04-11-2009 *"LED – nu og i fremtiden"* Paul Michael Petersen, Peter Poulsen og Carsten Dam-Hansen, Inviteret foredrag på Lysets dag, Den sorte diamant (ca. 300 deltagere)
- 09-11-2009 *"Montrebelysning med LED"* af Carsten Dam-Hansen, foredrag afholdt ved Kulturhistorisk orienteringsmøde 2009, arrangeret af Organisationen af Danske Museer. (ca. 65 deltagere)
- 03-12-2009 *"LED et kvalitetsalternativ"*, af Carsten Dam-Hansen foredrag afholdt ved DTU Fotonik og Elsparefondens LED konference i Ingeniørhuset, København. (ca. 160 deltagere)
- 15-03-2010 *"LED for general lighting"*, af Carsten Dam-Hansen, gæsteforlæsning afholdt ved DTU Byg kursus (ca. 70 deltagere)
- 17-03-2010 *"Energy efficient and high quality LED illumination system for display cases"*, af Carsten Dam-Hansen, foredrag ved session 59 *"New lighting – New LEDs"* Sveriges Energiting 2010, Älvsjö, Stockholm. (ca. 30 deltagere)

Herunder er angivet ved hvilke udstillinger/konferencer projektets resultater har været vist igennem poster:

- 12-13. sept.2007 Udstilling af demonstrations LED lyskasser og LED lamper ved Lysets Dage 2007, i Øksnehallen (ca. 300 deltagere).
- Sept. 2008 *"Belysning ved brug af lysdioder ved De danske Kongers Kronologiske Samling på Rosenborg"*, poster/brochure omkring sammenligning af glødepære og højkvalitets LED belysning af guldoobjekter på hhv. dansk og engelsk. Denne har Hazze Nyström fra Rosenborg og Brian Markussen fra Lumodan vist og uddelt ved en konference afholdt på

nationalmuseet i september måned 2008, med ca. 240 deltagere fra store dele af verden, der arbejder i museumsverdenen.

- Okt. 2009 "A new LED light source for display cases", af Carsten Dam-Hansen og Paul Michael Petersen poster ved Frontiers in Optics 2009/Laser Science XXV, 2009, San Jose, CA, USA.
- 3-4. dec. 2009 Poster og udstilling af Lynggaard smykke montre hvor PinOLED er installeret, i samarbejde med I-No ved DTU Fotonik og Elsparefondens LED konference i Ingeniørhuset, København. (ca. 150 deltagere)
- Dec. 2009 "LED illumination of the Danish Royal treasures at Rosenborg Castle", poster og udstilling af Lynggaard smykke montre hvor PinOLED er installeret, i samarbejde med I-No, COP 15 udstilling i Forum, København.
- Dec. 2009 "LED illumination at the Danish Royal treasures at Rosenborg Castle" poster ved Elforsk udstilling "Better living with Efficient Energy/Sustainability in 4D", i Ørestaden.

I listen herunder er angivet artikler og bøger hvor projektets resultater er præsenteret:

"Diodelys indtager scenen" af Morten Andersen, p. 42-45, Dynamo, 10, Sept. 2007, Danmarks Tekniske Universitet.

"Photonics engineering in a new light" af Lars Dittmann og Paul Michael Petersen pp. 54-61 in "Engineering challenges, Energy, climate change & health" ISBN 978-87-985544-4-8 (DTU Lyngby, 2009)

"Denmark's Crown Jewels Get Lighting Makeover, Aided by Future Lighting Solutions' LED Support", case study published at http://www.futurelightingsolutions.com/pdf/case-studies/CS_denmark.pdf

<http://www.led-professional.com/projects/63/1572-energy-saving-led-showcases-shed-new-light-on-denmarks-crown-jewels.html>

<http://www.edn.com/pressRelease/2140487137.html>

<http://www.presscontacts.com/pressreleaser/visa/pressrelease/191548/energysaving-led/81281041-8718-16B0-0371-81DE4C638372>

http://www.businesswire.com/portal/site/home/permalink/?ndmViewId=news_view&newsId=20091216005044&newsLang=en

"Old treasures in a new light" p.186 in "Beyond Optical Horizons, today and tomorrow with photonics", ISBN 87-92062-34-2, Denmark, 2009.

"DTU Fotonik i gennembrud med LED-lys på kronjuvelerne", Ingeniøren 8 dec 2009.

OSA PRESS RELEASE Washington OCT 1st 2009 "ALL THAT GLITTERS IS NOW GOLD"

"Verden i nyt lys" af Tine Kortenbach, p. 34-37, Dynamo, 19, Danmarks Tekniske Universitet, dec. 2009.

"Fremtidens lys i centrum", DTU avisen, pp. 1-2, 1. februar 2010

Appendix A

Dette appendix indeholder lystekniske målerapporter udfærdiget i DTU Fotoniks LED LYS Laboratorie på Risø, for en række af de lyskilder der er undersøgt til emhætte belysning. Der er målerapporter for:

- Halogen spot lyskilde i fremad udstrålings konfiguration (2π)
- Osram coinlight LED lyskilde
- Ny LED lyskilde uden CC
- Ny LED lyskilde med CC

Light measurement report

Meas. No.: L³0026

Light source: Halogen Spot, 12V, 20W, forward flux measured.

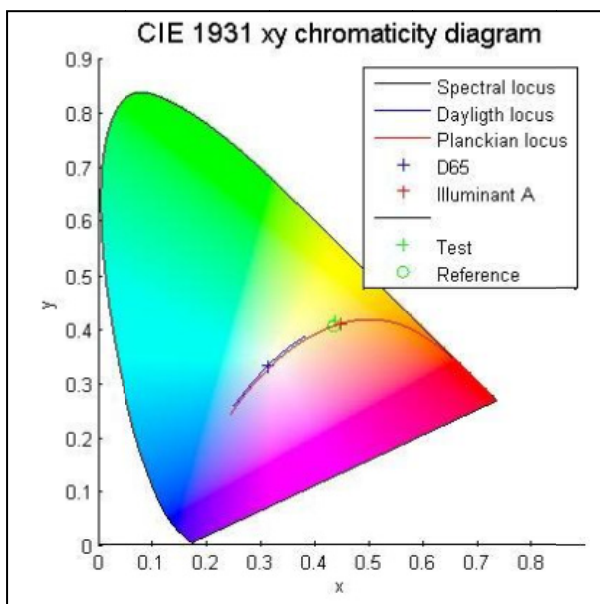
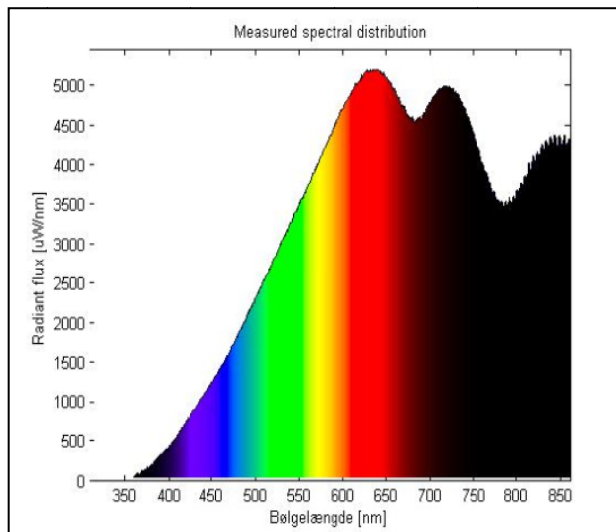
Operating conditions: Vertical operation in free air. In operation 30 min before measurement.

Measurement conditions: Total spectral radiant flux is measured using a spectroradiometer with a fibercoupled 40 inch integrating. The light source mounted at the side of the sphere and measurements are corrected for absorption loss. Spectral measurement from 200-1000 nm.

Measurements and color calculations:

Power [W]	Efficacy [lm/W]	Power Factor	T _{bulb} [°C]
21.5	12.58	-	-
Radiant Flux [mW]		Luminous Flux [lm]	
1988		270.6	
Corr. Color Temp. [K]	CRI (CIE: 13.3-1995)	DC	DC <math>< 5.4 \cdot 10^{-3}</math>
3034	95.6	3.2 · 10 ⁻³	True
x	y	u	v
0.4378	0.4124	0.2476	0.5248

Chromatic Color Coordinates:



i	Appearance under daylight	Swatch	CRI _i
1	Light greyish red		95.0
2	Dark greyish yellow		97.4
3	Strong yellow green		99.2
4	Moderate yellowish green		94.8
5	Light bluish green		94.9
6	Light blue		97.4
7	Light violet		96.3
8	Light reddish purple		90.2
9	Strong red		77.5
10	Strong yellow		94.3
11	Strong green		94.5
12	Strong blue		93.7
13	Light yellowish pink (skin)		95.5
14	Moderate olive green (leaf)		99.6

Light measurement report

Meas. No.: L³0027

Light source: Osram Coinlight spot LED light source

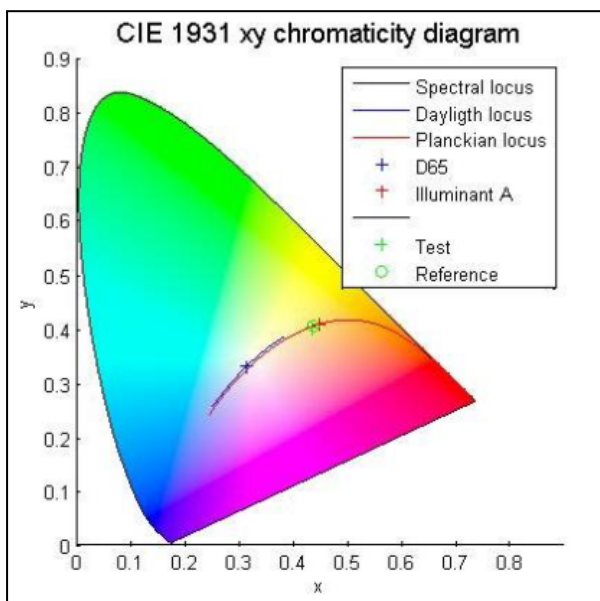
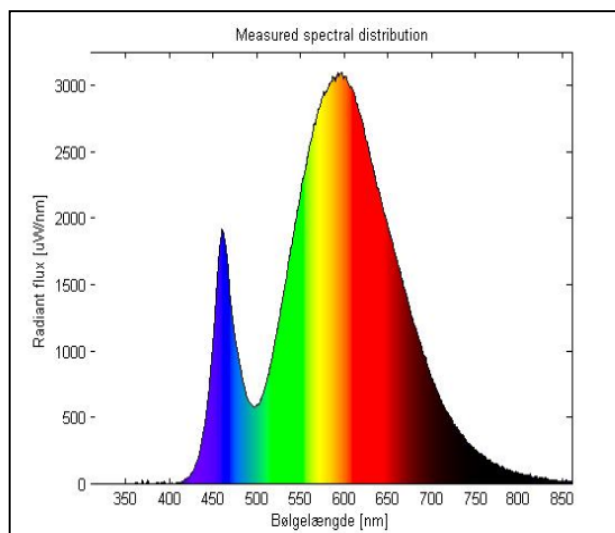
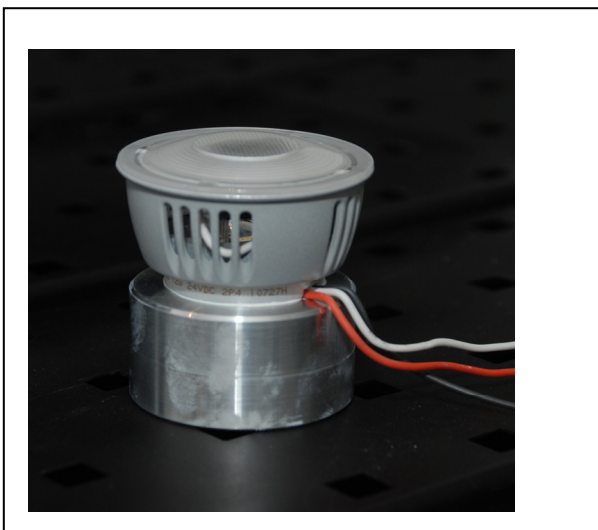
Operating conditions: Vertical operation in free air. In operation 30 min before measurement.

Measurement conditions: Total spectral radiant flux is measured using a spectroradiometer with a fibercoupled 40 inch integrating. The light source is mounted outside the sphere and measurements are corrected for absorption loss. Spectral measurement from 200-1000 nm.

Measurements and color calculations:

Power [W]	Efficacy [lm/W]	Power Factor	T_{bulb} [°C]
13.1	11.9	0.79	-
Radiant Flux [mW]		Luminous Flux [lm]	
500.6		156.7	
Corr. Color Temp. [K]	CRI (CIE: 13.3-1995)	DC <small>NB: CIE Recommends that the CD value is within the limit of 5.4 · 10⁻².</small>	DC < 5.4 · 10⁻³
3005	74.7	9.5 · 10 ⁻⁴	True
x	y	u	v
0.4343	0.4012	0.2501	0.5198

Chromatic Color Coordinates:



i	Appearance under daylight	Swatch	CRI _i
1	Light greyish red		71.4
2	Dark greyish yellow		87.0
3	Strong yellow green		94.6
4	Moderate yellowish green		64.7
5	Light bluish green		69.3
6	Light blue		79.3
7	Light violet		79.5
8	Light reddish purple		51.7
9	Strong red		-7.8
10	Strong yellow		67.4
11	Strong green		54.7
12	Strong blue		53.6
13	Light yellowish pink (skin)		74.7
14	Moderate olive green (leaf)		97.3

Light measurement report

Light source: New LED light source without CC for cooker hood

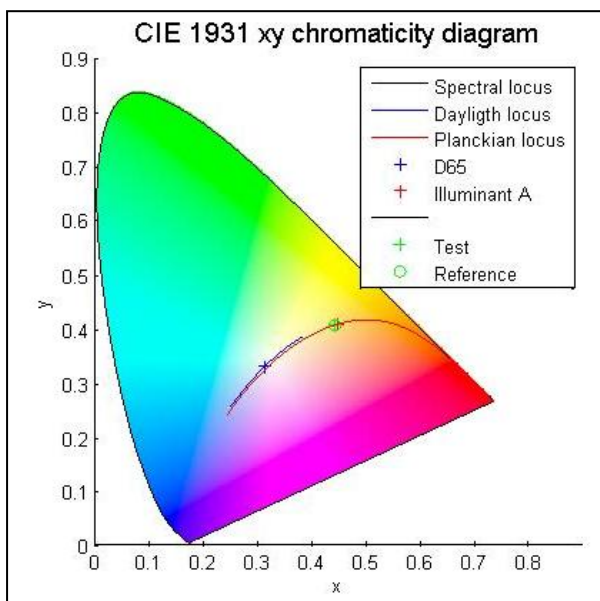
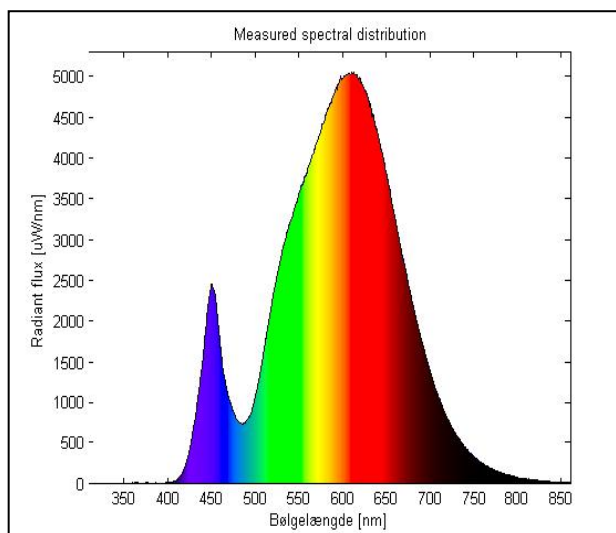
Operating conditions: Operation in free air. In operation 30 min before measurement.

Measurement conditions: Total spectral radiant flux is measured using a spectroradiometer with a fibercoupled 40 inch integrating. The light source is mounted at the side of the sphere and measurements are corrected for absorption loss. Spectral measurement from 200-1000 nm.

Measurements and color calculations:

Power [W]	Efficacy [lm/W]	Power Factor	T _{bulb} [°C]
ca. 5.2	ca. 50		
Radiant Flux [mW]		Luminous Flux [lm]	
841.6		260.1	
Corr. Color Temp. [K]	CRI (CIE: 13.3-1995)	DC	DC <math>< 5.4 \cdot 10^{-3}</math>
2930	81.3	3.2 · 10 ⁻³	True
x	y	u	v
0.4416	0.4059	0.2528	0.5228

Chromatic Color Coordinates:



i	Appearance under daylight	Swatch	CRI _i
1	Light greyish red		80.0
2	Dark greyish yellow		87.1
3	Strong yellow green		91.6
4	Moderate yellowish green		79.4
5	Light bluish green		78.0
6	Light blue		81.0
7	Light violet		86.7
8	Light reddish purple		66.4
9	Strong red		21.0
10	Strong yellow		68.0
11	Strong green		75.1
12	Strong blue		59.7
13	Light yellowish pink (skin)		81.1
14	Moderate olive green (leaf)		94.5

Light measurement report

Light source: New LED light source with CC for cooker hood

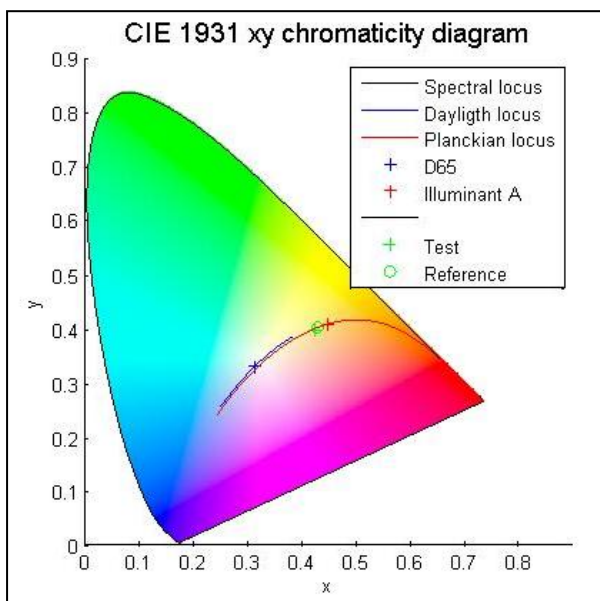
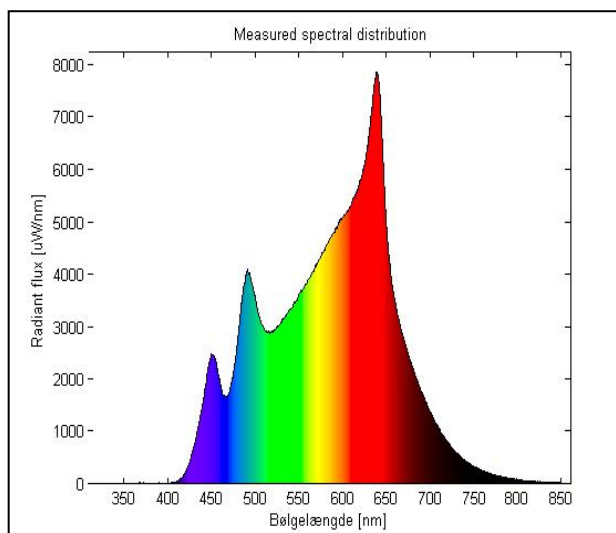
Operating conditions: Operation in free air. In operation 30 min before measurement.

Measurement conditions: Total spectral radiant flux is measured using a spectroradiometer with a fibercoupled 40 inch integrating. The light source is mounted at the side of the sphere and measurements are corrected for absorption loss. Spectral measurement from 200-1000 nm.

Measurements and color calculations:

Power [W]	Efficacy [lm/W]	Power Factor	T _{bulb} [°C]
7.2	41		
Radiant Flux [mW]		Luminous Flux [lm]	
1032		295.2	
Corr. Color Temp. [K]	CRI (CIE: 13.3-1995)	DC	DC <math>< 5.4 \cdot 10^{-3}</math>
3118	92.9	2.0 · 10 ⁻³	True
x	y	u	v
0.4249	0.3949	0.2467	0.5159

Chromatic Color Coordinates:



i	Appearance under daylight	Swatch	CRI _i
1	Light greyish red		96.6
2	Dark greyish yellow		93.0
3	Strong yellow green		90.7
4	Moderate yellowish green		96.0
5	Light bluish green		94.4
6	Light blue		87.4
7	Light violet		91.7
8	Light reddish purple		93.5
9	Strong red		93.8
10	Strong yellow		83.9
11	Strong green		94.6
12	Strong blue		79.1
13	Light yellowish pink (skin)		95.0
14	Moderate olive green (leaf)		95.2

Referencer

- ¹ "Energibesparelser med diodelys", Slutrapport for PSO projekt 336-54, <http://130.226.56.153/rispubl/NEI/nei-dk-4733.pdf> og <http://www.elforsk.dk/projektinfo.asp?projektID=43>
- ² http://www.centerforlys.dk/pdf/Udfasning_Hvad_er_omfattet_DCL.pdf
- ³ Fra Roblons hjemmeside:
http://www.roblon.com/en/roblon_fiber_optics/fiber_optics_lighting/roblon_fiber_optics/roblon_lighting_solutions.htm og katalog for XPO-LED <http://viewer.zmags.com/publication/bd28bbbd#/bd28bbbd/1>
- ⁴ ANSI C78.377 "Specification for the chromaticity of SSL products".
- ⁵ Peter Svendsen og Vagn Holk Lauridsen, "Analyser og kriterier for energimærkning af emhætter, byggende på udsugningseffektiviteten" hovedrapport for PSO- projekt nr. 336-04, Teknologisk Institut, juli 2006.
http://www.elforsk.dk/doks/336-004/336-004_rapport.pdf.
- ⁶ Astrid Espenhain, Kenneth Munch, Carsten Dam-Hansen og Steen Traberg-Borup, "Kvalitetsvurdering af LED lyskilder og armaturer", slutrapport for PSO projekt 339-040, sept. 2009. http://www.elforsk.dk/doks/339-040/339_040_Rapport_endelig.pdf
- ⁷ http://www.osramled.co.uk/Resources/CA50-2009-11-17-en-with_Application.pdf
- ⁸ CIE 13.3.1995 "Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources", ISBN 978 3 900734 57 2
- ⁹ DS/EN 61591, "Emhætter til husholdningsbrug, Metoder til måling af brugsegenskaber", København 1997.
- ¹⁰ "Recommendations for Testing and Evaluating Under-cabinet Luminaires", Vol. 2 Issue 3, Troy, New York, USA, 2007.