

# Slutrapport for Hybrid belysning på skolebænken

PSO 343-036



---

Denne rapport indeholder en beskrivelse af arbejdet udført i og resultaterne af forsknings- og udviklingsprojektet "Hybrid belysning på skolebænken" og udgør slutrapportering for dette projekt.

Projektet er gennemført i et samarbejde imellem følgende partnere: DTU Fotonik, Roskilde Universitet (RUC), Designskolen Kolding, Ibsen el-anlæg A/S og Stevns Kommune. Projektet har været under ledelse af:

### **DTU Fotonik**

Forskningsleder, Professor Paul Michael Petersen

Frederiksborgvej 399, Bygn. 128, Postboks 49,

4000 Roskilde

CVR-nr.: 30060946

Projektet er finansieret af Dansk Energi under Elforsk's PSO program, indsatsområde LED belysning og adfærd barrierer og virkemidler. Projektet har projekt nr. PSO 343-036, og blev startet i april 2011. Projektet er afsluttet i marts 2014.

*Paul Michael Petersen*

*DTU Fotonik, Roskilde, 31. marts 2014.*

## Indhold

Forord af Poul Arne Nielsen .....	4
Indledning til Hybrid belysning på skolebænken.....	5
Vigtige parametre ved sammenligning af forskellige lyskilder.....	8
Lyskildens farvegengivelse .....	8
Lyskildens farvetemperatur.....	9
Lyskildens lysstrøm og effektivitet .....	9
Implementerede lyssystemer på Hotherskolen .....	15
Hybridbelysning med solceller og LED system .....	15
Lysskakt med LED-hybridbelysning .....	16
Fiber hybridbelysning .....	17
Sammenligning af belysningssystemer opsat på Hotherskolen .....	17
Parans solkollektor system, SP3 .....	17
Hybridarmaturet.....	20
Test af LED komponenter til Hybridarmatur .....	21
Optimering af lyskvalitet fra Paranssystem.....	21
Optisk system til blanding af sol og LED lys.....	23
Formidling.....	26
Konklusion .....	30

Rapporten er udarbejdet af Paul Michael Petersen, Anders Thorseth og Carsten Dam-Hansen, DTU Fotonik

---

## Forord af Poul Arne Nielsen

Klimaet ændrer sig. Vi får varmere somre, mere regn, højere middelvandstand og større risiko for ekstremt vejr. Der er behov for øget fokus på en forebyggelse af klimaforandringer ved at begrænse CO<sub>2</sub>-udledningen. Klimaforandringer er en af de helt centrale udfordringer nu og i fremtiden, og Stevns kommune arbejder for det langsigtede og ambitiøse mål at blive en CO<sub>2</sub>-neutral kommune.

Der er et stadig stigende behov for, at der sker en udvikling af nye teknologier og en forbedring af de eksisterende, der kan være med til at sikre en begrænsning af CO<sub>2</sub>-udledningen, og her udgør belysning en vigtig del af energi- og klimaområdet. Udviklingen af fremtidens lys er kendetegnet ved energieffektivitet, høj designkvalitet, funktionalitet og brugervenlighed.

På Hotherskolen i Hårlev har Stevns kommune - sammen med forskere fra RUC og DTU Fotonik, en Lys- og armaturdesigner og en elinstallatør - haft et demonstrationsprojekt støttet af PSO-midlerne fra ELFORSK-puljen. Siden august 2012 har der i et klasselokale på Hotherskolen været ophængt LED lamper, der drives af solceller fra Hotherskolens tag. Lamperne er undervejs blevet testet for lyskvalitet, forbrugstid og styring. Omdrejningspunkt for forsøget har været at skabe et belysningsystem, der leverer den belysning, som brugerne er vant til, men som kan spare på energien og derved på CO<sub>2</sub>-belastningen - og derudover, som en ekstra bonus, kan levere en bedre belysningskvalitet.

Kommunen har besluttet at videreudvikle succesen og har derfor igangsat et energibesparende belysningsprojekt på Store Heddinge Skole, der har afsæt i den viden og erfaring, som projektet på Hotherskolen har givet os.

Jeg vil gerne takke for det store engagement, energien og inspirationen, der er lagt i dette unikke projekt fra de mange aktørers side.

Poul Arne Nielsen

Borgmester, Stevns Kommune

November 2013



---

## Indledning til Hybrid belysning på skolebænken

LED-belysning eller såkaldt Solid-State Lighting har de seneste år gennemgået en afgørende udvikling. Hvert 3. år er det således lykkedes at opnå en fordobling af lysudbyttet, og LED er godt på vej til at blive mere energieffektivt end selv de mest effektive lyskilder, som kendes i dag. Ud over energibesparelserne udmærker LED sig ved en meget lang levetid – op til 50.000 timer. Den høje energieffektivitet samt den lange levetid peger direkte mod udvikling af nye grønne lysteknologier baseret på LED.

I nærværende projekt har vi udviklet en ny type af energibesparende lyssystemer, som anvender en kombination af dagslys og LED belysning. Fordelen ved disse systemer er at de giver endnu større energibesparelser end LED teknologien alene, og systemerne har mulighed for at udnytte dagslysets høje lyskvalitet

De nye belysningssystemer er i projektet blevet implementeret og testet på Hotherskolen i Hårlev i Stevns kommune , og der er i projektet vurderet både kvantitative og kvalitative aspekter indenfor kontrol styring, energiforbrug, forbrugstid, lyskvalitet samt tilsyn af de nye systemer.

LED-systemernes mulighed for at blive individuelt styrbare i både intensitet og farvetone giver en unik mulighed for at kombinere disse lyskilder med dagslys. Vi viser i rapporten at hybride belysningssystemer, som benytter en kombination af sollys og LED belysning har et el-besparelses potentiale, som er større end den mest effektive belysningsteknologi, som kendes i dag (type T5 lysstofrør).

Hybride belysningssystemer, som benytter en kombination af sollys og LED belysning, har et el-besparelsespotentiale, der er større end de mest effektive belysningsteknologier, som i dag benyttes til indendørsbelysning. På trods af det store elektricitet- og CO<sub>2</sub>-besparelsespotentiale er der en række problemstillinger, som skal løses før teknologien kan udvikles til et kommercielt produkt. De væsentlige problemer med eksisterende hybride fiberoptiske systemer er at prisen på belysningssystemerne er for høj. Dette betyder, at langtidsomkostningerne for disse lyssystemer for forbrugeren er højere end for lyssystemer, som udelukkende benytter LED

---

I projektet er der på Hotherskolen på Stevns implementeret følgende tre hybride belysningssystemer:

- Hybrid lysskakt med LED i et gangareal på skolen
- LED med solceller i et klasselokale
- Fiberbelysning, hvor sollys igennem tynde optiske fibre kobles ind i skolens lokaler

Energieffektiviteterne for disse lyssystemer er i projektet blevet sammenlignet med energieffektiviteten for energisparepærer.

Projektpartnerne i projektet har været DTU Fotonik, RUC, Stevns kommune, Design Skolen i Kolding og Ibsen EI i Roskilde.

Jeg vil gerne takke følgende personer for en meget stor og værdifuld arbejdsindsats i projektet: Carsten Dam-Hansen, Anders Thorseth, Dennis Corell, Tyge Kjær, Araceli Bjarklev, Birgitte Nielsen, Hans-Jørgen Jørgensen og Kent Laursen.

Som en vigtig del af projektet er der indgået en partneraftale mellem Stevns Kommune, RUC og DTU Fotonik med det formål at nedsætte energiforbruget til belysning i kommunen.

Projektet har været støttet af Elforsk, Region Sjælland og Velux Danmark A/S.

Paul Michael Petersen

Projektleder, Hybridbelysning på skolebænken

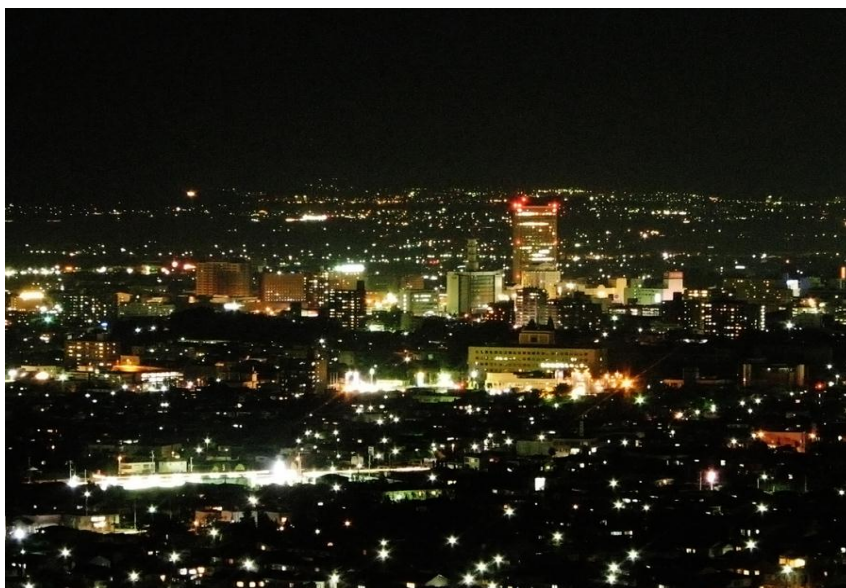


## Nye energibesparende lysteknologier baseret på LED og dagslys

Indendørs og udendørsbelysning er ansvarlig for omkring 20 % af det samlede elforbrug i verden. Hermed er både indendørsbelysning og udendørsbelysning ansvarlig for udledning af store mængder drivhusgasser. I skoler, kontorer og boliger vil 20 til 50 % af det samlede energiforbrug skyldes elforbrug til belysning. Udover at omkostningerne til belysning kan være betydelige, så har det høje strømforbrug også en skadelig effekt på miljøet. Ved at erstatte glødepærer og halogenpærer med LED belysning, kan der opnås store besparelser på udgifterne til elektricitet. Det er en kompliceret sag at bestemme den faktiske besparelse, fordi lyskildens levetid og pris også vil spille en stor rolle ligesom udgifterne til udskiftning og vedligeholdelse har betydning. I dette afsnit vil vi belyse denne mere komplicerede sammenhæng, men allerførst vil gives en introduktion til nogle vigtige parametre for lyskilder.

Diodebelysning har de seneste år gennemgået en afgørende udvikling og anses af mange for at være fremtidens lysteknologi. Lysudbyttet pr. W for diodelys fordobles hvert 3. år. Dioder forventes indenfor en overskuelig tidshorisont at blive mere energieffektive end de mest effektive kendte lyskilder i dag.

I september 2009 udgik de gamle glødepærer af produktion, og i 2012 blev de klare glødepærer udfaset. Udfasningen er blevet nødvendig, fordi energieffektiviteten i glødepærene ikke er god nok til at nå de mål for energibesparelser, som er fastlagt politisk i både Danmark og EU.



*Figur 1. Belysning i byerne er ansvarlig for et meget stort elektricitetsforbrug. I nogle byer udgør forbruget mere end 50 % af det samlede elektricitetsforbrug*

Belysningsområdet står overfor meget store udfordringer i de kommende år. Der er tale om et globalt teknologiskift, hvor politisk regulering og lovgivning af miljømæssige årsager udfaser kendte lyskilder såsom glødepærer og kviksølvslamper.

I de kommende år skal en lang række konventionelle lyskilder udskiftes, og der skal findes de bedst mulige erstatninger. LED er en ny lyskilde, som giver energibesparelser samt en lang række nye muligheder, men den har også en lang række børnesygdomme. Derfor er det vigtigt, at vi tester og kvalitetssikrer denne udskiftningsproces. I det følgende gives en oversigt over hvilke parametre der er vigtige, når vi skal kvalitetsvurdere nye energibesparende lyskilder.

### Vigtige parametre ved sammenligning af forskellige lyskilder

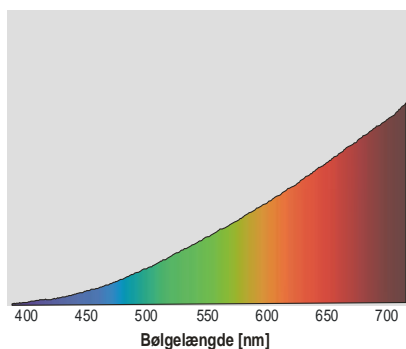
LED vil i løbet af få år dominere den almene bolig, kontoret og udendørsbelysningen, men hvordan sikrer vi tilfredse brugere? Svaret er, at vi skal teste lyskilderne for en række parametre, som beskriver vigtige egenskaber for såvel energieffektivitet som lyskvalitet. Disse parametre er farvegengivelse, farvetemperatur, lysstrøm, belysningsstyrke og effektivitet. I det følgende defineres disse parametre.

### Lyskildens farvegengivelse

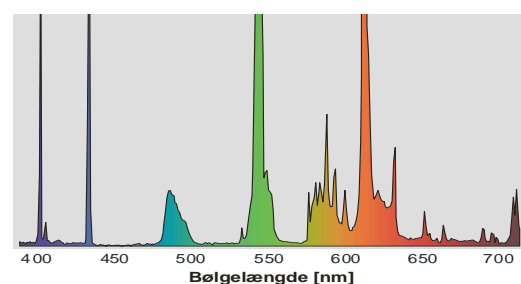
Lyskildens farvegengivelse udtrykkes ved Ra-indekset, som angiver lyskildens evne til at gengive farver på belyste genstande. Farvegengivelsen måles i forhold til farverne i en referencebelysning, eksempelvis en glødepære eller dagslyset. Ved målinger benyttes otte standardiserede farver, og ved fuldstændigt sammenfald har lyskilden et farvegengivelsesindeks (Ra-indeks) på 100.

Lyskildernes spektre er vigtige for lyskilderne farvetemperatur og farvegengivelse. I Figur 2 er vist spektrene for henholdsvis en glødepære (Figur 2 (a)) og et lysstofrør (Figur 2 (b))

(a)



(b)



Figur 2. Bølgelængdespektrene for henholdsvis en glødepære (a) og et lysstofrør (b)



## Lyskildens farvetemperatur

Hvidt lys, som udsendes fra en lyskilde, har en farvetone som angiver om lyset er koldt (blåligt) hvidt eller mere varmt (rødligt) hvidt som kendes fra en solnedgang.

Farvetemperaturen knytter sig til lyskildens farvetone og den angives i Kelvin (K). Farvetemperaturen bestemmes ved at sammenligne farveindtrykket fra lyskilden med farveindtrykket fra et opvarmet sort legeme. Når lyskilden og det sorte legemes farver er ens, registreres det sorte legemes temperatur i Kelvin, og lyskilden siges at have den pågældende farvetemperatur. En høj farvetemperatur svarer til blåligt hvidt lys og en lav farvetemperatur svarer til rødligt hvidt lys. I Figur 1 er vist et stearinlys, som har en farvetemperatur på 1500 grader Kelvin.



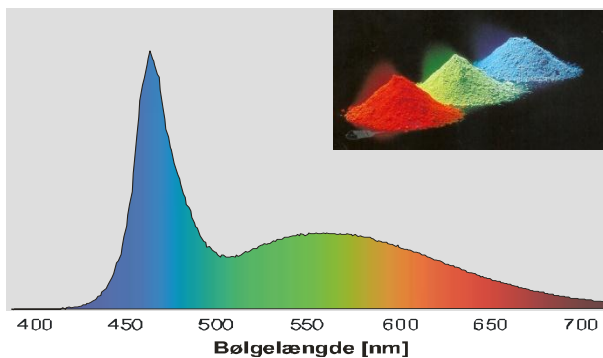
Figur 3. Stearinlys har en farvetemperatur på 1500 K

## Lyskildens lysstrøm og effektivitet

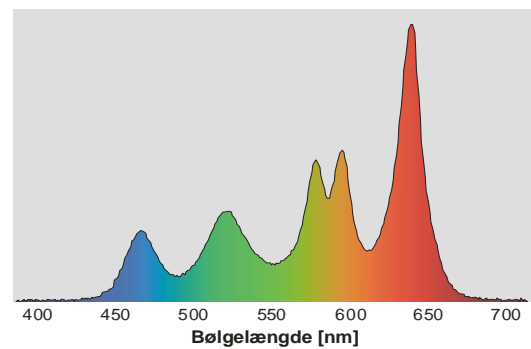
En lyskildes lysstrøm angiver det samlede lys fra en lyskilde og den måles i SI enheden lumen (symbol: lm) og belysningsstyrken måles i lux eller lumen pr. m<sup>2</sup>. Lyskilders effektivitet måles i lumen pr. Watt, og den er et udtryk for effektforbruget for lyskilden. De bedste dioder, vi har i dag, har en energieffektivitet på op til 140 Lumen/W, mens glødepærer ligger på 8-12 Lumen/W, og de mest effektive lysstofrør ligger på omkring 125 Lumen/W.

LED teknologien, som i dag benyttes til belysning, er enten baseret på blå lysdioder med fosforescerende stoffer eller lysdioder som udsender hvidtlys ved hjælp af farvede lysdioder. I Figur 4 (a) er vist spektret for en blå diode med fosforescerende materialer. Fordelen ved denne LED er at den er simpel, fordi den kun anvender én lysdiode. I Figur 4(b) er vist RGB dioden, som anvender flere farvede lysdioder. Fordelen ved denne lyskilde er, at farvetemperaturen kan varieres og man kan opnå en høj Ra-værdi.

(a)



(b)



Figur 4. (a) Lysspektret fra en blå lysdiode med fosforescerende materialer. (b) Lysspektret fra en RGB lysdioder som anvender 5 farvede dioder

### Vurdering af langtidsomkostningerne ved energibesparende lyssystemer

I dette delafsnit vurderes langtidsomkostningerne for forskellige energibesparende lyssystemer. Udgifterne til en lyskilde afhænger af følgende faktorer:

- Elprisen
- Lyskildens pris
- Pris for udskiftning af lyskilden
- Lyskildens effektivitet (lm/W)
- Lyskildens levetid

På baggrund af ovenstående udgifter sammenlignes i det følgende langtidsudgifterne af projektets hybride lyssystemer med langtidsudgifterne af typiske energisparepærer, som benyttes som benyttes til belysning i skolerne . Vi indfører begrebet Mega-lumen-time-pris, som er den lysmæssige ækvivalent til det elektriske kWtime-pris. En Mega-lumen-time svarer ca. til den lysmængde, som skal bruges til at oplyse et lille kontor (20-30 m<sup>2</sup>) i en måned.

De lysteknologier, der vurderes er følgende:

- Dagslys fibersystem, der mekanisk følger solen og opsamler direkte sollys og transmitterer lyset gennem en optisk fiber til bestemmelsesstedet
- Lystunnel , der passivt optager lys gennem et vindue og transmitterende det gennem et reflekterende rør til bestemmelsesstedet
- LED, belysningsteknologi med lavt energiforbrug, lang levetid og høj anskaffelsespris

- LED og Solceller, LED belysning forsynet direkte med strøm fra solceller, uden el-net forbindelse. Systemet har backup fra et genopladeligt batteri, som oplades når der er meget dagslys udenfor
- Lysstofrør, nyeste generation af traditionelle fluorescerende rør
- Glødepære, forældet belysningsteknologi under udfasing, taget med som reference

Det økonomiske beslutningsgrundlag findes ved at udregne prisen på en mega-lumen-time, altså hvad det koster at få en bestemt mængde nyttigt lys. I det følgende vil vi beregne udgifterne til elektricitet, indkøb af lyskilde og vedligeholdelse af lyssystem.

Forbrugerens udgifter i vores model afhænger som nævnt ovenfor af:

- Elprisen
- Lyskildens pris
- Pris for udskiftning og vedligeholdelse af lyskilden

Udgiften til elektricitet bestemmes af prisen pr. kWh for strømmen samt hvor effektiv lyskilden er til at udsende lys, dvs. lumen pr. Watt. Eludgiften i kr. for udsendelse af en Mega-lumen-time kan beregnes ud fra følgende udtryk :

$$Eludgift = \frac{\text{Pris pr.kWh} \times \text{Effekt} \times 1000000}{\text{lyskildens lysstrøm} \times 1000}$$

Udover denne udgift vil der være udgifter, når lyskilden skal udskiftes: Udskiftningsomkostninger i kr. for udsendelse af en Mega-lumen-time er angivet ved:

$$Udskiftningsudgift = \frac{\text{arbejds løn til udskiftning} \times 1000000 \text{ timer}}{\text{lyskildens lysstrøm} \times \text{lyskildens levetid}}$$

Endelig er der en udgift til indkøb, som vil afhænge af lyskildens pris. Lyskildeudgiften i kr. for udsendelse af en Mega-lumen-time er angivet ved:

$$Indkøbsudgift = \frac{\text{Pris for ly skilden} \times 1000000 \text{ timer}}{\text{ly skildens lysstrøm} \times \text{ly skilden levetid}}$$

Den totale udgift er summen af de 3 ovenstående udgifter. Fordelen ved at benytte ovenstående model er at den giver både information om elbesparelspotentialet samt om de totale udgifter, som er forbundet med indkøb, vedligeholdelse og drift af lyskilden.

For de teknologier, der er afhængige af dagslys, skal det tages med at der skal være en redundans af backupkapacitet, der kan træde til når sollys ikke er tilgængeligt. Dette betyder f.eks., at der i systemer med LED som drives af solceller skal være et batteri, som kan oplades når der er meget dagslys, og som kan give strøm til LED systemet når der ikke er nok dagslys udenfor. Backupkapaciteten er af betydning på vore breddegrader, da der gennemsnitligt i Danmark er 2 % nattemørke og 30 % overskyet i dagtimerne fra 8-16. For fibersystemet er dette ekstra kritisk, da det kræver direkte sollys.

I tabel 1 er vist omkostningerne for udsendelse af en mega-lumen-time for følgende teknologier:

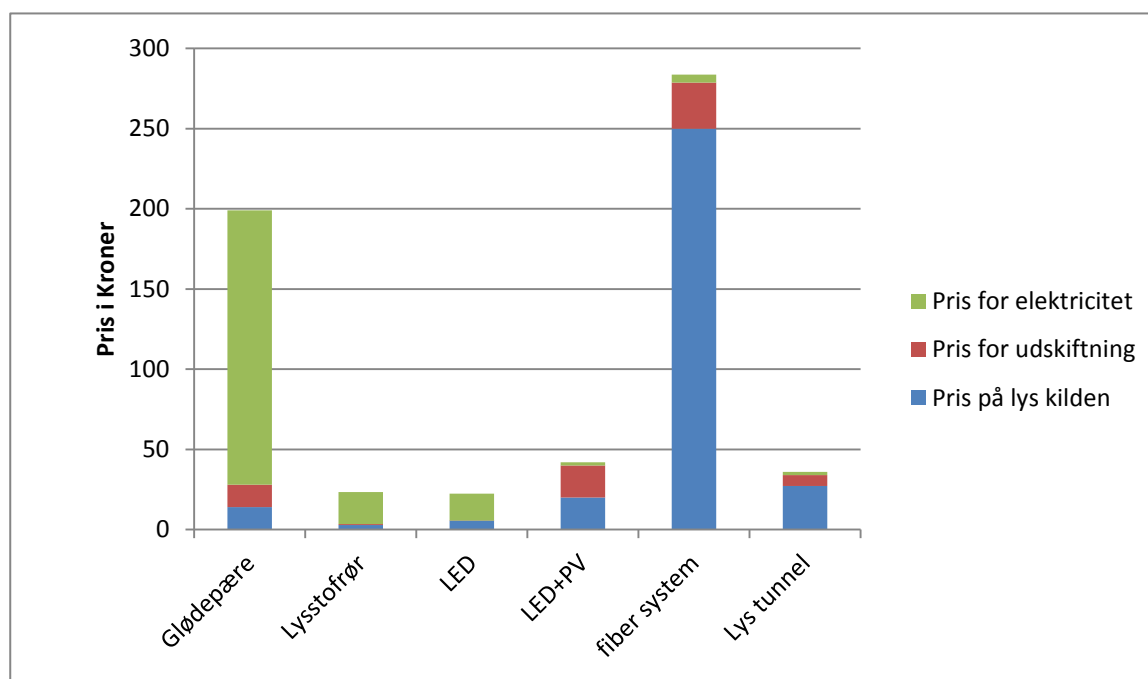
- Glødepære
- Energisparepære
- LED
- LED med solceller og batteri back-up
- Fiberbelysning
- Lysskakt fra Velux

De indsatte værdier er estimater, der kan ændres, men de giver et forholdsvist retvisende billede af udgiftsfordelingen til indkøb, vedligeholdelse og drift.

Cost per Megalumen Hours	Incandescent	Fluorescent (15 W)	LED (15 W)	LED+PV	Fiber system	Light tunnel
Price of light source:	10 kr.	50 kr.	200 kr.	400 kr.	25000 kr.	4000 kr.
Luminous flux	700 lm	700 lm	700 lm	400 lm	2000 lm	2900 lm
Lifetime of light source	1000 h	25000 h	50000 h	50000 h	50000 h	50000 h
Wattage of light source	60 W	15 W	5 W	-	5 W	-
Cost of light source:	14 kr./Mlmh	2,8 kr./Mlmh	5,7 kr./Mlmh	20 kr./Mlmh	250 kr./Mlmh	27,3kr./Mlmh
Cost of replacement/maintanance:	14 kr./Mlmh	0,64 kr./Mlmh	0,03 kr./Mlmh	20 kr./Mlmh	28.6 kr./Mlmh	6,8 kr./Mlmh
Cost of electricity:	171 kr./Mlmh	20 kr./Mlmh	16,7 kr./Mlmh	2 kr./Mlmh	5 kr./Mlmh	2 kr./Mlmh
Total Megalumen hour cost	199 kr./Mlmh.	23,4 kr./Mlmh.	22,4 kr./Mlmh	42 kr./Mlmh	283,6 kr./Mlmh	36,1kr./Mlmh

*Tabel 1 Parameterværdier for de forskellige lysteknologier og de beregnede omkostninger for disse. Der er regnet med en forholdsvist høj levetid på 25000 timer for lysstofrør. For energisparepærer er den typisk 10.000 timer*

Resultatet af analysen er også vist grafisk i Figur 5, og det ses at LED i dag er den billigste belysningsform med 22,4 kr. pr. Mlmh med lysstofrør som den næstbilligste med en udgift på 23,4 kr. pr. Mlmh. Dette tal vil imidlertid blive højere hvis vi indsætter en levetid på 10.000 timer for en energisparepære. Blandt de hybride belysningssystemer er det hybrid lysskakt, som giver den billigste belysning med 36,1 kr pr. Mlmh. LED med solceller koster 40 kr. pr. Mlmh og hybrid fiberbelysningssystemet koster 283,6 kr. pr. Mlmh. Denne meget høje udgift skyldes at fiberbelysningssystemer i dag er dyre. Hybride fiberbelysningssystemer har et elbesparelspotentiale, der er større end de mest effektive belysningsteknologier, som i dag benyttes til indendørsbelysning. På trods af det store energi- og CO<sub>2</sub>- besparelspotentiale er der en række problemstillinger, som skal løses før teknologien kan udvikles til et konkurrencedygtigt, kommercielt produkt. Det væsentlige problem med fiberoptiske systemer er, at prisen på belysningssystemerne er for høj. I dag koster systemerne omkring 25.000 kr. i indkøb. Selvom udgifterne til fiberoptiske systemer er høj, så er den ikke væsentlig højere end udgiften til glødepærer som iflg. analysen koster 199 kr. pr. Mlmh. Hvis fibersystemerne kan blive prisbillige, kan det ikke udelukkes at de i fremtiden kan blive konkurrencedygtige.



Figur 5 Søjlediagrammet viser fordelingen af udgifterne for de forskellige lysteknologier

I den sammenlignende analyse er ikke medtaget krav til lyskvaliteten eller lyskildens miljøpåvirkning. I det næste afsnit skal vi se på lyskvaliteten af lyssystemerne, og her er det specielt lysskakt, som har høj lyskvalitet. Sidstnævnte påvirkning kan tale for at man i de kommende år videreudvikler de hybride belysningssystemer, således at disse bliver billigere.



---

I det foreliggende eksempel ses, at energisparerpærer stadig har en lav pris i forhold til nyere teknologier, men her er det især lyskvaliteten, som kan være et problem. Desuden ses at fiberlyssystemet har en meget høj pris i forhold til konkurrenterne. Det er vigtigt, at lægge mærke til at forudsætningerne spiller en meget stor rolle for resultatet af beregningen.

## Implementerede lyssystemer på Hotherskolen

I forbindelse med projektet *Hybridbelysning på skolebænken* er der blevet udvalgt lokaler, der er rimeligt repræsentative for større bygninger og institutioner. Specielt har vi været interesseret i at installere hybridbelysning i lokaler, hvor der er begrænset tilgang af dagslys, og hvor LED-belysningen vil udgøre en væsentlig andel af den nødvendige belysning. Det har også været vigtigt at installere hybridbelysning på skolen for at opnå en væsentlig elbesparelse på skolen. I det følgende beskrives de hybride belysningssystemer, som er implementeret på Hotherskolen

### Hybridbelysning med solceller og LED system

I et af klasselokalerne på skolen er der opsat LED med solceller som vist på billedet i Figur 6. Lysarmaturerne til LED armaturerne er udviklet af Kent Laursen fra Kolding Designskole. På skolens tag er der opsat solceller, som giver strøm til LED systemerne, og der er installeret genopladelige batterier, som oplades af solcellerne og giver den nødvendige strøm til LED lyskilderne, når der ikke er nok dagslys udenfor. Når batterierne ikke har strøm

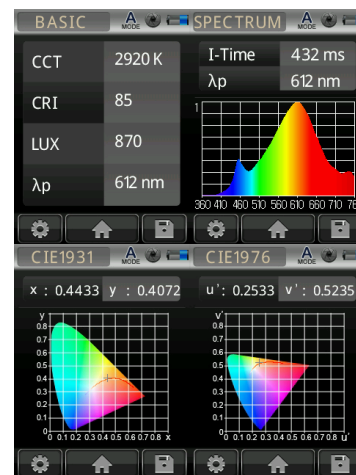


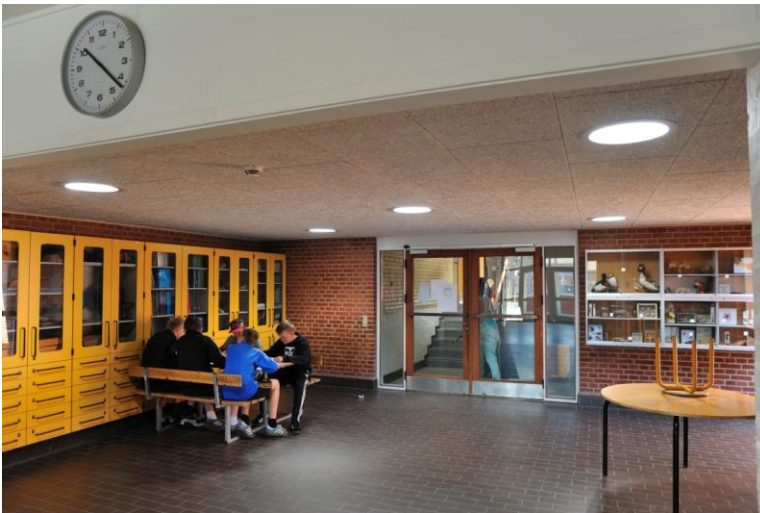
Fig 6 (a) I et klasselokale på Hotherskolen er implementeret LED belysning som drives af solceller på skolens tag. Armaturet til LED belysningen er udviklet af Kent Laursen. (b) Karakterisering af lyset af LED systemet. Det ses at farvetemperaturen er 2920 K og Ra indekset er 85

nok, tages der strøm fra elnettet til armaturerne, så man altid har lys i skolens åbningstid. Det er kun i mørke vinterperioder, at der tages strøm fra elnettet - normalt er der strøm nok på batterierne til, at lampen kan virke i skoletiden.

## Lysskakt med LED-hybridbelysning

I forbindelse med projektet er der i et meget mørkt gangareal blevet etableret lysskakter. Skakterne leder sollys fra taget ned i gangområdet. Når solen ikke skinner, eller hvis der ikke er lys nok udenfor, tænder en række LED'er i røret, så der kan komme lys ud af det hele døgnet rundt. Man kan ikke slukke for sollyset igennem lysskakten om dagen. Men om aftenen kan man undlade at tænde for LED-lyset.

(a)



(b)

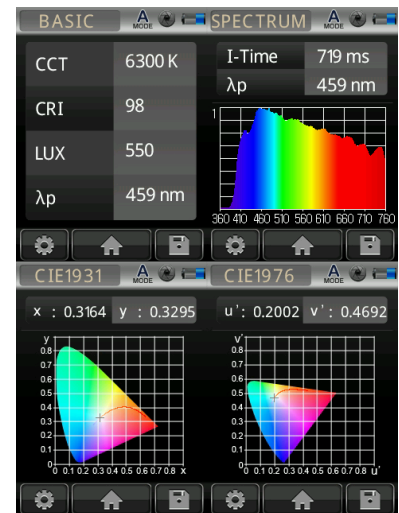


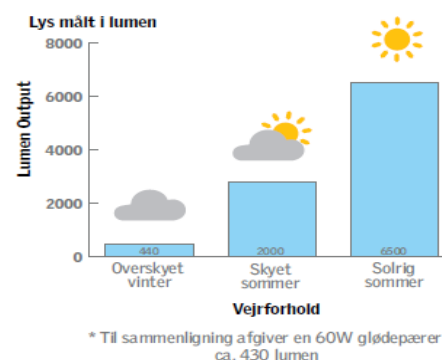
Fig 7 (a) I et gangareal hvor eleverne opholder sig i frikvarteret på Hotherskolen er implementeret hybrid lysskakt med LED belysning. (b) Karakterisering af dagslyset. Det ses at farvetemperaturen er 6300 K og Ra indekset er 98

I Figur 7 (a) er vist gangarealet, hvor der er installeret 6 lysskakte. Figur 7 (b) viser at farvegengivelsen er  $R_a=98$ , hvilket indikerer at lysskakterne giver en meget høj lyskvalitet. Figur 8 (a) viser hvorledes lyset kobles ind i bygningerne med ovenlysvinduer, og Figur 8 (b) viser at lysskakten på en solrig sommerdag sender mere en 6000 lumen ind i bygningen.

(a)



(b)



Figur 8.(a) Ovenlysvindue hvor sollyset kobles ind i lystunellen. (b) Lys målt i lumen som typisk sendes ind igennem lysskakten

## Fiber hybridbelysning

Ved fiber hybridbelysning indfanges sollyset i en såkaldt heliostat, der er placeret på taget og drejer sig efter solens position på himlen. Fra heliostaten føres lyset via optiske kabler ned til et armatur. I armaturet sidder en lyssensor, der registrerer mængden af sollys, og tænder for en indbygget LED-lyskilde, når solskinnet ikke leverer tilstrækkeligt lys.



Figur 9. Hybrid fiberbelysning som er indstalleret i et gangareal på Hotherskolen

I det følgende afsnit er det hybride fiberbelysningssystem karakteriseret og Paranssystemer er blevet videreudviklet, således at lyskvaliteten er blevet forbedret.

## Sammenligning af belysningssystemer opsat på Hotherskolen

### Parans solkollektor system, SP3

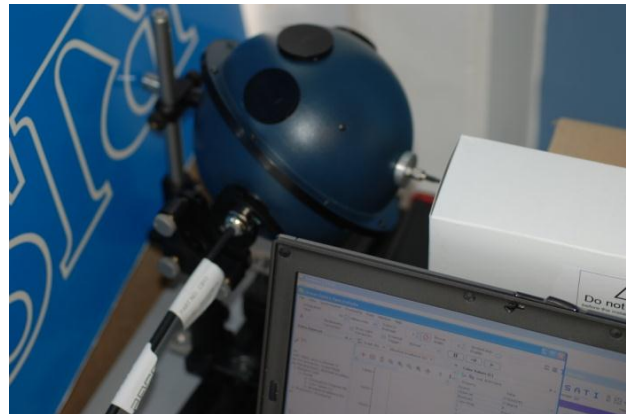
De to SP3 solkollektor systemer fra Parans i Sverige blev modtaget i efteråret 2012. De er blevet monteret til test på taget af bygning 130, Figur 10, og test er kørt i ugerne 51-52, hvor



det, grundet årstiden samt omkringliggende omgivelser, kun var muligt at samle dagslys op i tidsrummet kl. 09:20 - 15:45.



Figur 10 Opsætning af SP3 system med optisk probe monteret på undersiden af systemet til måling af spektral irradians indfaldende på systemet



Figur 11 Integrerende kugle som opsamler alt lys transmitteret igennem et 20 m fiberbundet fra SP3 systemet og måles med et spektrometer

På undersiden af det ene SP3 system blev der monteret en cosinus diffuser, (se **Fejl! Henvingskilde ikke fundet.**10) denne diffuser følger med rotationen af systemet og samler det indfaldne lys op i samme plan, som det rammer linserne i SP3 systemet. Lyset bliver transmitteret igennem en fleksibelt 20m optisk fiber og hen til et spektrometer til måling den af spektral irradians, der rammer systemet.  $E_{in}(\lambda)$  er den målte spektrale irradians, der rammer linsefladen på SP3 solkolektor systemet. Et eksempel på en sådan målt spektralfordeling er vist med den sorte kurve i Figur 18. Ved at vægte med øjets lysfølsomhed og integrere over det synlige område kan bestemmes illuminansen eller belysningsstyrken på linsefladen på SP3 solkolektor systemet, denne kaldes  $E_{v,in}$  og måles i  $\text{lux} = \text{lm}/\text{m}^2$ . Den lysstrøm, der rammer linsefladen med arealet  $A$ , måles i  $\text{lm}$  og er angivet ved:

$$\Phi_{v,in} = E_{v,in}A$$

Hvert af SP3 solkolektor systemerne er monteret med 6 stk. 20 m fiberbundter. Hvert fiberbundet består af 6 PMMA fibre, der hver opsamler lyset fra en af fresnelinserne på solkolektoren. Det totalt transmitterede lys igennem et fiber bundt er målt i en fremadflux eller  $2\pi$  integrerende kugleopstilling med et spektrometer.  $\Phi_{out}(\lambda)$  er den målte spektrale strålingsstrøm fra fiberenden og den måles i  $\text{W}/\text{nm}$ . På Figur 12 er vist et eksempel på en sådan målt spektralfordeling.

Effektiviteten af systemet kan estimeres som funktion af bølgelængde ud fra de målte spektralfordelinger efter:

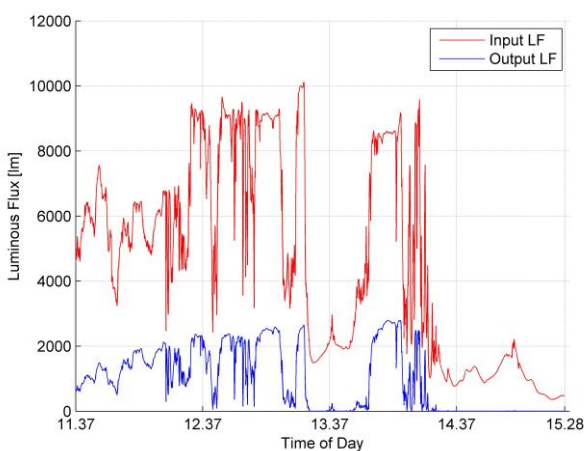


$$\eta = \frac{\Phi_{\text{out}}(\lambda)}{A E_{\text{in}}(\lambda)}$$

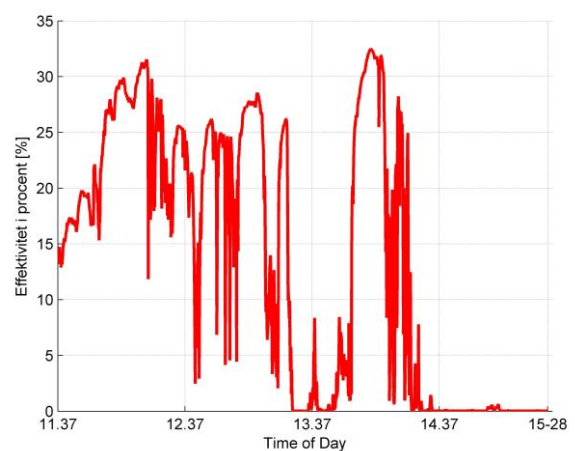
Vi er mere interesserede i hvorledes den totale lysstrøm igennem systemet ændrer sig som funktion af tiden i løbet af dagen. Vi definerer så effektiviteten af systemet som forholdet imellem den indfaldende lysstrøm på linsefladen og den transmitterede lysstrøm:

$$\eta_v = \frac{\Phi_{v,\text{out}}}{\Phi_{v,\text{in}}} = \frac{\Phi_{v,\text{out}}}{A E_{v,\text{in}}}$$

På grafen i Figur 12 er vist hhv. den indfaldende og transmitterede lysstrøm som funktion af tiden på dagen. Og på grafen i Figur 13 er vist den tilsvarende effektivitet af systemet ligeledes som funktion af tiden på dagen.



Figur 12 Grafen viser den målte lysstrøm der rammer linsearealet af SP3 systemet (rød linie) og den igennem fiberbunder transmitterede lysstrøm (blå linie), som funktion af tiden på dagen.



Figur 13 Målt effektivitet af SP3 system som funktion af tiden på dagen.

Målingerne vist i Figur 12 og Figur 13 er foretaget den 17. oktober 2012. Målingerne blev startet klokken 11:37 og de blev logget i 4 timer. Målingerne blev stoppet igen 15:28, på grund af skyggepåvirkning fra en nærliggende bygning. Vejrforholdene denne dag var karakteriseret ved lette tynde skyer på himlen ved dagens begyndelse og en del dug på SP3 systemet. Der blev målt ca. 100-200 lm ud af fibre under denne del af dagen. Der var blå himmel nogle steder, og forhåbningen var, at skyerne ville forsvinde, og at fuldt u-filtreret sollys kunne ramme systemet hen over middag. Der var dog et tyndt skydække over himmelen det meste af dagen, men 450 lm blev observeret fra fibre undervejs (dog stadig med et tyndt skydække).

Det ses at både ind- og outputtet af systemet varierede en del i løbet af dagen, dette skyldes skyer, der glider ind foran solen. Det ses også, at der kun kommer lys ud af systemet, når der er direkte sollys på systemet, hvis skydækket bliver for tykt, kommer der intet lys ud af

systemet. Systemeffektiviteten, når der er sollys, ses at ligge forholdsvis stabilt på omkring 25-30 %.

Det målte effektforbrug af Parans SP3 systemet er et sted imellem 24 – 36 W, hvilket er væsentlig mere end det af Parans oplyste effektforbrug på omkring 10 W i gennemsnit (Parans, 2012). Dette vil give output effektiviteter på omkring 77 - 115 lm/W, dette vil være på det direkte output, inden blanding af lyset samt tilføjelse af rødt lys.

Efterfølgende er begge opstillede systemer gået i en tilstand, hvor de ikke vender sig med solen og i praksis ikke længere fungerer. Der vil blive installeret ny styringselektronik i de to systemer, hvilket skulle afklare dette problem. Dette udføres af en tekniker fra Parans som kommer til DTU Fotonik, Risø i januar måned 2013.

## Hybridarmaturet

Armaturet er designet af Kent Laursen, Kolding Designskole og de lystekniske aspekter er undersøgt og udviklet af DTU Fotonik. Armaturet er designet og udviklet til at benyttes til belysning på et gangareal på Hotherskolen. Princippet er, at sollys ledes fra en solkollector fra firmaet Parans til armaturerne ved hjælp af lysledende optiske fibre. Her blandes lyset fra fibrene med rødt LED lys, for at korrigere for grønfarvningen af fiberlyset, som skyldes et transmissionstab af rødt lys i fiberen. Når sollyset ikke er til rådighed, skal armaturerne slå over til rent hvidt LED lys.



Figur 14 Foto af gang på Hotherskolen, hvor Hybridarmaturerne skal opsættes.



Figur 15 Hybrid armaturet, med fiberlys.

De lystekniske aspekter omfatter:

- Test af LED komponenter til Hybridarmatur

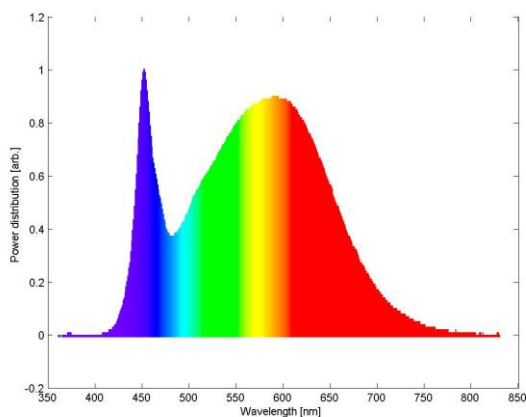
- Test af Parans solkollektor system, SP3
- Optimering af lyskvalitet fra Paranssystem
- Optisk system til blanding af sol og LED lys

Disse beskrives i de følgende afsnit.

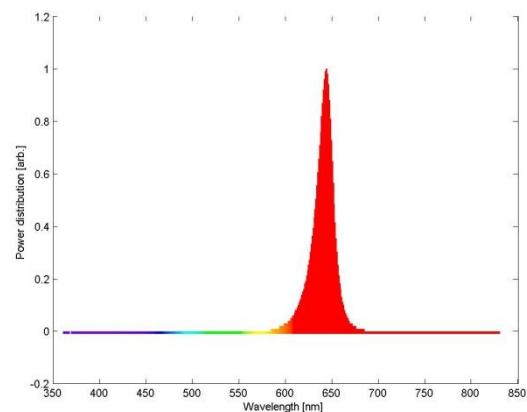
## Test af LED komponenter til Hybridarmatur

De valgte hvide LEDer til Hybrid armaturet er OSRAM LINEARlight FLEX ShortPitch 840. Disse kommercielle LED produkter havde ifølge databladet en tilstrækkelig høj Ra værdi og en farvetemperatur, der matcher fiber og LED lyset bedst (Osram, 2012). De er efterfølgende målt med et kalibreret spektroradiometer og en 1m integrerende kugle, til at have værdierne for farvegengivelse  $R_a = 87$  og farvetemperatur  $CCT = 4140$  Kelvin. Den målte spektralfordeling kan ses i Figur 16.

Da fibrene i solkollektor systemet absorberer i det røde område af det synlige spektrum, ved 625 nm, tilsættes lys fra en rød LED (OSRAM Oslon SSL Ceramic package, 80 °). Disse LEDer er målt på samme måde som de hvide LEDer og den målte spektralfordeling kan ses i Figur 17. Målingerne på disse dioder kan bruges til at beregne farverummet for fiberbelysningen blandet sammen med det røde LED lys. Se afsnittet *Optimering af lyskvalitet fra Paranssystem*.



Figur 16 Spektralfordelingen af Osram hvid LED



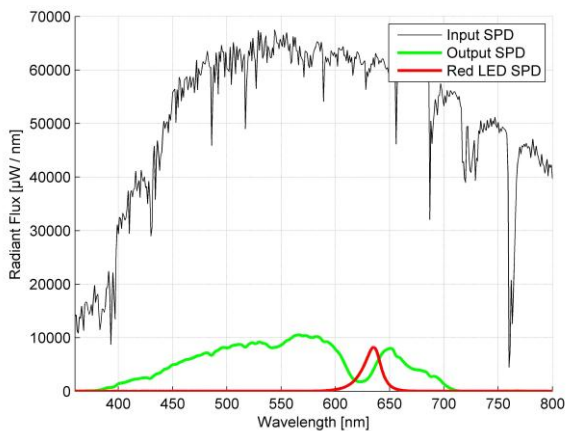
Figur 17 Spektralfordeling af rødt LED lys, (OSRAM Oslon)

## Optimering af lyskvalitet fra Paranssystem

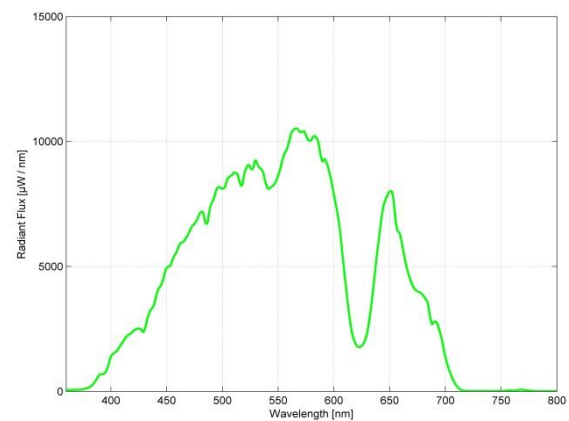
Spektralfordelingen af det lys, der kommer ud af SP3 systemet, kan ses i Figur 18 og Figur 19 (De grønne kurver), det ses at der er et markant hul i den røde del af spektret

ved 625 nm. Dette vil gøre at lyset får et kraftigt grønligt skær, hvilket imødegås ved at indsætte lyset fra den røde diode. Ud fra de målte spektralfordelinger kan farverummet for blandinger af det igennem fibre transmitterede sollys og rødt LED lys beregnes. Dette kan ses i Figur 20, som er et udsnit af et kromaticitetsdiagram, der viser den farve øjet opfatter af en given spektralfordeling af lys. De røde firkanter svarer til hvidt lys, hvor de til højre er varmt hvidt lys og de til venstre er koldt hvidt (blåligt) lys. Det blå kryds svarer til farven af sollyset som rammer linsefladen af systemet. Det er hvidt lys med en farvetemperatur på ca. 5000 K. Det røde punkt svarer til farven af det igennem fibre transmitterede sollys, som ses at ligge over hvidt området, dette er svarende til, at det er meget grønligt. Den sorte linie der starter i det røde kryds, svarer til blandingslinjen for blanding af det igennem fibre transmitterede sollys og lyset fra den røde LED. Det ses ud fra figurens grønne kryds, at det er muligt at sammensætte lyset på en sådan måde, at det bliver hvidt.

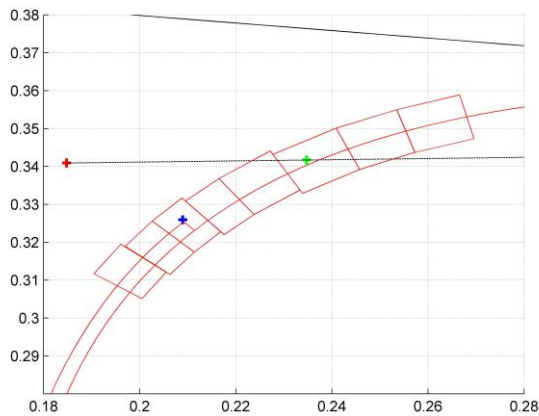
For at sikre en optimal lyskvalitet fra hybridarmaturerne er der blevet lavet simuleringer af lyskvaliteten, som er vist i Figur 21. Farvetemperaturen af denne blanding er 3514K og farvegengivelsen er karakteriseret ved et Ra-indeks på 90.



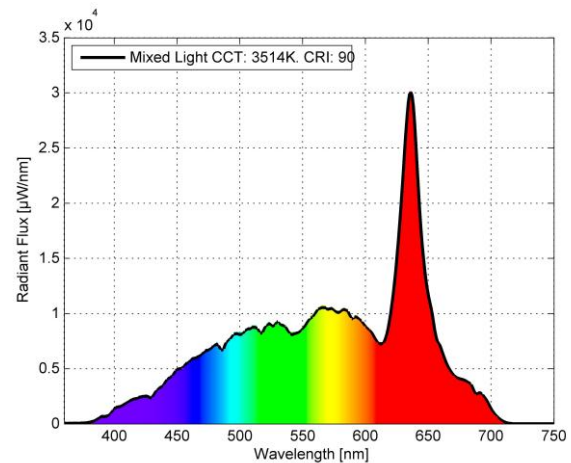
Figur 18 Målt spektralfordelinger af sollys, fiberlyset, samt rødt LED lys.



Figur 19 Målt spektralfordelingen af dagslyset der kommer igennem SP3 systemet.



Figur 20 CIE1960 Kromaticitets diagram ( $u, v$ ) viser blandings mulighederne for outputtet af SP3 systemet samt de røde LED lys.



Figur 21 Spektralfordelingen af dagslys kombineret med rødt LED lys.

Der er fra DTU Fotonik lavet et udkast til et styringsprincip for armaturets forskellige dele. Den ønskede lysmængde  $\Phi_{v,out}$  er anslået til at være angivet ved:

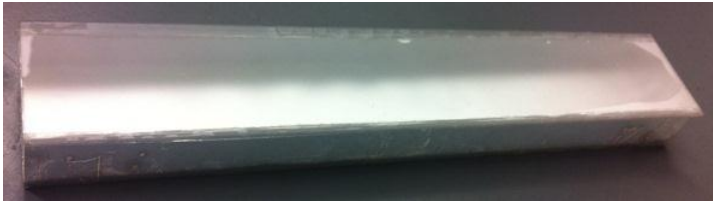
$$\Phi_{v,out} = \Phi_{v,fiber} + k_1 \Phi_{v,white} + (k_2 \Phi_{v,fiber} \Phi_{v,red}),$$

hvor  $\Phi_{v,fiber}$ ,  $\Phi_{v,white}$  og  $\Phi_{v,red}$  er lysstrømmen fra henholdsvis fiberen, de hvide LEDer og den røde LED, og  $k_1$  og  $k_2$  konstanter, der tilpasses systemet for at give den bedste lyskvalitet. Her skal man blot lægge mærke til at LEDerne vil have ulinearitet i afhængigheden af den tilførte strøm, som det kan blive nødvendigt at tage hensyn til ved implementering af en konkret algoritme.

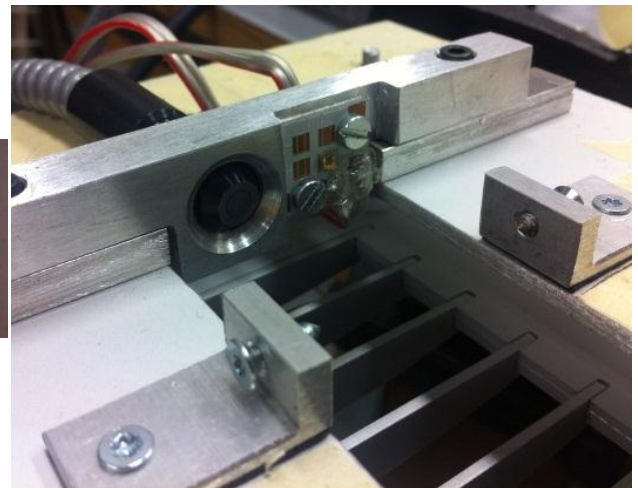
## Optisk system til blanding af sol og LED lys

Der er modelleret, udviklet og fremstillet et optisk system til at blande det igennem fiberbunderne transmitterede sollys og lyset fra en rød LED. Systemet er udviklet i samarbejde mellem Kent Laursen, Kolding Designskole og DTU Fotonik. Systemets forskellige dele kan ses på Figur 22 og Figur 23. Optikken (Figur ) til lysblandingen består af en blok af akryl (PMMA). Tanken er, at det fiberkoblede sollys og lyset fra den røde LED kobles ind i denne klods i den ene endeflade og at det blandede lys kobles ud af den nedadrettede flade. Klodsens er lamineret med en reflekterende folie fra 3M på 4 sider, indgangssiden er ladt fri mens undersiden er forsynet med en microlinse struktur fra 3M, der udkobler lyset og en holografisk diffuser, der giver en retningsbestemt opblanding af lyset.





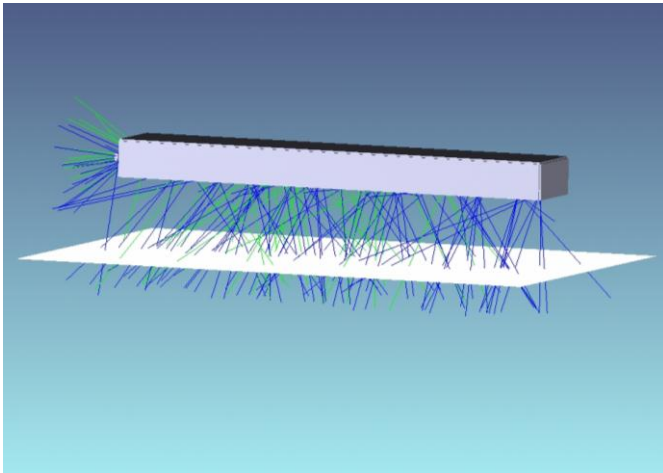
Figur 22 Lysblandnings klods.



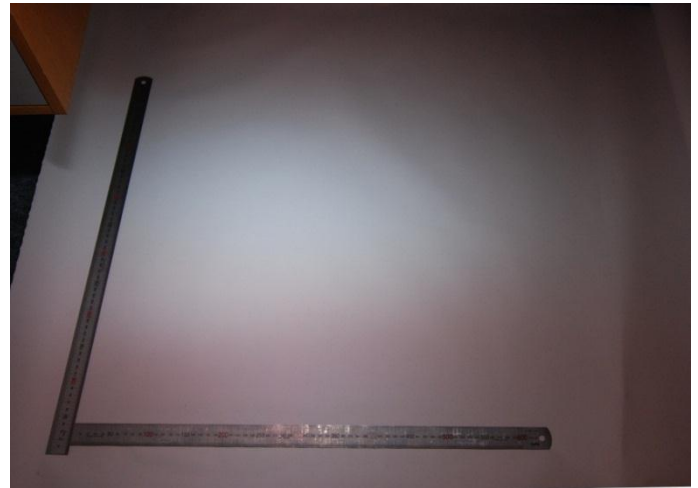
Figur 23 Indkoblings system til lysblandingsklods.

Forud for implementeringen af lysblandingsklodserne er der opbygget en model i raytrace programmet Zemax, som benyttes til optisk design. Herudfra er vurderet og optimeret effektivitet og udstrålingsfordeling af det blandede lys. På Figur er vist hvordan modellen i Zemax ser ud. Effektiviteten af lysblandingsystemet vurderes at kunne være op til 70 %, men det skal verificeres igennem målinger, når armaturet er i drift.

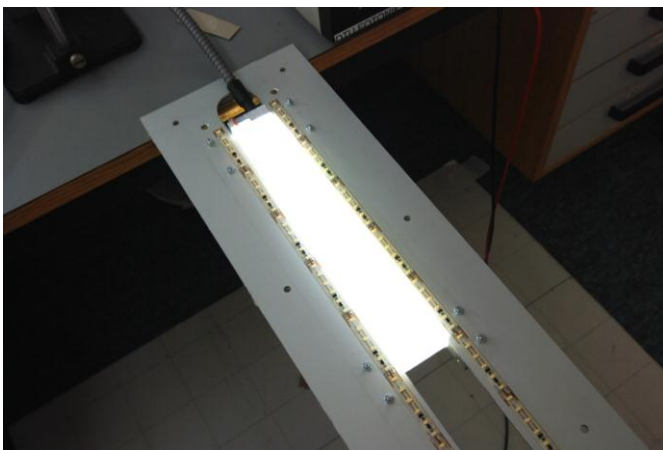
Vi har undersøgt jævnheden af farven fra lysblandingskammeret, lyset er blevet projiceret ud gennem armaturet ned på en hvid flade i en afstand af 50 cm. Som det ses på Figur er der en svag rød farvning af kanterne af det belyste område. Dette skyldes, at afstanden mellem LED og fiber udkoblingen i udkoblingsblokken (se Figur ) er for stor. Denne vil vi forsøge at minimere ved en at ændre monteringsklodsen og bringe lyskilderne tættere sammen. På Figur og Figur er vist fotos af fiberlys koblet ud af lysblandingsklodsen i laboratoriet. De hvide LEDer i hybridarmaturet, der skal benyttes, når der ikke er nok sollys ses hhv. når de er slukket og tændt.



Figur 24 3D tegning af lysberegning på lysblandingsklods, der viser hvordan lysstråler fra fiberbundet (blå) og lysstråler fra LED (grøn) kobles ind i endebladen til venstre og kobles ud nedadrettet fra fra undersiden af klodsen.



Figur 25 Lysfordeling af blandet fiberlys og rødt LED lys 50 cm fra armaturet.



Figur 26 Foto af fiberlys koblet ud af lysblandingsklodsen. Hvide LEDer i hybridarmaturet er ikke tændt.



Figur 27 Foto af fiberlys koblet ud af lysblandingsklodsen, hvor de hvide LEDer i hybridarmaturet er tændt.

## Formidling

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

Den 20. juni 2013 blev de hybride belysningsystemer fremvist for klimaminister Martin Lidegaard. Nedenfor vises en række billeder fra ministerbesøget.



*Figur 28. Paul Michael Petersen fremviser hybrid lysskakt belysningen på Hotherskolen til Klimaminister Martin Lidegaard og borgmester i Stevns kommune Poul Arne Nielsen*



*Figur 29. Det var en meget interesseret Martin Lidegaard - Klima-, energi- og bygningsminister, der den 20. juni 2013 besøgte Hotherskolen og fik fremvist et vellykket demonstrationsprojekt omkring hybridbelysning. Her ser ministeren det nye "Stevns Amaturet", som hænger i klasseværelse nr. 45.*





Figur 30. Carsten Dam-Hansen fra DTU Fotonik forklarer klimaminister Martin Lidegaard hvorledes de hybride fiberbelysningsystemer virker.



Figur 31. Eleverne på Hotherskolen var meget begejstrede for de nye hybride lyssystemer, som er opsat på skolen.



---

Projektets resultater er offentliggjort i følgende nyhedsmedier:

- Netavisen Stevns.nu den 18. juni 2013
- Faxenyt.dk den 20. juni 2013
- SN.dk Sjællandske medier den 21. juni 2013

Projektet er endvidere beskrevet på Stevns kommunes hjemmeside:

<http://www.stevns.dk/Borgere/Klima-amp-Energi/LEDbelysningsprojekt.aspx>

Projektet er endvidere blevet præsenteret 1. nov. 2013 af Paul Michael Petersen på konferencen By Land Lys i Musikteatret i Alberslund.

Danmarks Tekniske Universitet er lavet 2 filmvideoer om projektet.

## Konklusion

I nærværende projekt har vi udviklet og opsat en ny type af energibesparende lyssystemer, som anvender en kombination af dagslys og LED belysning.

De nye belysningssystemer er i projektet blevet implementeret og testet på Hotherskolen i Hårlev. Vi viser i rapporten at hybride belysningssystemer, som benytter en kombination af sollys og LED belysning har et el-besparelses potentiale, som er større end for energisparepærer.

I projektet er der på Hotherskolen på Stevns implementeret følgende tre hybride belysningssystemer:

- Hybrid lysskakt med LED i et gangareal på skolen
- LED med solceller i et klasselokale
- Fiberbelysning, hvor sollys igennem tynde optiske fibre kobles ind i skolens lokaler

Energieffektiviteterne for disse lyssystemer er i projektet blevet sammenlignet med energieffektiviteten for energisparepærer.

I rapporten er der præsenteret en model for de økonomiske langtidsomkostninger for de hybride lyssystemer. Det økonomiske beslutningsgrundlag findes ved at udregne prisen på en mega-lumen-time. I modellen er inkluderet udgifterne til elektricitet, indkøb af lyskilde og vedligeholdelse af lyssystem. Det vises i rapporten at de hybride lyssystemet har et elbesparelsespotentiale som er langt større end for energisparepærer. De hybride lyssystemer er imidlertid i dag dyre i indkøb og derfor skal prisen for disse systemer reduceres i den kommende tid.

Der er på Hotherskolen opsat 2 hybride fiberbelysningssystemer fra Parans. De lystekniske aspekter af Hybridarmaturet med fiberbelysning er undersøgt og udviklet af DTU Fotonik i samarbejde med Kent Laursen, Kolding Designskole, der har designet Hybridarmaturet.

Solkollektor systemet, SP3, fra Parans systemet er blevet testet og karakteriseret. System effektiviteten er vurderet ud fra spektrale målinger af det på linsefladen indfaldende sollys og

---

det igennem fiberbundterne transmitterede sollys. Under direkte sollys er der målt effektiviteter på 25-30 %, hvilket lever op til forventningerne omkring SP3 system.

Lyskvaliteten af det igennem fiberbundterne transmitterede sollys er analyseret ud fra målingerne. Det vises, at lyset er meget grønligt og langt fra hvidt. Der er blevet implementeret en rød LED, der kan kompensere for den del af det røde lys, der går tabt igennem fibre på SP3 systemet.

I projektet er der designet og implementeret et optisk blandingsystem, således at det transmitterede sollys kan blandes med lyset fra en rød LED. Dette giver en langt bedre lyskvalitet, karakteriseret ved en korreleret farvetemperatur på ca. 3500 K og et Ra-indeks på omkring 90.