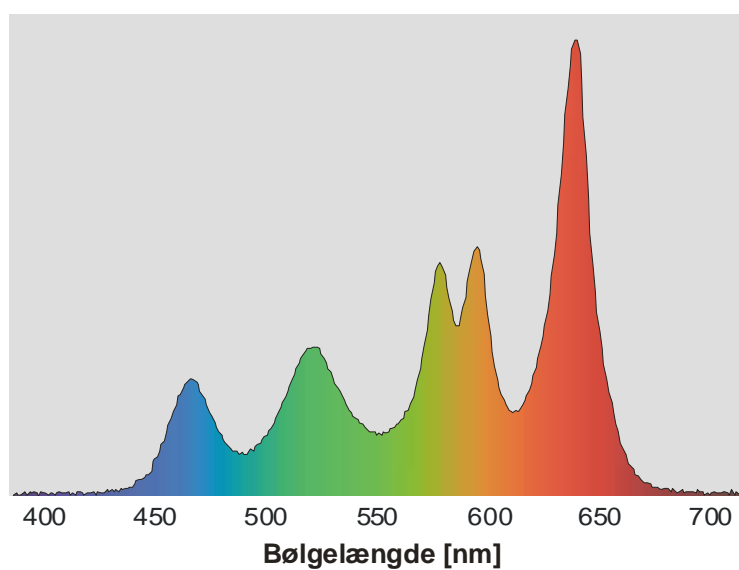


Slutrapport for EDI Energibesparelser med diodelys

PSO nr. 336-54



Indhold

Indledning.....	3
Mål, hovedresultater og konklusion	3
Uddybende beskrivelser	5
Anvendelsesmuligheder for LED belysning	6
Markedsanalyse resultater	6
Styring og design af diodelysepære	9
Temperatur stabiliserende kredsløb.....	9
Energioptimeret strømforsyning.....	10
Anvendelse i 230 V installationer	11
Design af diode lyskilden	11
Optiske undersøgelser og systemer	13
Karakteriseringsmålinger	13
Design af optiske systemer til spredning af lyset	14
Computer modellering af LEDs og LED systemer	16
Spektral design og blanding af farvet lys	17
Lysdioders levetid	19
Mikrolinse arrays.....	20
Lystekniske problemer over tid.....	21
Armaturer til diodelyskilder	23
Resultater ud over projektplan	24
LED laboratorium.....	24
Højeffekts lysdiodepære.....	25
Spektralt design, farvetempertur og Ra-indeks	26
Implementering af LED lys	29
EMC undersøgelse	29
Livscyklus beregninger for diodelyskilder.....	31
Pilotprojekter	32
Produktudvikling og fremtidsperspektiver	32
RGB-diodelysprototype.....	35
Formidling	39

Indledning

Denne rapport udgør slutrapporten for projektet EDI Energibesparelser med diodelys, som er støttet af ELFOR under projekt nr. 336-54. Projektet blev startet 1. februar 2004 og afsluttet 30. juni 2005. Projektet er udført i et samarbejde imellem Norlux, Forskningscenter Risø, RGB Lamps og NESA med Risø som projektleder og administrator.

Mål, hovedresultater og konklusion

Målet med dette projekt har været at udvikle en teknologisk viden og kompetence-platform til udnyttelse af ny lysdiodeteknologi til generelle belysningsformål. Endvidere har projektet sigtet mod at udvikle en 3 W hvid lysdiodepære, som vil kunne erstatte 15-20 W glødepærer og halogenspots og dermed demonstrere et stort energibesparelspotentiale i udnyttelsen af LED teknologien til belysnings-anvendelser.

I projektet er det lykkedes at udvikle nye LED-lyskilder med en høj lyskvalitet som udviser store energibesparelser. Projektets resultater omfatter en række nye typer diodelyskilder samt nye faciliteter, kompetencer og viden funderet hos projektets deltagere.

Sammenfattende er projektets hovedresultater:

- 3 W diodelys prototypepærer støbt i et robust plasthus med nyudviklet effektiv styringselektronik og E14 fatning til direkte anvendelse i 230 V installationer. En af prototyperne har en farvetemperatur på 3900 K og en farvegengivelse givet ved et Ra-indeks på 72. RGB-Lamps estimerer, at denne prototypepære har en lysstyrke på 146 cd. En mere energieffektiv diodelyspære med en estimeret lysstyrke på 256 cd med en farvetemperatur på 2470 K er samtidig udviklet, men den øgede effektivitet er opnået på bekostning af et væsentligt lavere Ra-indeks. Prototypepærerne er forsynet med en nyudviklet holografisk mikrooptisk linse, som giver den ønskede udstrålingsvinkel og blanding af lyset.
- Der er udviklet en laboratorieprototype af en højeffekts LED-lyskilde som har høj lyskvalitet og som kan indstilles til farvetemperaturer på henholdsvis 2920 K svarende til glødepærellys eller 6500 K svarende til en fase af dagslys. Energieffektiviteten for disse er hhv. 27 og 24 lm/W og prototypepæren har en god farvegengivelse givet ved et Ra-indeks på 90. En maksimal effektivitet på 30 lm/W er opnået for en farvetemperatur på 2800 K og et Ra-indeks på 80. Denne energieffektivitet er 2½ - 5 gange bedre end for glødepærer, som har en energieffektivitet på 6 - 12 lm/W.
Med et effektforbrug på 3 W vil denne LED-lyskilde kunne erstatte en 15 W glødepære med en lysstrøm på 90 lm (eks. TERO Lights 15 W Classic). Der findes dog 15 W glødepærer med en højere effektivitet, som har en lysstrøm på 120 lm. Den nye LED-lyskilde er imidlertid ikke begrænset til en wattage på 3 W og kan ved en højere effekt udsende en maksimal lysstrøm på hhv. 820 lm og 507 lm for de to indstillinger af LED-lyskilden svarende til hhv. glødepærellys og en fase af dagslys. En 60 W's glødepære med en god energieffektivitet på 12 lm/W udsender en total lysstrøm på omkring 700 lm (eks. OSRAM Classic A FR60). LED-lyskilden vil derfor kunne erstatte visse typer af glødepærer med en wattage op til 60 W, og kan gøre dette med en energieffektivitet, der er ca. 2½ gange bedre.

LED-lyskilden har en udstrålingsvinkel på omkring 140 grader, hvilket svarer til en rumvinkel som er ca. 4 gange mindre end for en glødepære. Det vil sige, at lysstyrken fra LED lyskilden vil være ca. 4 gange højere end fra en glødepære med samme lysstrøm. Denne større lysstyrke kan give yderligere energibesparelser i en lang række applikationer.

- Nye computermødelles af enkelt LEDs samt LED systemer til simulering af lysudbredelse og farveblanding i LED lyskilder. Mødellesne svarer til den fysiske opbygning af LEDs og LED systemer og giver en god beskrivelse af udstrålingen sammenlignet med tilsvarende målinger. Dette har vist sig at være et vigtigt værktøj i dimensioneringen af LED systemerne og som designværktøj til nye optiske elementer til spredning og blanding af lyset fra de enkelte LEDs. Mødellesne har resulteret i en ny metode til at opnå stor spredningsvinkel og en øget udkoblingseffektivitet fra specifikke lysdioder.
- Nyt design- og beregningsprogram til spektral dimensionering (farvesammensætning) af LED lyskilder baseret på RGB-teknologi. Med denne facilitet er det muligt at designe LED lyskilder med en ønsket farvetemperatur og en optimal farvegengivelse ved blanding af lys fra forskellige LEDs.
- Nye holografiske og mikrooptiske elementer er udviklet til blanding og spredning af lyset fra LED systemerne. En række holografiske diffuser-elementer er fremstillet og karakteriseret. De giver en god spredning af lyset og lave tab ved ikke alt for store spredningsvinkler. Risøs Nanoplottes er benyttet til at fremstille mikrolinse-enheder med tilfældigt fordelte linseelementer. Der er fremstillet mikrolinse-elementer til diodepære prototyperne med en spredningsvinkel på ca. 10 grader og et estimeret tab på 1 % når der ses bort fra det normale refleksionstab. Mikrolinseelementerne, såvel som de holografiske diffusere kan massefremstilles ved replikeringsprocesser såsom sprøjttestøbning.
- Et nyt laboratorium til karakterisering af LEDs og andre lyskilder er opbygget på Risø. Målinger af spektralfordeling og rumlig udstrålingsfordeling kan udføres som funktion af operationsstrøm og temperatur for forskellige typer af LEDs. For farvede LEDs måles peak- og dominerende bølgelængde samt spektralbredde. For hvide lyskilder måles karakteristiske parametre såsom farvekoordinater, farvetemperatur og Ra-indeks.
- Nordlux har udviklet en række design af lamper og armaturer til indendørs- og udendørs-anvendelser i private hjem. Disse er specielt tilpasset de nye diodepære prototypers karakteristika.
- En omfattende markedsanalyse af muligheder og barrierer for anvendelsen af diodelys er blevet gennemført af NESAS. Analysen peger på en række anvendelser af hvidtlysdioder i private hjem. Det er, igennem et beregningseksempel på driftsøkonomien over en årrække, vist at der er god økonomi i udskiftning af gløde- og halogen-pærer med lav wattage på 10-20 W med 3 W diodepærer.
- NESAS har lavet sammenlignende livscyklusberegninger for diodelyskilderne i forhold til glødepærer. Disse beregninger viser, at der er en lang række fordele ved diodelyskilder fremfor glødepærer. Heraf er de vigtigste; en længere

produktlevetid, mindre ressourceforbrug, større energieffektivitet samt mindre miljøbelastning. Desuden har diodelyspærer intet problem med kviksølvindhold i bortskaffelsesfasen som kendes fra lysstofrør og sparepærer.

Det er således i projektet ”Energibesparelser med diodelys” udviklet en lang række nye kompetencer samt nye LED-pærer som har høj lyskvalitet og som udviser store energibesparelser. Teknologien er udviklet så langt, at LED-pærene med et effektforbrug på 3W kan erstatte visse typer af kommercielle glødepærer med et effektforbrug på 15 W. Der er endvidere udviklet en LED-pære med en maksimal lysstrøm på omkring 800 lm som vil kunne erstatte en 60 W’s glødepære med en effektivitet der er 2½ bedre end for en kommerciel glødepære.

Udviklingen indenfor LED-teknologien går så hurtigt at de internationale lysdiode producenter, OSRAM og Lumileds, indenfor projektperioden har annonceret en ny generation af lysdioder med en energieffektivitetsøgning på 45 %. Disse vil være på markedet hhv. ultimo 2005 og medio 2006. Ved benyttelse af denne nye generation af lysdioder kan man opnå en lysstrøms- og effektivitetsforøgelse på 45 % på de LED-pærer som er udviklet i dette projekt.

Uddybende beskrivelser

I den følgende gives en uddybende beskrivelse af de enkelte delopgaver som projektet var delt op i, med en beskrivelse af de opnåede resultater og konklusioner. De enkelte delopgavers beskrivelse i projektplanen er angivet i kursiv.

Den første del omhandler markedsanalysen og anvendelsesmuligheder for LED belysning.

Anden del omhandler elektronisk styring, herunder strømforsyning og temperatur kompensering samt design af diodelyspærene, der er udviklet af RGB Lamps.

Tredie del omhandler de optiske undersøgelser, karakteriseringsmålinger, udvikling af holografiske diffusere, computer modellering, spektralt design og blanding af farvet lys, lysdioders levetid, Mikrolinse arrays , lystekniske problemer over tid samt nye armaturer til diodelyskilder.

Herefter beskrives en række af de resultater som ligger ud over den oprindelige projektplan. I denne fjerde del beskrives det opbyggede LED laboratorium, højeffekts lysdiodepæren og spektral design og en beskrivelse af farvetemperatur og Ra-indeks for hvide lyskilder.

I den sidste del beskrives forhold omkring implementering af LED lys, herunder EMC undersøgelse, livscyklusberegninger, pilotprojekter og produktudvikling og fremtidsperspektiver. Herunder gives en beskrivelse af RGB-diodelysprototyperne og afslutningsvis beskrives hvorledes projektet resultater og perspektiver er blevet formidlet til interessenter udenfor projektet.

Anvendelsesmuligheder for LED belysning

Markedsanalyse resultater

- *Muligheder og barrierer for anvendelse af LED belysning - i dag og i fremtiden (afsluttet maj 2004)*

LED teknologien giver store muligheder for at tænke belysning på nye måder. Udviklingen er i gang og det er kun fantasien, der sætter grænserne for anvendelsesmulighederne på længere sigt.

Den væsentligste begrænsning for LED lys har hidtil været den relativt lave luminans, temperaturfølsomheden og driften af dioderne over tid. Temperaturfølsomheden gør, at LED lys i dag er udelukket fra at blive anvendt i omgivelser med høje omgivelsestemperaturer.

Hvidt LED lys kan fås enten med hvide lysdioder, eller at blande lyset fra farvede lysdioder til hvidt lys. Men hvorfor blande lyset fra farvede dioder, når der findes hvide lysdioder?

Årsagen er, at de hvide lysdioder, der findes på markedet i dag, ikke er ikke gode nok:

- Hvide dioder er ikke så energieffektive som de bedste farvede
- Hvide dioders levetid er ikke på højde med de farvedes
- Det hvide lys ændrer tone efter kort tids drift - det gør farvede ikke i samme omfang.
- Lysets toning kan ikke reguleres med hvide lysdioder
- Lyset fra hvide dioder har i dag en dårligere farvegengivelse end glødelys

De fleste anser, at lys fra almindelige glødepærer er et godt hvidt lys med en god farvegengivelse. Hvide lysdioder kan endnu ikke leve op til markedets krav om Ra-værdi tæt på 100.

Ved at blande lyset fra farvede lysdioder er det muligt at frembringe hvidt lys med en højere Ra-værdi, d.v.s. sikre god farvegengivelsen af det hvide lys, ligesom man kan opnå en ønsket farvetemperatur (toning) af det hvide lys ved at styre lyset fra de enkelte lysdioder.

Lysdioders lysudsendelse pr. Watt forventes at vokse hurtigt de kommende år. Hvis udviklingen fortsætter med samme hast, som den har gjort hidtil, vil lysdioder i løbet af 5-10 år være så billige og energieffektive, at teknologien vil udfordre alle andre former for belysning. Både i form af erstatningslyskilder og nye LED belysningsprodukter.

Fordelene ved LED belysning gør det oplagt at anvende LED lys til følgende:

Generelt - både hvidt og farvet LED lys

- Museer og andre steder hvor UV-stråling fra traditionelle lyskilder er et særligt problem (ingen UV stråling fra LED lys)
- Kolde omgivelser – udendørs, køle/frost rum, køleskabe og lign. (i kulde giver LED meget lys og har lang levetid)
- Transportmidler på land, til vands og i luften (tåler rystelser)
- Nødbelysning (lang levetid)
- Erstatning for fiberlys
- Hærdning af lim mv. i eksempelvis industrien?
- Hærdning af tandfyldninger (er implementeret)

Farvet LED lys

- Trafiksignaler og trafikskilte (i højere grad end i dag)
- Butiksskilte og øvrige steder hvor farverne og det rettede lys kan udnyttes
- Dekorationslys i butikker
- Farvet lys på restauranter og diskoteker
- Farvet lys i forlystelsesparker og omrejsende tivoli og cirkus

- Scenelys
- Ledelys på børneværelser, i institutioner og lign.

Hvidt LED lys

- Belysning med lav effekt - f.eks. køkken/hylde belysning
- Generel erstatning for halogen- og glødepærer med lav effekt
- Afmærkning og ledelys - eksempelvis på plejehjem
- Svært tilgængelige armaturer, hvor det er dyrt at skifte lyskilder (lang levetid)
- Sengelamper (rettet lys i små mængder)
- Skrivebordslamper (rettet lys i små mængder)
- Udendørs belysning (kølige omgivelser - lave krav til farvegengivelse og lysfarve)
- OVERALT i private hjem, kontorer, industri, institutioner osv., når lysudbytte, farvegengivelse, lysfarve, og pris matcher eksisterende lyskilder og teknologi.

Er økonomien en barriere ved udskiftning af gløde- og halogenlys med LED lyskilder?

LED lyskilder opfattes ofte som dyre i sammenligning med almindelige lyskilder. Det er en barriere for udbredelsen. Men er driftsøkonomien en reel barriere for udbredelse af LED lys?

Et eksempel på beregning af økonomien ved udskiftning af 15 W glødepærer med 3 W LED lyskilder er givet i regnearket nederst herunder (for en virksomhed med netto elpris på 0,65 kr./kWh - eksklusiv energiafgift og moms)

Den simple tilbagebetalingstid er 4 år med forudsætningerne i eksemplet. Bemærk, at nettooverskuddet på investeringen efter 20 år er over 60.000 kr. Hvis driftstiden er 4.000 timer (som udendørs lys) er tilbagebetalingstiden kun 2,5 år.

For en privat husstand med en elpris på ca. 1,50 kr./kWh, driftstid på 4.000 timer (udendørs lys om natten) er tilbagebetalingstiden kun 1,7 år, selvom der ikke regnes med udgift til udskiftning af lyskilder.

Generelt gælder, at tilbagebetalingstiden forkortes, hvis:

- Driftstiden forøges
- Elprisen stiger (det må forventes)
- Der er lønudgifter forbundet med udskiftning af glødelyskilder
- Prisen på LED lyskilderne falder
- Forskellen i wattage mellem glødelyskilde og LED lyskilde forøges

Teknologien giver endnu ikke mulighed for at udskifte kraftige lyskilder med LED lyskilder. Det gælder altså om især at sælge LED lyskilder til kunder, der har lyskilder med lav wattage (maks. 15-20 W), hvor driftstiden er lang, og/eller der er store udgifter til udskiftning af lyskilder. Når det gælder hvidt LED lys bør der fokuseres på at udvikle og sælge LED lyskilder, der dels kan erstatte 10,15 og 20 W gløde- og halogenpærer i private hjem, der betaler den højeste elpris.

Baggrunden er, som tidligere anført, at i private hjem er:

- 81% af halogenpærerne er på 20 W eller mindre
- 3% af glødepærerne er på 15 W
- 29% af glødepærerne er 25 W
- 65% af glødepærerne er på 40 W eller mere

Derudover bør der fokuseres på at udvikle lyskilder til udendørs brug, da de har lang levetid, mindre krav til farvegengivelse, samt kølige omgivelser. Alt sammen forhold, der giver god økonomi og lysudbytte og derfor taler for at skifte til LED belysning.

LED lys beregning	Eksistende belysningsanlæg	LED belysning
Antal lyskilder	100	100
Watt/lyskilde inkl. forkobling	15	3
Wattage i alt i kW	1,5	0,3
Årlig driftstid i timer	2.500	2.500
Samlet årligt elforbrug i kWh	3.750	750
Reel elpris - kr./kWh	0,65	0,65
Årlig udgift i kr. til el	2.438	488
Levetid af lyskilder i timer	2.000	50.000
Pris pr. lyskilde i kr.	15	150
Antal lyskilder pr. år	125	5
Udgift i kr. til lyskilder	1.875	750
Tidsforbrug i minutter til skift af een lyskilde	2	2
Udgift pr. minut i kr.	3	3
Udgift i kr. til at skifte lyskilder	750	30
Samlet årlig udgift - el, lyskilder, tid	5.063	1.268
Udgift til etablering af LED lys		15.000
Årlig driftsbesparelse i kr. med LED lys		3.795
Simple tilbagebetalingstid i år		4,0
Driftsbesparelse efter 20 år		75.900
Overskud på investeringen efter 20 år		60.900
Lyskildernes brændtid i timer på 20 år		50.000

Styring og design af diodelysepære

Temperatur stabiliserende kredsløb

- Temperaturstabiliserede kredsløb til lyskilden

Temperaturkompenseringen til EDI projektet er klarlagt i kraft af udmåling af temperatur karakteristisk for de enkelte dioder kombineret med de af fabrikanterne opgivne data for de enkelte dioder. Dertil kommer mere generelt materiale indhentet fra forskellige universiteter omkring temperatur karakteristikker for de forskellige halvleder materialer, der anvendes til de forskellige farver dioder.

Temperaturkompenseringen er afhængig af det endelige valg af dioder, men analyse processen har vist at det kun er nødvendigt at kompensere for dioder med farver fra ca. 550nm og opad.

Temperaturkoefficienterne er stort set ens indenfor få procents afvigelse i området mellem 0 og 40 gr. Celcius for de grønne og blå dioder.

Diodepæren må ved stuetemperatur, defineret som 25 gr. Celcius højst have en indre temperatur på omkring 40-45 gr. For ikke at reducere væsentligt i levetiden for pæren. Hvilket sætter den øvre grænse for kompenseringen. Den nedre er defineret ud fra en antagelse om at den indre temperatur ved en omgivelses temperatur på ca. -15 gr. Celsius, vil være omkring 0 gr.

Uden kompensering vil farvetemperatur og Ra værdien for den samlede pære ændres væsentligt, idet der allerede ved 40gr-45gr.C er et tab i de gule, orange og røde farver på omkring 15-20% mere end for de grønne og blå. Der er også forskel mellem farverne indbyrdes, men den væsentligste og afgørende forskel er mellem de 2 halvleder typer, der anvendes.

Generelt falder den udsendte lysstrøm med ca. 10% ved 40gr. I forhold til stuetemperatur, medens den for den øvre del af spektret falder med ca. 30%.

Det giver derfor mening at definere en ideel omgivelsestemperatur og tilrette designet efter denne, for at mindske det samlede energitab.

Temperaturkompenseringen kan foretages ved at tilrette kurverne for alle dioder, således at de i praksis bliver ens. Dette gøres ved indførelse af en NTC kobling hen over de enkelte diodestreng, således at en del af strømmen ledes gennem denne kobling, og dermed dæmper lyset i den pågældende streng.

Da det kun er fra 550nm og opefter, at farverne har en dæmpning der afviger fra de øvrige dioder, skal de blå og grønne dioder altså dæmpes således at de følger dioderne med det største tab. Alternativt, skal strømmen i dioderne øges, hvilket også kan gøres med en NTC kobling. Dette vil imidlertid medføre en øget varmeafgivelse i de pågældende dioder og dermed et krav om yderligere kompensering og ved overskridelse af 40 gr. grænsen en reduktion i levetiden.

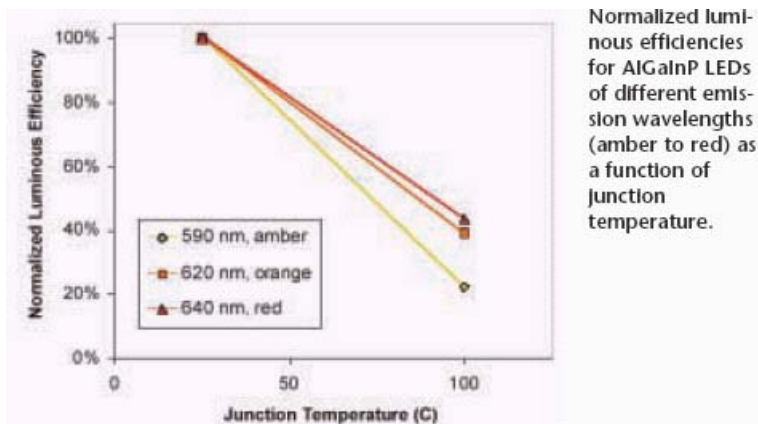
Det optimale design bør derfor udføres ud fra en given typisk arbejdstemperatur, således at der i normal tilstanden skal kompenseres mindst muligt. Og dermed tabes mindst mulig energi.

NTC kompensering giver energitab i pæren. Endeligt vil det som konsekvens af temperatur kompenseringens problematikken være hensigtsmæssigt med et valg af dioder i midten af spektret med en temperatur koefficient så tæt på de øvrige dioder som muligt. Med andre ord, er der 2 mulige typer, bør den type vælges, der afviger temperaturmæssigt mindst fra de øvrige.

Metoden til kompenseringen er som det fremgår, klarlagt og kan umiddelbart implementeres i det endelige design.

Metoden er beskrevet nærmere i RGBs patent.

Nedenstående viser forskellene for typiske dioder i området over 550nm.



Energioptimeret strømforstyrning

- Udvikling af en energioptimeret strømforstyrning, der kan indbygges i diode lyskilden til en samlet enhed

Strømforstyrningen til diodepæren afhænger af det endelige antal af dioder i pæren, typen af disse, samt den ønskede strøm gennem disse dioder.

Strømforstyrningen er udført som en reaktansdel, der er tabsfri, og hvis vigtigste komponent er en overførings kapacitet af en størrelse, som afhænger af den effekt der ønskes trukket af opstillingen.

Reaktansdeleren følger spændingen på netforstyrningen og den afgivne effekt til dioderne vil således svinge med udsvingene i netspændingen, - hvilket også andre lyskilder gør.

Alternativet er at fastlåse pæren til den i forhold til reglerne for udsving i netspænding, laveste værdi, og dernæst spændingsregulere den resterende energi væk. Dvs. omsætte den til varme tab.

Dette giver et uforholdsmæssigt stort tab, hvorfor det er valgt at lade pæren følge forstyrningsspændingen med udgangspunkt i de nominelle 230V AC

Indenfor de fysiske rammer for spændingsforstyrningen, der igen er dikteret af at diodepæren skal kunne erstatte og isættes i stedet for traditionelle pærer, er det overføringskapaciteten, der volder de største problemer. Denne skal være sikkerhedsgodkendt og kriteriet for denne godkendelse er at kondensatoren skal være en selvhelende dobbeltlags type. Disse kondensatorer har den ulempe, at de rent fysisk er relativt store.

Ved en samlet udgangseffekt omkring de 3W, vil det være nødvendigt med en kondensator i størrelsesordenen 660nF (standardværdi=680nF), som dog kan laves vha. 2 stk. på 330nF. Det er lige akkurat muligt, med de kendte standard kondensator teknologier, at indbygge en sådan kapacitet indenfor de til rådighed værende fysiske rammer for projektet.

Forsøgene med spændingsforstyrningen har vist, at den er i stand til at levere 3W effekt, men for at de øvrige projekt kriterier skal være opfyldt, er det vigtigt, at de leverede 3W kan omsættes til lys uden yderligere væsentlige tab, da det pt. ikke er muligt at øge kapaciteten yderligere uden at sprænge de fysiske rammer for projektet. Herunder er det specielt vigtigt at vælge det rette arbejds punkt i forhold til temperaturkompenseringen, således at der i den gængse anvendelse tabes mindst muligt. Effekttab i strømforstyrningen medfører temperaturstigning i hele pæren, hvorfor det er essentielt at minimere dette tab mest muligt. Dette er lykkedes til fulde og det samlede tab udgør for strømforstyrningen kun ca. 30 mW.

Det udviklede designværktøj giver nøjagtige værdier for de enkelte komponenter i strømforsyningen, afhængigt af den valgte diodesammensætning og under respekt for både temperatur, strøm og levetids hensyn.

Opbygningen af strømforsyningen følger principperne i RGBs patent.

Anvendelse i 230 V installationer

- udvikling af elektronik til lyskilden, så den kan anvendes i 230 V installationer

Udviklingen af interfacet over mod en 230V installation, består I, at overholde de sikkerhedsmæssige forskrifter givet ved lavspændingsdirektivet, samt overveje hvilke yderligere sikkerhedskrav der vil kunne gøre sig gældende ved indførelse af en ny type lyskilde.

Da der er tale om stærkstrøm, og da der er tale om et produkt, der vil blive brugt af læg mand, er det naturligvis vigtigt, at designet respekterer alle sikkerhedsmæssige krav og regler, samt at der i forbindelse med indførelsen af en ny belysnings teknologi, må blive taget højde for de sikkerhedsmæssige spørgsmål, som endnu ikke fremgår af direktiverne. Direktiverne er skrevet uden kendskab til denne type lyskilde, og det bør derfor ikke tages for givet, at alle sikkerhedsmæssige aspekter er indeholdt i direktivet.

I henhold til lavspændingsdirektivet, er konstruktionen foretaget med de nødvendige sikkerheds mærkede komponenter, samt ved overholdelse af de specificerede krybeafstande. Desuden er alle komponenter i tilknytning til stærkstrømsdelen valgt med en mærkespænding, der er høj nok til at klare worst case situationer, som følge af defekter i andre dele af elektronikken. Et yderligere kriterium har været valg og design af elektronikken, så dens levetid som minimum kan klare den samme levetid som dioderne.

Konstruktionen er testet i forhold til direktivets krav på TDC's tele laboratorium og har passeret alle tests.

Vi har endvidere i RGB kørt test forløb i stærkt forhøjede temperaturer, uden at dette har givet anledning til fejl.

En gennemgang af direktivet samt ved en sikkerhedsmæssig generel vurdering af produktet, har vi fundet at der i tillæg til direktivet bør stilles krav omkring brandsikkerheden for produktet. Således er konstruktionen opbygget og indkapslet i brandhæmmende UL0 godkendte materialer. Kendte lyskilder har primært været glas el. keramik indkapslede, og derfor har det ikke tidligere været noget reelt problem.

Vi mener på baggrund af vores analyse, at diodeprodukter til brug i både privat og industrielt regi, bør være udført i, eller som minimum være indkapslet i brandhæmmende UL0 godkendt materiale.

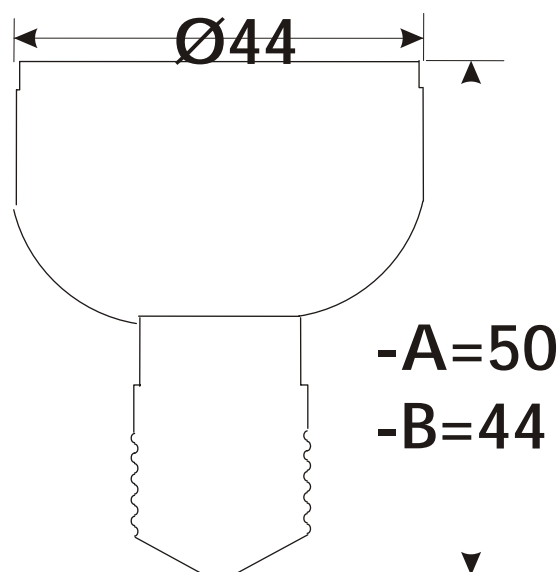
Design af diode lyskilden

- Design af diode lyskilden, så den passer i eksisterende armaturer og lamper og kan anvendes med typiske sokkel type.

Udgangspunktet for diodelyskilden var, at den skulle erstatte eksisterende spotkilder, hvoraf en typisk 44mm (diameter) halogen spot blev valgt som reference mht. mål. Med dette mål, ville alm. gløde spot kilder som f.eks en concentra pære også være dækket ind.

Med en ydre diameter på 44 mm viste det sig, at der kunne placeres 37 standard 5mm dioder på dette areal, og en kalkulation på datablads værdier for en sandsynlig sammensætning af dioder, sandsynliggjorde, at det ville være muligt med disse 37 dioder at opnå den ønskede lysmængde under anvendelse af de ønskede maksimalt 3 W effekt.

RGB har fremstillet en plastskal til pæren, som øverst er forsynet med en kant, der muliggør fastgørelse af RISØ linsen vha. en fastgørelses ring. Denne ring har vi i projektets sidste uge fået udført i silikone gummi, der virker perfekt til formålet.



For at imødekomme kravet om tilpasning til forskellige sokkeltyper, er den del hvorpå soklen fastgøres, udformet som et indsatsværktøj i selve plaststøbe formen, således at der kan anvendes forskellige diametre afhængigt af den ønskede sokkeltype. Den nuværende form er forsynet med E14, men kan umiddelbart forsynes med stifter, GU og E27 samt bajonet sokkel.

Selve længden af stykket mellem pære og sokkel (halsen) kan yderligere varieres efter formål, således at hovedparten af de eksisterende spot armaturer vil kunne anvende pæren. Det har vist sig at mange armaturer – specielt de armaturer der er beregnet for concentra pærer – kræver en noget længere hals, for at kunne skrue soklen helt i bund i fatningen.

RGB har afprøvet pæren i en lang række armaturer, og finder at målet er nået gennem det valgte design.

Optiske undersøgelser og systemer

Karakteriseringsmålinger

- undersøgelse af og tilvejebringelse af fuld forståelse af udstrålingsdiagrammet for forskellige lysdioder på markedet med udgangspunkt i de indgående farvede lysdioder i hvide diode lyskilder

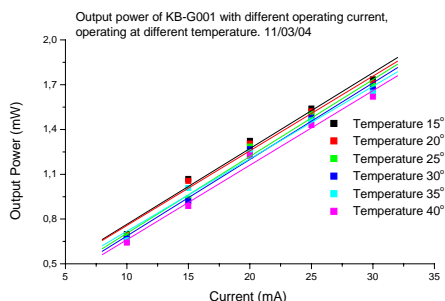
Det har været afgørende for udviklingen af diodelyspærer at have et indgående kendskab til udstrålingen fra de benyttede lysdioder. Det gælder såvel den rumlige udstråling og den spektrale fordeling af lyset, og deres afhængighed af lysdiodens operationsstrøm og temperatur. Dette ligger som oftest ud over de i databladene opgivne oplysninger og det har derfor været nødvendigt at lave karakteriseringsmålinger for de benyttede lysdioder.

Karakteriseringsmålingerne er udført i opbyggede LED laboratorium på Risø som er beskrevet i afsnittet **LED laboratorium**.

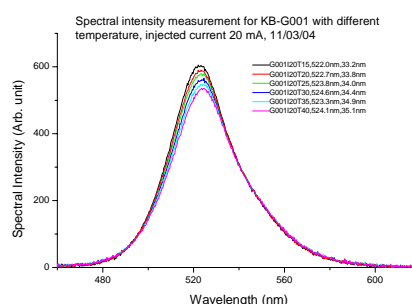
Der er udført målinger på lysdioder fra Kingbright og Lumileds. Lysdioderne fra Kingbright er støbt i et 5 mm hus med en linse der giver en udstrålings vinkel på omkring 30 grader. Der er målt på 5 eksemplarer af farverne: blå, grøn, gul og rød.

For hver lysdiode er målt spektralfordeling og udstrålet effekt for en standard indstilling af strøm og temperatur på 20 mA og 25°C. Med en fast indstilling af den ene parameter er udført målinger forskellige indstillinger af den anden.

Målingerne viser at som forventet at den udstrålede effekt øges med strømmen og mindses ved øget temperatur. Målingerne omsættes til en kvantitativ afhængighed for de enkelte farvede lysdioder. Denne information er afgørende for temperaturkompenseringen i diodepæren, se afsnittet **Temperatur stabiliserende kredsløb**. Ligeledes ses det af målingerne at peakbølgelængden og bredden af spektralfordelingerne er afhængige af temperatur og strøm. Vigtigst her er peakbølgelængden som flytter mod længere bølgelængder for øget temperatur.

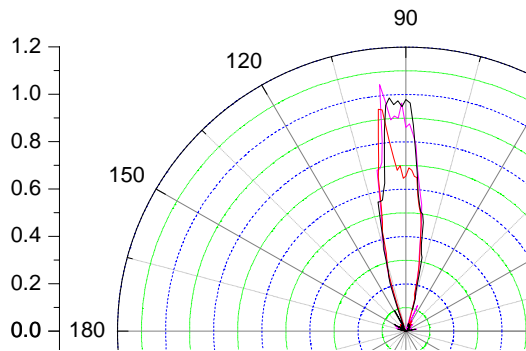


Grafen viser den udstrålede effekt som funktion af strømmen igennem dioden for seks forskellige temperaturer.

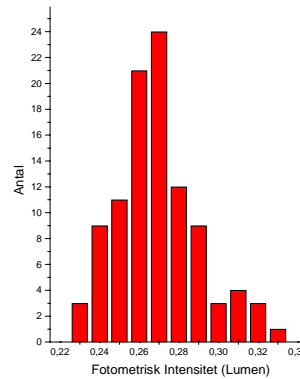


Grafen viser en målinger af spektralfordelingen af en grøn lysdiode ved en strøm på 20 mA og for forskellige temperaturer. Det ses at spektrets peak flytter sig mod længere bølgelængder for øget temperatur.

En mere uddybende beskrivelse af karakteriseringsmålingerne på 5 mm lysdioder og resultaterne heraf er givet i Risø-I-2271. Målinger af den rumlige udstråling viser en halvværdi udstrålings vinkel på omkring 20 grader. Denne er noget mindre end de 30 grader som opgives i databladet for disse lysdioder. Målingerne har vist at der er stor på udstrålingen fra de enkelte individer af dioder. For at få en god vurdering af disse forhold for udsendt effekt er målt på 100 røde og 100 blå dioder. For blå lysdioder er målt en middel lysstrøm på 0.27 lm med en standardafvigelse på 0.02 lm.



Grafen viser målt den målte effekt som funktion af udstrålingsvinklen. De tre kurver er målt for forskellige individer af røde lysdioder.



Fordeling af udstrålet effekt for 100 stk blå lysdioder fra Kingbright.

Disse målinger er vigtige for dimensioneringen af diodelysepærerne, da det er økonomisk belastende at skulle udvælge lysdioder til anvendelsen.

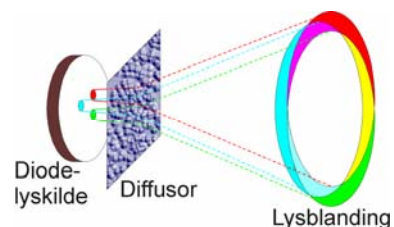
Der er foretaget tilsvarende karakteriseringsmålinger målinger for høj effekts lysdioder fra Lumileds. Her er lavet karakteriserings målinger for 7 forskellige enkelt farvede lysdioder og to typer af hvide lysdioder.

For at opnå en maksimal energieffektivitet for den udviklede diodelysepære er foretaget målinger af samhørende værdier for udstrålet effekt og forbrugt energi, ved at måle spændingen over dioden. Ud fra disse målinger er udvalgt lysdioder med maksimal energieffektivitet til at indgå i diodelysepæren beskrevet i afsnittet **Højeffekts lysdiodepære**.

Design af optiske systemer til spredning af lyset

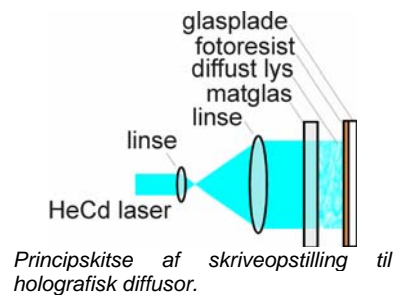
Udvikling og design af optiske systemer, der spreder lyset fra dioder i en større vinkel

En optisk diffusor består af et plant element i hvilket der er genereret små usystematiske strukturer (ujævnheder) i overfladen. Størrelsen af strukturerne er sammenlignelig med lysets bølgelængde, dvs. omkring $0,5 \mu\text{m}$, hvilket gør at lyset diffrakterer eller spredes ud i en større vinkel. Spredningsvinklen er omvendt proportional med afstanden mellem ujævnhederne, hvorimod dybden af strukturerne bestemmer hvor stor en del af lyset, som spredes.

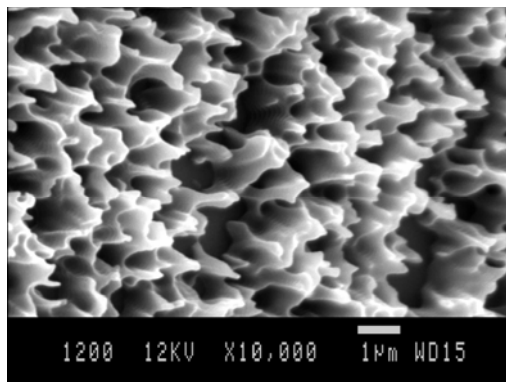


Optisk diffusor anvendt som spredeelement til blanding af de enkelte farvekomponenter i diodelyskilden.

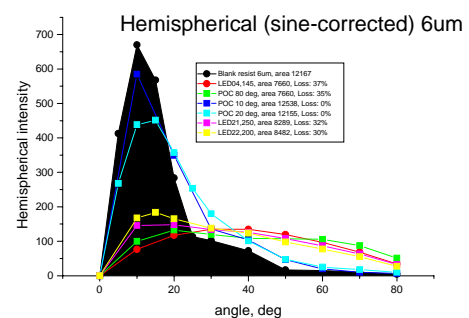
Diffusoren kan genereres ved at sand- eller glasblæse en glasoverflade, så den bliver diffus. Problemet med denne teknik er dog dels, at ruheden ofte bliver for ukontrolleret, hvilket medfører store lystem, og dels at metoden ikke er egnet til massefremstilling. En mere velegnet fremgangsmåde er derfor at benytte en holografisk teknik kombineret med replikering i plast. Her belyser man en fotoresist plade med diffust laserlys, hvorved der indgraveres en tilfældig overfladestruktur i resisten, som giver en spredende virkning. Strukturen kan umiddelbart kopieres over i en nikkelpåde ved hjælp af galvanoteknik, hvorefter denne nikkelpåde kan indsættes i et plaststøbeværktøj og dermed masseproduceres.



Der er i dette projekt fremstillet en række holografiske diffusorer med forskellige strukturætheder og forskellige strukturtyper. Disse har alle givet en tilfredsstillende spredning af lyset, men imidlertid har der vist at være utilfredsstillende store tab forbundet med teknikken, idet typisk op til 30% af lyset bliver spredt ud i retninger, hvor det ikke gør gavn. I erkendelse af dette, blev det derfor besluttet at afprøve en alternativ mulighed, nemlig mikrolinsearrays. Denne teknik benytter refraction i stedet for diffraktion til at sprede lyset, hvilket giver mulighed for at reducere spredningstabene. Mikrolinseaktiviteten er beskrevet under afsnittet **Mikrolinse arrays**.



Scanning-elektron-mikroskop (SEM) billede af holografisk diffusor-overflade.



Lysfordeling målt som funktion af vinkel for kommercielle diffusorer (POC 10 deg, POC 20 deg, POC 80 deg), sammenlignet med holografiske diffusorer (LED04, LED21, LED22).

En anden mulighed for at sprede lyset fra lysdioden er at ændre udformningen af linsen som er støbt omkring lysdiodechippet. Ved hjælp af numerisk raytracing, beskrevet i afsnittet **Computer modellering af LEDs og LED systemer**, er udviklet en ny LED design der forøger udstrålingsvinklen fra 24° til 73° og giver en mere jævn udstråling. Dette er implementeret i en af diodelyspærerne, se afsnittet **Spektral design og blanding af farvet lys**. Dette design har den yderligere fordel at lysstrømmen fra dioden øges med 16 %. Forsøg med andre linseformer har vist at det er muligt at øge udstrålingsvinklen yderligere. En mere detaljeret beskrivelse af optiske systemer til spredning af lyset fra lysdioder er givet i Risø-I-2265(EN).

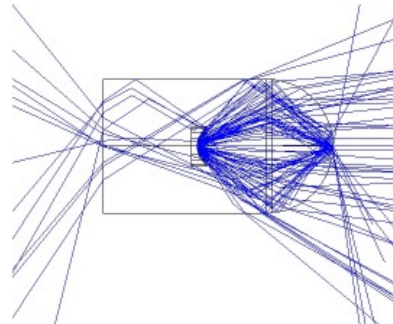
Computer modellering af LEDs og LED systemer

Gennemførelse af numeriske analyser - ray tracing - d.v.s. teoretiske analyser, hvor lysstrålerne i optiske systemer følges.

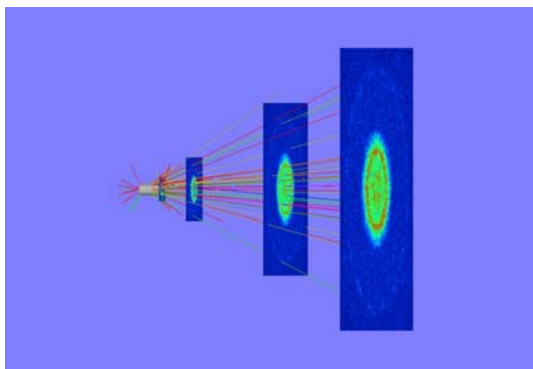
I projektet er der udviklet tre LED lyskilde modeller, som benyttes til optimering af prototyperne på de hvide LED pærer. Modellerne er baseret på en række numeriske analyser kaldet "ray tracing" – d.v.s. teoretiske analyser, hvor lysstrålerne i optiske systemer følges. De tre lyskilde modeller er:

1. En 3-dimensionel numerisk model af en enkelt farvet LED
2. En 3-dimensionel numerisk model af et nyt LED design med forøget udstrålingsvinkel
3. En 3-dimensionel model af en hvid LED pære baseret på RGB teknologien

Derudover er der udviklet et program, der konverterer de simulerede (beregnete) lysudstrålingsmønstre til farve (RGB) koordinater, således at det totale lysudstrålings-mønster fra den hvide LED pære model kan ses i en RGB præsentation. Med andre ord, et program der afbilder, hvorledes de forskellige LED farver blandes til hvid i modelpærens lysudstrålingsmønstre.



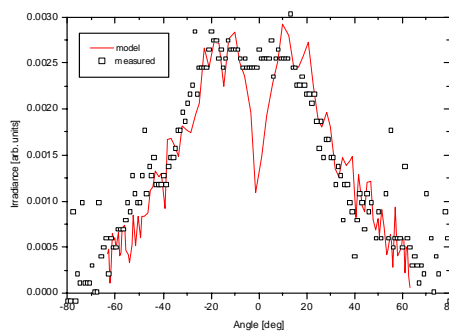
Ray tracing: Numerisk simulering d.v.s. beregning af lysudstrålingsmønstre. Lysstrålernes udbredelse følges fra LED chip gennem forskellige optiske systemer (LED hætte, linser, diffraktiv optik...) idet der tages hensyn til lysstrålernes brydning, refleksion og absorption i de forskellige elementer.



Skyggemodel af LED lyskilde: Der ses et udvalg af lysstråler udsendt fra en LED lyskilde (grå) samt tilhørende lysudstrålingsmønstre på ialt fire detektorplaner. Rød svarer til høj lysintensitet, grøn til middel og blå til svag lysintensitet. Selve lysstrålernes farver er vilkårligt valgt. Detektor-positionerne er hhv. 9, 23, 62 og 100 mm efter LED'ens bagkant.

Modellerne kort fortalt

På basis af model 1, er der udviklet et nyt LED design (model 2), der forøger udstrålingsvinklen fra 24° til 73°. Dette design er dernæst benyttet til at opbygge en hvid LED pære model (model 3), der blander lyset fra forskellige farvede dioder. I Risø-I-2289 er vist et eksempel på lysudstrålingsmønsteret samt farveblandingen fra en specifik repræsentation af denne pære model, hvor 37 LED'er bestående af 5 forskellige farver kombineres, så de giver et optimeret hvidt lys spektrum med en RA-værdi på 91 og en korreleret farvetemperatur på 2751 K (svarende til en glødepære).



Vinkelfordeling af lysudstråling: Sammenligning mellem beregnet (rød) og målt (sort) vinkelfordeling for lysudstrålingen i et enkelt halvplan fra en LED af det nye design

En detaljeret beskrivelse af modellerne samt modelberegninger af lysudstrålingsmønstre og vinkelfordelinger fra LED lyskilderne er givet i Risø-I-2289. Denne rapport indeholder desuden en beskrivelse af funktionen i konverteringsprogrammet samt et simuleret lysudstrålingsmønster fra den hvide LED pære model i RGB præsentation.

For at opbygge så realistiske modeller som muligt, er alle modeller primært baseret på enten målte objektparametre eller databladsværdier. Desuden er de simulerede lysudstrålingsmønstre samt lysstråle vinkelfordelinger for model 1 og 2 løbende blevet sammenlignet med eksperimentelt udmålte værdier. Det viser sig, at der er god overensstemmelse mellem model beregningerne og faktiske målinger, hvilket har betydet, at de udviklede modeller har været et nyttigt værktøj i optimeringen af prototyperne på de hvide LED pærer.

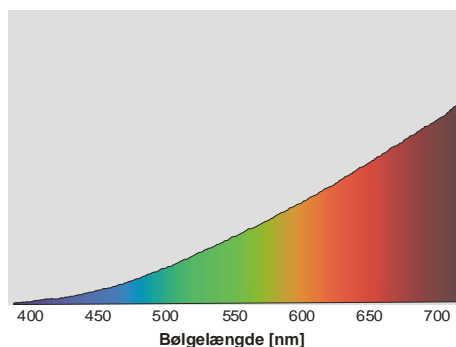
Spektral design og blanding af farvet lys

Design og fremstilling af et linsesystem, der blander lys fra farvede dioder til hvidt lys med et liniespektrum, der minder om lys fra traditionelle lyskilder såsom glødelys, halogenlys.

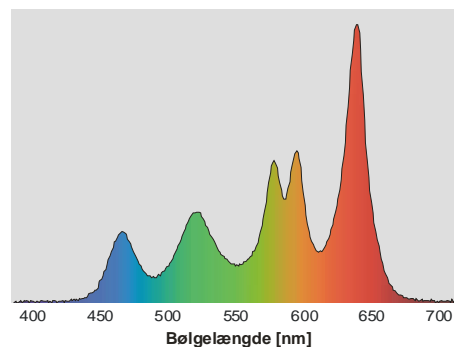
For at en diodelyspære baseret på RGB-teknologi skal kunne udsende lys som fra en traditionel lyskilde, skal lysdioderne sammensættes således at lyset fra pæren opnår en farvetemperatur som svarer til den traditionelle lyskilde. Og samtidig skal spektralfordelingen være således at lyset fra diodelyspæren giver en god farvegengivelse, et Ra-indeks på 90 eller derover.

Lyset fra glødepærer har en farvetemperatur på omkring 2800 K, hvorimod halogenpærer har en lidt højere farvetemperatur på omkring 3200 K. Begge disse lyskilder har et meget højt Ra-indeks på 99, hvilket svarer til at deres spektralfordeling svarer til en ideel temperaturstråler. Dette kan kun tilnærmelsesvis opnås med lysdioder.

Den udviklede designfacilitet til spektral dimensionering af diodelyspærer, udfra ønsket farvetemperatur og optimal Ra-indeks, er benyttet til design af en række diodelyspærer. Designfaciliteten er beskrevet i afsnittet **Spektralt design, farvetempertur og Ra-indeks** og tager udgangspunkt i karakterisering målinger på de enkelte lysdioder.



Målt spektralfordeling af lyset fra en 60 W glødepære. Farvetemperaturen er 2850 K og Ra-indekset er 99.



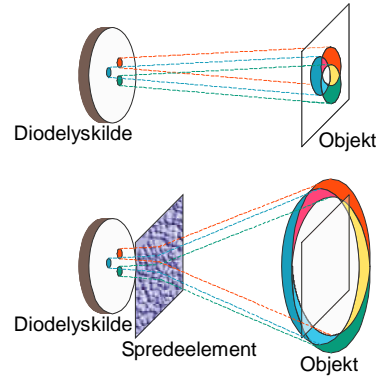
Designet spektralfordeling af diodelyspære bestående af 32 lysdioder med 5 forskellige farver. Lyset har en farvetemperatur på 2815 K og et Ra-indeks på 91.

En diodelyspære baseret på blanding af lyset fra 32 farvede 5 mm lysdioder er designet og fremstillet. Der er til denne prototype benyttet 5 forskellige farvede lysdioder i følgende sammensætning, 2 blå, 9 grønne, 10 gulgrønne, 7 gule og 4 røde. Denne sammensætning er designet ud fra et ønske om en hvid diode lyskilde med en farvetemperatur på ca. 2850 K svarende til en glødepære og en ønske om en god farvegengivelse med en Ra-værdi på mindst 90. Spektralfordelingen for diode lyskilden er vist på figuren til venstre. Den

designede diode lyskilde har en farvetemperatur på 2815 K og et Ra-indeks beregnet til at være 91.

For at lyset, der udsendes fra diodelyskilden skal fremstå som hvidt og give en jævn og homogen belysning er det nødvendigt at designe og udvikle et optisk system med dette formål.

Design arbejdet har vist at der som minimum skal benyttes to optiske elementer, som fungerer henholdsvis som spredde og sløreelement. Funktionen af det første spreddelement er at forstørre det areal hvor de forskellige farver overlapper og danner den hvide farve. Dernæst skal der placeres et sløreelement på objektets plads, for at lyskilden skal fremstå hvid når man kikker ind mod lysdioderne.

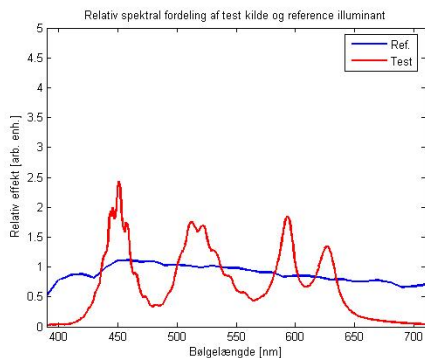


Ved at placere et spredde-element foran diodelyskilden forstørres det overlappende felt på det belyste objekt, således at kildens belysning fremstår hvid.

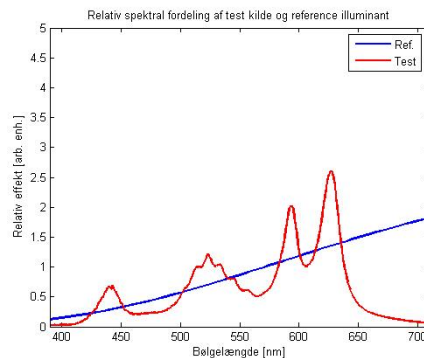
Spredde og sløreelementerne kan implementeres ved brug af forskellige optiske komponenter, som f.eks. linser, diffusere, eller mikrolinser. I afsnittene **Design af optiske systemer til spredning af lyset** og **Computer modellering af LEDs og LED systemer** er beskrevet en metode til ændring af lysdiodernes linseform hvorved der opnås en væsentlig større udstrålingsvinkel, fra 24 til 73 grader, og samtidig opnås ca. 16 % øget udkobling fra lysdiodechippet hvilket skyldes en reduktion af diodens interne refleksionstab. Denne metode blev først undersøgt og optimeret ved hjælp af numerisk raytracing af lysudsendelsen fra lysdioden og derefter implementeret.

I projektet er undersøgt en række forskellige udformninger af diffusere til de to optiske funktioner. Udvikling af holografiske diffusere er beskrevet i afsnittet **Design af optiske systemer til spredning af lyset** og udviklingen af diffusere elementer baseret på mikrolinser er beskrevet i afsnittet **Mikrolinse arrays**. Disse udmærker sig ved et mindre tab frem for holografiske diffusere.

I lysdiodepæren baseret på højeffekt lysdioder er benyttet lysdioder med en stor udstrålingsvinkel på omkring 120 grader hvilket giver et godt overlaps område og en god blanding af lyset fra de forskellige dioder. Denne pære er som beskrevet i afsnittet **Højeffekts lysdiodepære** sammensat af såvel farvede lysdioder som hvide lysdioder. Der er fremstillet to typer af spektralfordelinger som har farvetemperaturer på omkring 2850 K og 6500 K. Disse svarer til lyset fra hhv. en 60 W glødepære og dagslyset på en overskyet dag.



Den røde kurve viser spektralfordeling af højeffekts diodelyspære med en farvetemperatur på 6497 K og et Ra-indeks på 89. Den blå kurve er spektralfordelingen for dagslys med samme farvetemperatur.



Spektralfordeling af højeffekts diodelyspære med en farvetemperatur på 2920 K og et Ra-indeks på 91. Den blå kurve er spektralfordelingen for en ideel temperaturstråler med samme farvetemperatur.

Lysdioders levetid

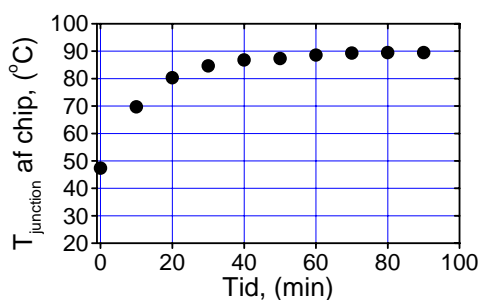
- Beskrivelse af dioders levetid

Der er flere parametre, som kan stresser en diodebaseret pære, i særdeleshed forøget strøm og temperatur. Luxeon dioderne siges generelt at være specificeret til at have en levetid (defineret som den tid dioden kan lyse inden lyseffekten er faldet til 70% af den oprindelige effekt) på mindst 50.000 timer, forudsat at strømmen er under 350 mA og temperaturen af selve chippen holdes under 90°C. Hvis disse to stressparametre forøges forkortes levetiden.

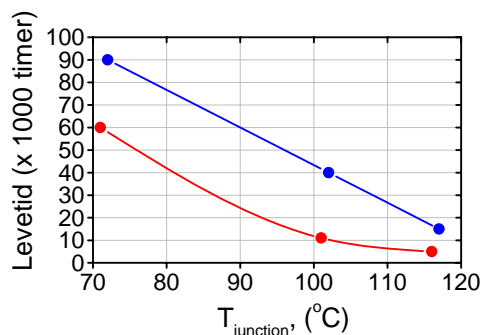
Hvad angår strømmen til dioderne, vil denne relativt nemt kunne holdes konstant på 350 mA ved at benytte de dertil designede strømforsyningsmoduler. Temperaturen kan imidlertid ikke styres ligeså effektivt. Her er man afhængig af passiv køling, hvor dioderne holdes i termisk kontakt med en køleplade af f.eks. aluminium.

Faren ved at placere mange dioder tæt på hinanden er at de kan have vanskeligt ved at komme af med varmen. Vi har derfor målt og efterfølgende beregnet temperaturen af dioderne i en periode på 90 min efter at den er blevet tændt. Her viste det sig at temperaturen (såkaldt T_{junction}) efter ca. en time stabiliserede sig på 90 grader.

Ifølge databladet for Luxeon dioderne, falder levetiden ikke ens for de blå-grønne og de orange-røde dioder. Det forholder sig nemlig sådan, at for dioder baseret på Indium Gallium Nitrid (blå/grønne farver) falder levetiden fra 90.000 til 60.000 timer, hvis temperaturen af chippen øges til 90°C, hvorimod dioder baseret på Aluminium Indium Gallium Phosphid (orange/røde) falder fra 60.000 til 25.000 timer ved tilsvarende temperaturstigning, se Lumiled Application Brief AB25. De 90°C er altså kritisk for de orange-røde dioder. Hvis man skal holde en levetid på over 50.000 timer, må junction temperaturen ikke overstige 75°C.



Gennemsnitstemperaturen (såkaldt junction temperatur) af de 36 dioder i pæren i en periode på 90 min efter tilslutning af en strøm på 350 mA. Omgivelsestemperaturen var 25 grader.



Levetidens afhængighed af junction temperatur for hhv. (blå kurve) Indium Gallium Nitrid, dvs. blå-grønne farver, samt (rød kurve) Aluminium Indium Gallium Phosphid, dvs. orange-røde farver.

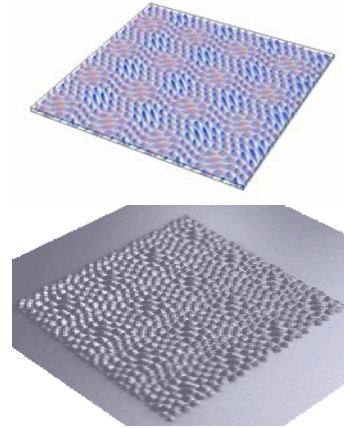
Mikrolinse arrays

- *Udvikling og produktion af prototype på holografisk linse med samme egenskaber som traditionelle linser*

Eftersom det viste sig, at de fremstillede holografiske diffusere havde for store tab, blev det besluttet at afprøve mikrolinsearrays som alternativ. Linsearrays spreder lyset ved simpel brydning i de krumme linseoverflader, hvilket er en mere kontrollerbar proces i modsætning til diffraktionsprocessen i diffusorer. Man undgår spredning af lys i forkerte retninger.

Ligesom med diffusorer, er det af stor vigtighed at de enkelte mikrolinse-enheder er tilfældigt spredt på overfladen og dermed ikke ligger i lige rækker med ens afstand mellem hver linse. Dette ville i givet fald fremkalde såkaldte diffraktionsmønstre, hvilket er uønsket. Den gennemsnitlige linseafstand og linsehøjde er for prototypen valgt således at spredningsvinklen er ca. 10 grader.

Prototypens linsestruktur er først designet matematisk, hvorefter den er overført til Risø's Nanoplotter, der via en fokuseret laserstråle er i stand til at indgrave den matematisk beregnede struktur i overfladen på en fotoresist lak. Herefter kan strukturen kopieres over i nikkel og siden masseproduceres v.h.a. sprøjtestøbning.



Mikrolinsearrays. Øverst: matematisk design af overfladetopografi; nederst: den faktiske opnåede topografi v.h.a. Risø's Nanoplotter. Hver mikrolinse er i gennemsnit ca. 8,5 μm bred og ca. 1 μm dyb.

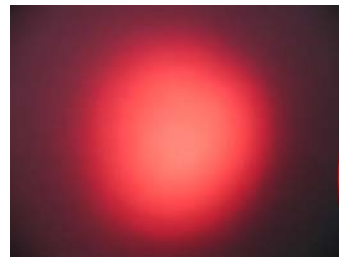
Til prototyperne har det dog været mere bekvemt at benytte en anden replikeringsteknik, hvor resiststrukturen først kopieres over i et elastomer material og efterfølgende overføres til en plastskive via UV hærdende lim.



Tre prototype mikrolinselementer.



Lys fra en enkelt rå LED uden mikrolinseelement. Den ujævne lysfordeling hidrører fra diodens asymmetriske opbygning.



Lys fra en enkelt LED med mikrolinseelement. Skyggerne i lyset er som det ses udvisket.

Mikrolinselementerne er blevet testet både på enkelt-dioder samt på den samlede LED prototype pære. Her viste elementerne tilfredsstillende spredtegenskaber samtidig med et samlet tab på blot 11%, hvilket kun er 1% mere end tabet i en blank plastskive. Mikrolinseelementet lever derfor op til kravene.

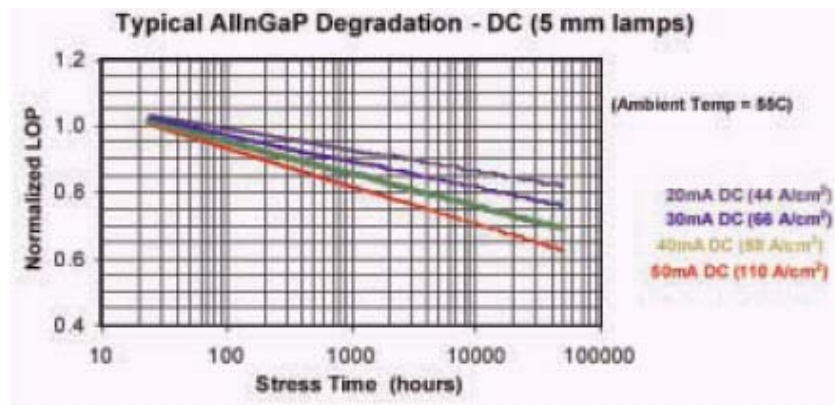
Lystekniske problemer over tid

- Undersøgelse og beskrivelse af eventuelle lystekniske problemer og løsninger relateret til, at lysudsendelsen fra de farvede dioder i den hvide lyskilde varierer over tid

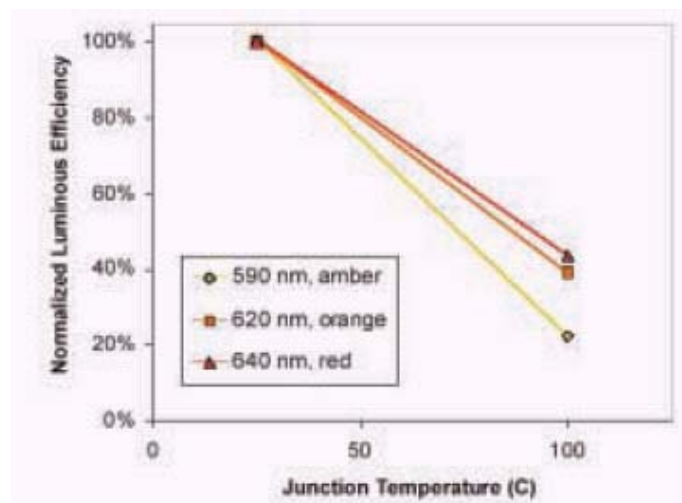
Lysdioder ændrer deres udstråling over tid. Og da RGB løsningen forudsætter brug af flere forskellige farver, og samtidigt 2 forskellige halvlederstrukturer som basis for disse farver, er det naturligvis væsentligt at kigge på langtidseffekterne.

Ved fremstilling af RGB pærer er det vigtigt, at pærens karakteristik holdes stort set uændret over en lang periode. Her tænkes specielt på lys intensitet og farvetemperatur.

Nedenstående kurve viser, at lysdiodernes nedbrydning over tid, afhænger af primært 2 faktorer. Dels temperatur og dels strømmen gennem dem.



Strømmen gennem dioden har stor indflydelse på den effekt der afsættes i selve dioden, og derfor den indirekte årsag til opvarmningen af dioden. Nedenstående kurve viser effekten af en forøget temperatur.



Som det ses, falder lys intensiteten drastisk som følge af forhøjede temperaturer, og tillige falder den forskelligt, afhængigt af diodens farve. (Forhøjede temperaturer, kan umiddelbart omsættes til den forventede effekt hen over levetiden.)

Sammenfattet kan man sige, at det ikke kan undgås at levetidseffekten vil optræde over tid. Dette efterlader 2 mulige løsninger. Den ene går på at kompensere for problemet, og den anden på at sørge for, at det ikke bliver større end at det er acceptabelt.

RGB Lamps har valgt, ud fra et ønske om, at lave pærerne så energi besparende, som overhovedet muligt, at designe pærerne ud fra et princip om, at reducere effekterne så meget, at pæren efter 50.000 timers drift, vil kunne fremstå med et så lille skift i farvetemperatur, at det ikke umiddelbart vil kunne registreres med øjet. Dette giver i praksis en tolerance på farvesammensætningen på ca. 8% i området mellem 3000 og 3800 K.

RGB Lamps design er derfor baseret på en optimering af en strøm/temperatur/levetids formel, der er indlagt i vore design værktøjer.

Design værktøjet tager således højde for nedbrydningen af de enkelte dioder over tid og imødegår det ved at lægge de nødvendige marginer og begrænsninger ind i dimensioneringen af pærerne. Selve beregningen er temmelig kompleks, da den også involverer en række andre indirekte faktorer, som ændret spændingsfald over dioderne.

Hvis disse begrænsninger ikke lå der, ville pærerne kunne fås til at lyse en hel del kraftigere, men til gengæld ville de ikke have en stabil farvetemperatur i mere end nogle få tusinde timer. Og en markant del af energieffektiviteten ville gå tabt.

Armaturer til diodelyskilder

- Udvikling af prototyper på armaturer for de diodelyskilder projekter taget udgangspunkt i, og andre relevante diodelyskilder på markedet. Armaturer til f.eks. private boliger, kontorer, restauration, udendørs, butikker, m.m.

Nordlux's primære opgave i projektet har været at udvikle prototyper på armaturer for de diodelyskilder som projektet tager udgangspunkt i. Samtidig har Nordlux undersøgt andre relevante diodelyskilder på markedet, såvel indendørs som udendørs.

Med udgangspunkt i projektets prototype af diodepæren, er der fremstillet følgende 4 prototyper:

1.Hermes downlight

Er primært er til udendørs anvendelse og specielt til indbygning i udhænget rundt på parcelhus. Armaturet fremstilles i kunststof, som har meget lang holdbarhed uden vedligeholdelse. Med dette, kombineret med diodepærens lange levetid og lave energiforbrug, mener Nordlux at have løst et stort behov hos folk, som ønsker huset oplyst i mange timer, især i den mørke tid af året.

Armaturet kan også anvendes indendørs, f.eks i baderum.

2.Polo semispot

En indendørs traditionel spotlampe, som i sin udformning er tilpasset diodepære.

3.Serenade natlampe

Er en lampe med mange anvendelsesmuligheder, f.eks. natlampe, entre, badlampe.

Lampen er designet med indirekte lys, da pæren kaster lyset op mod en reflektorplade, som derefter spreder lyset op gennem en opal skærm.

4.Nightlight

Er tænkt som en lede/vågelampe. Lampen kan eksempelvis anvendes i børneværelse, hvor man ønsker en dæmpet belysning om natten.

Armaturerne: Hermes downlight – Polo semispot – Serenade natlampe – Nightlight, er alle designet specielt under projektet vedrørende energibesparelser med diodelys.

Herudover har Nordlux fremstillet 2 armaturer beregnet for diodelys, som findes på markedet i dag. De er illustreret på billederne herunder



Recess – Indbygningsspot, der kan anvendes både indendørs og udendørs.



Andros – Nedgrav 3-kit, der anvendes til nedgravning i gang/køre arealer som ledelyskilde.

Resultater ud over projektplan

LED laboratorium

I projektet er der opbygget et LED laboratorium til karakterisering af lys-, farve-, strøm- og temperatur-forhold for LED'er og lyskilder. Et detaljeret kendskab til, hvorledes strøm og temperatur ændrer udstrålingsforholdene for de LED'er, der indgår i LED prototype pærerne er nemlig afgørende for at opnå et tilfredsstillende resultat. Desuden er det nødvendigt at sammenligne disse forhold med de tilsvarende forhold for eksisterende lyskilder.



Foto af test stand: Test stand med LED holder (til højre) og spektrometer (til venstre).



Foto af LED holder: Øverste halvdel af LED holderen. To stepmotor kontrollerer rotationen omkring to akser. LED strøm-forsyningen og temperatur kontrolenheden ses i baggrunden.

Nøgleenheden i laboratoriet er den fuldt automatiserede test stand, der er op- og udbygget i løbet af projektet. Teststanden består i hovedtræk af en specialudviklet pc-styret LED holder samt en skinne, hvorpå diverse analyse instrumenter kan monteres. LED holderen kan roteres 360° omkring 2 forskellige akser, og holderens bevægelser styres v.h.a. et specialudviklet program, der samtidig styrer strøm og temperatur for den LED, der karakteriseres.

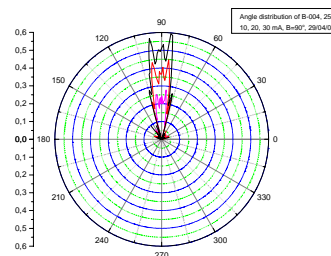
Følgende målinger kan udføres på en LED med test standen:

- Spektralfordeling som funktion af strøm og temperatur
- Total udsendt lyseffekt som funktion af strøm og temperatur
- Rumlig lysudstrålingsfordeling (i et halvrum) ved fast strøm og temperatur

Derudover er det muligt i LED laboratoriet at karakterisere lyskilder generelt. Følgende målinger kan udføres på lyskilder:

- Spektralfordeling
- Rumlig lysudstrålingsfordeling (i et halvrum) p.t. af lyskilder med lille fatning (E14 el. tilsvarende)

Udfra den målte spektralfordeling beregnes for farvede lysdioder parametrene:



Lysudstrålingsdiagram: Rumlig lysudstrålingsfordeling for LED ved forskellige strømme på hhv. 10 mA (pink), 20 mA (orange) og 30 mA (sort).

- Peak bølglængde
- Dominerende bølglængde
- Spektral bredde

For hvide lysdioder og andre hvide lyskilder beregnes parametrene:

- Farvekoordinater
- Farvetemperatur
- Ra-indeks

som er vigtige karakteriseringsparametre for hvide lyskilder som er yderligere beskrevet i afsnittet **Spektralt design, farvetemperatur og Ra-indeks**.

En udførlig beskrivelse af test standen samt eksempler på de forskellige typer af målinger på LED'er kan findes i Risø-I-2271.

Højeffekts lysdiodepære

Projektet har vist at det er vanskeligt at opnå en høj total lysstrøm fra en diodelyskilde baseret på 5 mm lysdioder idet disse har en begrænset lysstrøm per enhed.

Det har derfor været ønskeligt at fremstille en diodelyskilde som er baseret på højeffekt LEDs. Formålet med denne lyskilde er at demonstrere at det er muligt at fremstille en diodelyskilde

- med størst mulig energieffektivitet
- med en stor lysstrøm (lumen) som kan matche almindelige glødepærer (40 – 100 W) med et begrænset udstrålings areal
- med mulighed for flere farvetemperaturer og dæmpning
- som kan fungere som en demonstrations diodelyskilde

Der er udviklet en diodelyskilde bestående af et armatur med 36 høj effekts lysdioder og en strømforsyning der kan styres via et computer interface.

Der er benyttet luxeon lysdioder fra Lumileds som har et energiforbrug på omkring 1 W. Diodelyskilden er baseret på blanding af 5 enkelt favede lysdioder og to typer af hvide lysdioder. De benyttede lysdioder er udmålt på forhånd og de mest effektive er udvalgt.

Den udviklede designfacilitet beskrevet i afsnittet **Spektralt design,**

farvetemperatur og Ra-indeks er benyttet

til sammensætning af forskellige spektralfordelinger med ønsket farvetemperatur og optimal farve gengivelse. I tabellen herunder er angivet mulige indstillinger for diodelyskilden

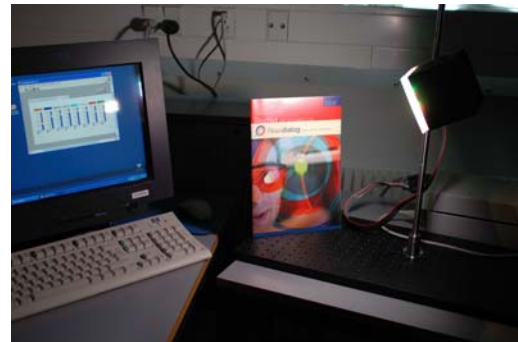
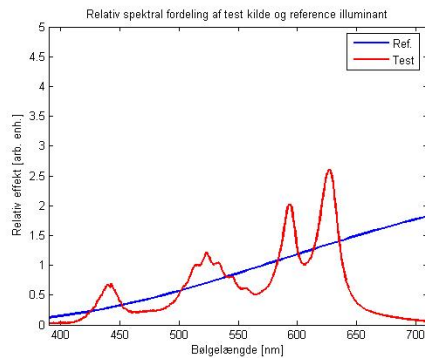


Foto af diodelyskilde, armaturet med 36 højeffekts lysdioder ses øverst til højre, sammen med strømforsyning og computer-interface til styring af farve-sammensætningen.

Type	Effekt [W]	Flux [lm]	Farvetemperatur [K]	Ra-indeks	Energieffektivitet [lm/W]
Lumiled A	30,2	811	2920	89,1	26,9
Lumiled B	34,7	831	6497	90,8	24,0
Lumiled C	11,1	327	2689	56,0	29,8
Lumiled D	20,4	606	2802	79,9	29,7



Designet spektralfordeling for højeffekts diodelyskilden, som har en farvetemperatur på 2920 K svarende til en glødepære og et Ra-indeks på 89. Lyskilden har en lysstrøm på 811 lm og en energieffektivitet på 27 lm/W. Den blå kurve viser spektral-fordelingen af en temperaturstråler med samme farvetemperatur.

Diodelyskilden kan således fungere ved vidt forskellige farvetemperaturer, her fra omkring 2850 K svarende til en 60 W glødepære og ved 6500 K svarende til dagslys på en overskyet dag. Det ses at der kan opnås en høj lysstrøm på over 800 lm for indstilling A og B, altså mere end lysstrømmen fra en normal 60 W glødepære. Lysstyrken estimeres til at være ca. 4 gange højere på grund af udstrålingsvinklen på omkring 120 grader.

Energieffektivitet ses for disse at ligge omkring 24 – 27 lm/W og med et højt Ra-indeks på ca. 90. På bekostning af farvegengivelsen er det muligt at lave mere energieffektive spektralfordelinger, C og D, som har effektiviteter på ca. 30 lm/W.

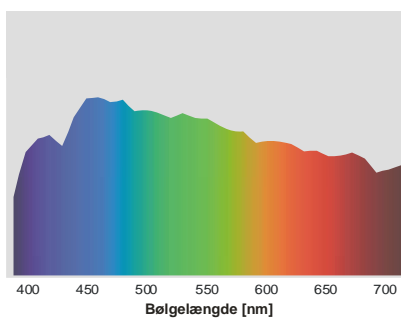
En uddybende beskrivelse af diodelyskilden er givet i Risø-I-2383.

Spektralt design, farvetempertur og Ra-indeks

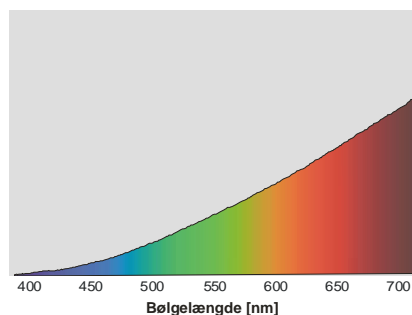
For at kunne designe en LED hvidtlyskilde baseret på blanding af farvede dioder har det været nødvendigt at kunne karakterisere hvidt lys og derigennem at kunne sammenligne forskellige hvide lyskilder. I projektet er opbygget faciliteter til karakterisering af generelle hvide lyskilder og der er opbygget en facilitet til design af lysdiodepærer, således at disse får de ønskede optimale karakteristika.

Hvidt lys beskrives ved en række forskellige parametre som farvekoordinater, farvetemperatur og Ra-indeks, der beskriver lysets farvefremtoning og farvegengivelse.

En hvid lyskildes korrelerede farvetemperatur (CCT), er den temperatur som en ideel temperaturstråler (et opvarmet legeme) skal have for at lyset fra denne opfattes som havende samme farve som lyskilden. Farvetemperatur angives i Kelvin-grader forkortes K,



Fysisk spektrum af dagslys i det synlige bølgelængdeområde fra 400 – 700 nanometer. Farveindtrykket for det menneskelige øje svarer her til det hvide lys, som udsendes af et legeme opvarmet til 6500 grader Kelvin (K). Dette kaldes lysets farvetemperatur.



Grafen viser den målte spektralfordeling af en 60 W glødepære, hvor Ra-indekset er beregnet til at være 99. Det ses at glødepærer indeholder relativt meget rødt lys i forhold til blåt. Derfor har glødepærer et rødtligt eller gulligt skær, som opfattes som varmt lys, svarende til en farvetemperatur på ca. 2850 K.

og det er værd at bemærke, at lys som vi betragter som værende varmt, solnedgang eller glødepære lys har en lav farvetemperatur, hvorimod lys der betragtes som værende koldt, dagslys på en overskyet dag har en høj farvetemperatur.

Farvegengivelsen af en hvid lyskilde beskriver den effekt lyskilden har på farvefremtoningen af objekter sammenlignet med deres fremtoning under en referencelyskilde. Ra-indekset benyttes til beskrivelse af farvegengivelsen, som den internationale belysningskommission (CIE) i 1974 har beskrevet en metode til måling og angivelse af. På engelsk kaldes Ra-indekset color rendering index og forkortes CRI.

Måling og beregning af en lyskildes Ra-indeks baseres på en måling af lyskildens farvesammensætning eller spektralfordeling. Denne måling foretages i det udviklede lysdiode laboratorium, beskrevet i afsnittet **LED laboratorium**. Ud fra den målte spektralfordeling beregnes lyskildens farvekoordinater og farvetemperatur. Farvetemperaturen er afgørende for hvilken referencekilde der skal benyttes til Ra-indeks beregningen. Hvis farvetemperaturen er mindre end 5000 K benyttes en ideel temperaturstråler og hvis farvetemperaturen er højere end 5000 K benyttes en fase af dagslys. I begge tilfælde skal referencekilden have samme farvetemperatur som lyskilden. For en lyskilde med en farvetemperatur på omkring 2850 K vil referencekilden være næsten identisk med lyset fra en 60 W glødepære.

Til beregning af det generelle Ra-indeks benyttes et sæt af 8 test farve objekter som er specificeret af CIE. Herudover benyttes 6 test farve objekter, der kan benyttes til evaluering af en lyskildes gengivelse af forskellige klare farver.

For hvert test objekt beregnes forskellen ΔE_i i farveindtrykket, som angives i farvekoordinater, af lyset der reflekteres fra test objektet under belysning med hhv. lyskilden og referencekilden. Herudfra beregnes et specifikt Ra-indeks for dette objekt:

$$Ra_i = 100 - 4.6 \Delta E_i$$

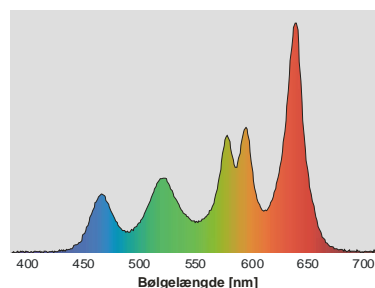
Det generelle Ra-indeks er defineret som middelværdien af de specifikke Ra-indeks for de 8 test objekter. Hvis spektralfordelingen af lyskilden og referencekilden er identiske vil ΔE_i være 0 for alle test objekter. Dette svarer til den højeste værdi af Ra-indekset på 100, svarende til en ideel farvegengivelse i forhold til referencekilden.

Det er vigtigt at holde for øje at Ra-indekset udelukkende beskriver hvor godt en lyskilde svarer til referencekilden. Og det giver ikke mening at sammenligne Ra-indeks for to lyskilder som ikke har samme farvetemperatur. Der bør foretages ny forskning indenfor kvalitetsmål for hvidt lys genereret med lysdioder, idet Ra-indekset for farvegengivelse ikke giver nogen god beskrivelse.

På baggrund af denne facilitet til måling og beregning af farvetemperatur og Ra-indeks er udviklet en designfacilitet, som benyttes til udvikling af lysdiodepærer baseret på RGB-teknologien.

Dette beregningsprogram tager udgangspunkt i målinger af de enkelte farvede lysdiodes spektralfordeling, se afsnittet **Karakteriseringsmålinger** og Risø-I-2271 om karakteriseringsmålinger på lysdioder.

Ud fra en specifik sammensætning af forskellige farvede lysdioder til en lysdiodepære er der så



Beregnet spektralfordeling af lysdiode-pære opbygget af 5 forskellige farvede dioder: blå, grønne, gulgrønne, gule og røde, svarende til de 5 toppe i spektralfordelingen. Lysdiodepæren har en farvetemperatur på 2815 K og et Ra-indeks på 91.

muligt at beregne dennes spektralsammensætning og derigennem diodepærens farvetemperatur og Ra-indeks. Ved at variere antallet af de indgående forskellige farvede lysdioder er det muligt at sammensætte lysdiodepærer med en ønsket farvetemperatur. Samtidig er det muligt at ændre sammensætningen således at dere opnås en optimal farvegengivelse, så højt et Ra-indeks som muligt.

Vi er derfor i dag i stand til præcist at designe og teste sammensætningen af en diodebaseret lyskilde med en hvilken som helst farvetemperatur og et optimalt Ra-indeks.

Implementering af LED lys

EMC undersøgelse

- Undersøgelse af eventuelle støjproblemer på eldistributionsnettet og i forhold til omgivelserne (EMC) ved opsætning af mange diode lyskilder tæt sammen

LED lys i relation til EMC direktivet, EN standarder og CE-mærkning

Alle elektriske og elektroniske produkter udsender elektromagnetisk stråling, når de er tændt. Strålingen kan virke forstyrrende på andre produkter, og der er derfor regler for og krav produkters elektromagnetiske kompatibilitet - på engelsk forkortet EMC - Electro-Magnetic Compatibility. EMC er både produktets udstråling og dets immunitet mod stråling fra andre.

I januar 2005 trådte et nyt EU EMC-direktiv i kraft. Det nye EMC-direktiv, 2004/108/EF, erstatter det tidligere direktiv 89/386/EØF. Direktivet kan anvendes efter den 20. januar 2005, og det skal anvendes efter den 20. juli 2007.

Direktivet fastsætter beskyttelseskrav og bestemmelser om kontrolforanstaltninger for apparater, der kan tænkes at fremkalde elektromagnetiske forstyrrelser, eller hvis funktion kan tænkes at blive påvirket af sådanne forstyrrelser.

Ved apparater forstås: Alle elektriske og elektroniske apparater samt udstyr og anlæg, der indeholder elektriske og/eller elektroniske komponenter.

Den der producerer, importerer eller - i eget navn - markedsfører eller ibrugtager elektriske apparater, bør sætte sig ind i EF-direktivet om EMC (elektromagnetisk kompatibilitet).

Direktivet fastsætter, at apparaterne skal være konstrueret på en sådan måde, at:

- de ikke frembringer kraftigere elektromagnetiske forstyrrelser, end at radio- og telekommunikationsapparater samt andre apparater kan fungere i overensstemmelse med deres formål.
- apparaterne har tilstrækkelig iboende immunitet over for elektromagnetiske forstyrrelser, så de kan fungere i overensstemmelse med deres formål.

I direktivet kan man bl.a. læse om de væsentlige sikkerhedskrav, som de pågældende produkter skal leve op til, hvordan man dokumenterer produktets overensstemmelse med disse krav, mærkningsregler mm.

Som eksempel kan nævnes, at sparepærer indeholder HF elektronik, der kan forstyrre elnettet og omgivelserne med elektrisk støj. Hvis man sætter mange sparepærer op tæt ved hinanden kan der opstå EMC problemer på nettet.

Producenter af belysningsprodukter og dermed også LED lys produkter kan CE-mærke deres produkt og sende det på markedet, hvis de overholder 4 EN standarder, der indeholder generelle EMC krav til belysning.

LED lys og EMC

Selvom LED teknologien er jævnstrøms teknologi, hvor 230 V 50 Hz netspænding transformeres til jævnstrøm kan der også opstå EMC problemer med LED lys. Og så skal LED lys produkter naturligvis også overholde EMC direktivets krav til immunitet overfor udefra kommende støj.

Jørn Brinkmann fra Osram oplyser (frit efter en telefonsamtale) blandt andet, at:

"Man skal bestemt være opmærksom på EMC forholdene ved LED lys. Blandt andet kan anvendelsen af elektroniske switch-mode strømforsyninger til LED lys give EMC problemer.

EMC problematikken er basalt set den samme som for lavvoltage halogen belysning. Det er blandt andet ledningslængden, effekten, spændingsfaldet og ledningens kvadrat, der er bestemmende for omfanget af den elektriske støj.

Nogle transformere giver mulighed for en maksimal ledningslængde på 4 meter. Andre og større transformere giver mulighed for 8-10 meter.

I de fleste LED lys applikationer er der ikke brug for jord, men med nogle transformere til LED lys er man nødt til at jorde for at få støjen væk.

Så man er bestemt ikke fritaget for at tage stilling til EMC problematikken med LED lys. Der er en eller anden grad af støj, og som med næsten alt andet elektrisk udstyr, er man nødt til at overveje problemstillingen og eventuelt teste sine produkter."

Sluttelig henviser Jørn Brinkmann til en Osram publikation med titlen "Optotronic Technical Guide - Electronic power supplies for LED-modules", der blandt andet indeholder omtale af EMC forhold.

RGB Lamps produkter og EMC

RGB Lamps har ikke hidtil konstateret EMC problemer ved deres produkter - hverken i laboratoriet eller i drift ude hos kunderne.

RGB Lamps har ved designet af elektronikken forebygget EMC problemer ved at undlade at benytte transformatorer hverken mekaniske eller elektroniske. Der er heller ikke benyttet switch mode forsyninger. RGB Lamps har således hverken højfrekvent udstråling eller magnetisk udstråling fra diodepærene.

RGB Lamps strømforsyning er udmålt på TDC EMC laboratorium og har passeret samtlige test. En række immunitet tests har endog været udvidet til det dobbelte af grænseværdien, uden at det gav anledning til problemer.

Således er RGB diodepæren immun overfor de transienter der kan opstå på forsyningsnettet f.eks. som følge af lynnedslag.

Ved meget lave effekter (samlet pære effekt under 0,1W), begyndte strømforsyningen at nærme sig grænsen for harmoniske, men ellers var der absolut ingen uventede eller utilsigtede effekter.

RGB Lamps strømforsyning indgår som en integreret del af produktet, og det er således ikke nødvendigt for kunden at forholde sig til EMC problematikken. Det har RGB Lamps allerede gjort. RGB Lamps strømforsynings teknologi er af samme grund patentanmeldt.

Livscyklus beregninger for diodelyskilder

- At udføre sammenlignende livscyklusberegninger for diodelyskilderne i forhold til glødepærer

Skønnet energiforbrug til fremstilling af lyskilder & armaturer:

Glødepærer:	0,85 kWh
Sparepærer:	3,4 kWh
Lysstofrør:	1,9 kWh
LED lyskilder:	Ikke opgjort, men skønnes til 1-3 kWh
2 kg armatur:	50 kWh

Ifølge et EU direktiv må der fra 2006 ikke indgå bly i elektronik. Bly har især været brugt i loddetin i elektronik.

Materiale- og energiforbrug ved brug af gløde- og sparepærer:

En glødepære med effektivitet på 15 lm/W bruger 67 kWh for at udsende 1 mio. lumentimer. For sparepærer/kompaktlysstofrør er tallene 50-60 lm/W og 17-20 kWh.

For diodelyskilder er tallene med dagens teknologi 25 lm/W og 40 kWh.

En 60 W glødepære med en levetid på 1000 timer anvender ca. 60 kWh i brugsfasen - 75 gange mere end de 0,85 kWh til fremstillingen. En 15 W sparepære med en levetid på 10.000 timer bruger 150 kWh i brugsfasen - 44 gange mere end de 3,4 kWh til fremstillingen. En 3 W diodelyskilder med en levetid på 100.000 timer bruger 300 kWh - d.v.s. mere end 100 gange de skønnede 1-3 kWh til fremstillingen.

10 gange længere levetid af sparepærer og kompaktlysstofrør i forhold til glødepærer sparer ressourcer til fremstilling af 9 glødepærer - d.v.s. ca. 7 kWh. 50-100 gange længere levetid for fremtidige diodelyskilder i forhold til glødepærer sparer ressourcer til fremstilling af 50-100 glødepærer, d.v.s. 40-80 kWh.

Materiale- og energiforbrug ved bortskaffelse af belysning:

Udledning af kviksølv til miljøet er den største potentielle belastning ved bortskaffelse af lyskilder: lysrør og sparepærer. Kviksølvholdige lyskilder betragtes som farligt affald og bortskaffes som sådant. Derved sikres at kviksølv, blyholdigt glas og andre materialer oparbejdes og genbruges.

Energiforbruget ved bortskaffelse af brugte lyskilder er ubetydeligt i forhold til forbruget til fremstilling og brug af lyskilderne. Der kan endda være en energibesparelse, idet genbrug kræver mindre energi, end produktion af nye råvarer.

Konklusion:

Diodelyskilder udmærker sig ud fra en livscyklusvurdering ved følgende i livscyklusfaserne:

- **Produktion:** Længere produktlevetid end alle andre typer lyskilder og dermed - relativt set - mindre ressourceforbrug til fremstilling af lyskilden i forhold til forbruget i brugsfasen.
- **Brug:** Mere energieffektivt lys end glødepærer og dermed mindre miljøbelastende end glødepærer i brugsfasen (emissionen fra kraftværker).
- **Bortskaffelse:** Intet kviksølvindhold (som i sparepærer og lysstofrør) og dermed væsentligt mindre problemer end lysrør og sparepærer ved bortskaffelse.

Pilotprojekter

- At gennemføre 2-3 pilot/demonstrationsprojekter, der giver praktiske erfaringer med og dokumenterer fordele og ulemper ved diode belysning

Da projektansøgningen blev skrevet, var det tanken, at der sidst i projektforløbet skulle gennemføres 2-3 pilotprojekter, hvor RGB Lamps 3 W LED lyskilde skulle testes ude hos udvalgte kunder. Det var imidlertid ikke muligt at gennemføre sådanne pilot/demonstrationsprojekter indenfor projektets tidsramme.

I stedet er en række danske LED lys projekter blevet studeret med henblik på at udtrække erfaringerne fra disse. Herved er der rent faktisk indsamlet erfaringer fra en bredere vifte af LED lys løsninger, teknologier, kunder og udbydere.

Følgende LED lys projekter er beskrevet i rapporten:

- LED lys i facader og skilte på Q8 servicestationer
- LED facedebelysning hos 7-Eleven på Amagerbrogade
- LED lyskilder i gule blink i fodgængerfelter
- LED lys i trafiksignaler
- Hvid LED belysning på gange i Turning Torso (højhus i Malmø)

Andre danske LED lys projekter: Holmbladsgade, Butik Andersen i Fields, Diskotek Seven, samt hvidt LED lys i soveværelse og på lille skulptur

Projekterne dokumenterer, at der allerede i dag kan realiseres meget store el- og driftsbesparelser (60-80%) ved udskiftning af farvet neon lys med farvet LED lys. Derudover viser Turning Torso projektet i Malmø, at hvidt LED lys nu også anvendes som almen lys.

I øjeblikket er der i Danmark er der 5-10 firmaer, der udvikler og sælger LED belysning:

- RGB Lamps – Lyskilder www.rgb-lamps.dk
- e3LED - Lyskilder www.e3led.com
- Lumodan - Ad hoc løsninger www.lumodan.dk
- LED Lumina - Skilte www.ledlumina.com
- LEDTECH Lighting www.ledtech.dk
- Highlight - HL Lys www.high-light.dk
- Louis Poulsen www.louispoulsen.dk
- Solar www.solar.dk
- Henckel www.henckel-gruppen.dk
- Osram www.led.dk

Produktudvikling og fremtidsperspektiver

- Kortlægning af behov for yderligere produktudvikling af diode belysning m.h.p. udbredelse af diodelys. Fremtidsperspektiver

I tabellen nedenfor er det forsøgt at sammenligne de mest almindelige lyskilder på en række generelle lystekniske parametre:

Lyskilders karakteristika	Glødepærer og halogenpærer	sparepærer	Lysstofrør	LED lys
Høj lyskvalitet	Ja	Nej	Måske	Ja
Energieffektivt	Nej	Ja	Ja	Ja
Lang levetid	Nej	Ja	Ja	Ja
Robust	Nej	Nej	Nej	Ja

Kompakt	Nej	Nej	Nej	Ja
Mulighed for dæmpning	Ja	Nej	Ja	Ja
Mulighed for toning	Nej	Nej	Nej	Ja
Udsender varmemstråling	Ja	Nej	Nej	Nej
Udsender UV stråling	Måske	Nej	Nej	Nej
Indeholder kviksølv	Nej	Ja	Ja	Nej
Lav pris	Ja	Ja	Ja	Nej

LED lys kommer positivt ud på alle parametre undtagen lav pris. Det ser således ud til LED lys har en stor fremtid for sig, hvis prisen kommer ned.

Der er imidlertid nogle ulemper ved LED teknologien, som skal iagttages:

- Energieffektiviteten kan endnu ikke hamle op med sparepærer og lysstofrør
- Indkøbsprisen er høj - det afskrækker - selvom driftsøkonomien kan være udmærket
- Lysudbyttet aftager med driftstiden
- LEDs levetid, effektivitet og lysfarve afhænger af omgivelsestemperaturen
- LEDs med højt lysudbytte har kort levetid
- Farvegengivelsen for hvide LED er ikke tilstrækkelig til alle anvendelser
- Lysstyrke og farvetone varierer meget for samme type LEDs. Homogent lys kræver elektronik eller udvælgelse, der fordyrer

En dansk forsknings- og udviklingsindsats indenfor LED bør efter projektets vurdering fokusere på:

- Udvikling og design af færdige LED belysningsprodukter med høj kvalitet m.h.t.:
 - det ydre, fysiske design, der skal være flot og funktionelt
 - det lystekniske skal give godt lys til det givne formål
 - det elektriske skal give lang levetid og lavt elforbrug
- Udvikling af produkter til privatmarkedet, vor elprisen er høj, anvendelsen af glødelys og halogenlys er stort, og der stilles høje krav til kvaliteten af lyset og det ydre design
- Udvikling af niche produkter og teknologier - f.eks. vækstlys til drivhuse, udendørs belysning, og steder med lang driftstid og høj elpris
- Udvikling af optik til effektiv styring af lyset hen hvor der er brug for det
- Udvikling af optik til effektiv blanding af farvet LED lys til hvidt lys
- Udvikling af intelligente styringer af lyset, så det kan tilpasses brugerens skiftende behov
- Fokus på at sikre høj energieffektivitet - blandt andet ved høj virkningsgrad på både de indgående komponenter og de færdige armaturer, lyskilder og lamper
- Fokus på at sikre lang teknisk levetid af produkterne
- Samarbejde med udenlandske aktører - især producenter af LED komponenter og forskningsinstitutioner

LED verdenen - Hjemmesider med nyheder og viden

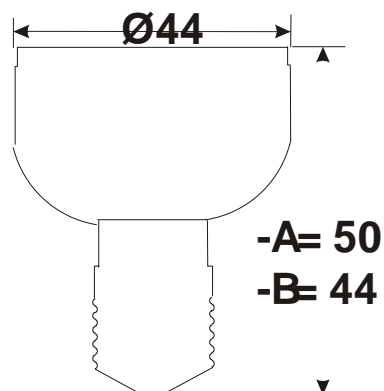
Der findes et utal af hjemmesider om LED lys og LED produkter. Nedenstående hjemmesider anbefales, hvis man vil have viden om LED lys og følge med i hvad der sker:

http://lighting.sandia.gov/Xlightingnewsheadline.htm	US DOE LED lys side
www.ledsmagazine.com	Internet magasin
www.ledmonthly.com	Internet magasin
www.led-info.de/	Tysk side
www.china-led.net/Web	Kinesisk side

RGB-diodelysprototype

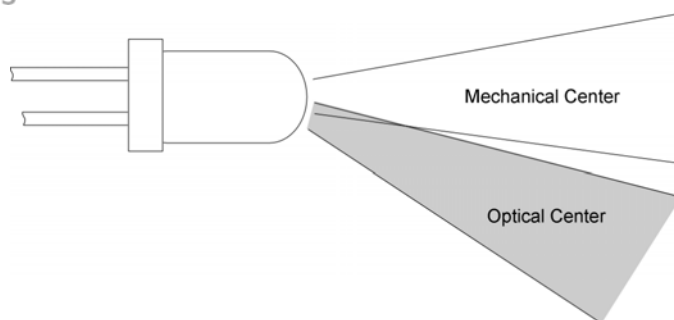
- *Beskrivelse af RGB-diodelysprototype*

- RGB lampen er indkapslet i en slagfast og brandhæmmende poly-carbonat plast, Samme type som anvendes til skudsikre ruder.
- RGB lampen består af :
- Øverst en holografisk linse, fastholdt af en silikone ring.
- Diodel med reflekterende lag. Med henblik på optimal udnyttelse af lyset samt størst mulig effektivitet af dioderne.
- Speciel høj effektiv og nyudviklet spændingsforsyning der omforme spændingen på soklen til brug for dioderne. Denne er hel indstøbt.
- Al elektronik er indstøbt i en støbe masse, der sikrer mod vibrationer og fugtindtrængning.



De enkelte dele af pæren fra strømforsyning til anvendelse af holografisk linse, er alle delelementer i RGBs patent, og er derfor beskyttet af samme.

Det viste sig gennem projektet, at forskellen mellem det mekaniske center, givet ved selve diodens udformning og linse, og det optiske center, givet ved lysstrålens center, var relativt stor. Det gav i de første udgaver problemer med utilsigtede randeffekter, som linsen havde svært ved at diffusere.

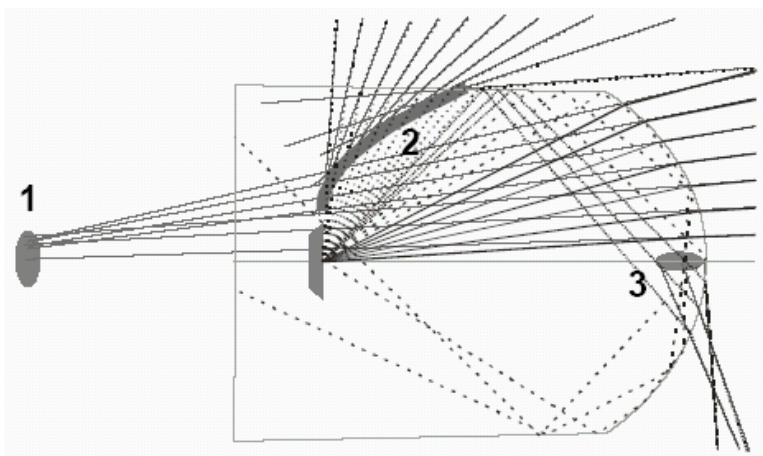


Det viste sig heldigvis, at det optiske center fulgte diodens interne reflektor, som igen fulgte katoden på dioderne. Løsningen blev derfor at lave nye printlayout, hvor alle katode benene på dioden blev vendt mod centrum af diodelys printet. Dermed forsvandt hovedparten af de utilsigtede randeffekter.

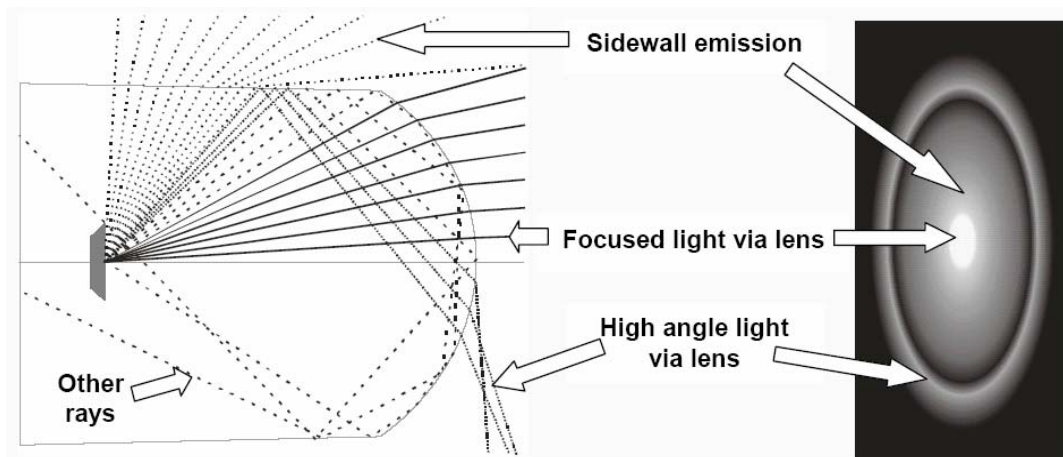
Et andet problem der opstod, bestod i, rent faktisk at kunne måle den korrekte udstrålings karakteristisk for dioderne.

Som det ses af nedenstående figurer, er der tale om flere optiske stråle punkter, som hver for sig spiller ind på målingen.

I nedenstående figur skal man specielt bemærke punktet med benævnelseren 1. Dette punkt vil være det mest dominerende idet, hovedparten af lyset sendes ud indenfor et felt på 30gr. fra dioden. Som det bemærkes ligger dette punkt bag dioden, og der skal derfor tages hensyn til det, hvis man benytter metoder beregnet for isotrope lyskilder.



Som det ses af den næste figur, er lyset fra en diode langt fra isotropt (jævnt fordelt), og med små deformiteter i den enkelte diodes epoxy kappe, samt konstaterede forskelle på placeringen af selve halvleder delen i dioden på op til 1 mm i samme serie af dioder og med samme farve, er det reelt kun muligt at måle udstrålingen vha. et 3D scan af den enkelte diode. Specielt sideudstrålingen og den bagudrettede stråling vil være meget afhængig af chippens placering i selve dioden.



De enkelte ringe på billedet, er dels resultatet af den interne reflektors geometri, men også en afbildning af de fysiske kanter på dioden. F.eks. overgangen til selve linsen. I disse områder er der en specielt stor risiko for fuld intern refleksion. Hele området udenfor den mørke ring, ligger udenfor diodens 30gr. strålingsfelt og kan betegnes højvinkel lys eller om man vil, sidelys.

Vurdering af resultatet mht energibesparelser med diodelys.

Opgaven gik på at fremstille en spotlyskilde med samme lysmængde som en tilsvarende gløde/halogen spotpære, men med et væsentligt mindre energiforbrug.

Pt. må vi forholde os til det, vi kan kalde fakta, og forudsætte at leverandøren leverer dioder med de data de angiver.

En udvalgt Osram Concentra pære (30gr) giver ved et watt forbrug på 25 W 290 Cd.

Concentra pæren indeholder en reflektor og er derfor sammenlignelig med en diode spot pære. Dog vil en reflektor pære ikke have nogen nævneværdig sidestråling, hvorimod en diodepære vil have et vist bidrag, som vist tidligere.

Laver vi forholdsregning, svarer dette til følgende "Beam Candela" værdier:

$$15W = 174 \text{ Cd}$$

$$20W = 232 \text{ Cd}$$

Kriteriet for opfyldelsen af opgaven er således en diodepære der i 30gr. kan give en "Beam Candela" værdi i dette område mellem 174 Cd og 232 Cd.

Herunder listes forskellige diode pære udgaver, som er et delresultater af projektet:

Pære nr.	Blå	Grøn	Orange	Rød	Ra	CCT	Cd total
1	3	21	0	13	3	2467	256 Cd
2	3	23	0	11	11	3046	244 Cd
3	4	23	0	10	14	3513	234 Cd
4	3	21	13	0	72	3889	146 Cd

Alle dioder medregnes ud fra at de forsynes med 22,5 mA hvilket giver følgende værdier for dioderne – baseret på databladene og dermed fabrikanternes typiske værdier for dioderne:

$$\text{Blå} \quad 1,2 \text{ Cd} * 1,125 = 1,35 \text{ Cd}$$

$$\text{Grøn} \quad 4,5 \text{ Cd} * 1,125 = 5,06 \text{ Cd}$$

$$\text{Orange} \quad 2,5 \text{ Cd} * 1,125 = 2,81 \text{ Cd}$$

$$\text{Rød} \quad 10 \text{ Cd} * 1,125 = 11,25 \text{ Cd}$$

Alle udgaver har et samlet forbrug under 3W.

I praksis får dioderne lidt mere strøm, men det derved vundne, tabes i effektivitet, som følge af temperatur stigningen.

Det skal bemærkes, at CCT værdierne og Ra værdierne i disse tal ikke er temperatur korrigerede, idet de bygger på RISØs rå beregninger.

Men vi anser det for givet, at vi har fremstillet pærer med den ønskede lysmængde. Havde pære 4 været en kombination af rød og orange, ville målet på 174 Cd være nået, samtidigt med en relativt høj Ra værdi.

Formidling

- *Formidling af projektet*

Alle generelle perspektiver af udviklingsprojektet er blevet stillet til rådighed for offentligheden. Dette er sket ved konferencer og seminarer i Danmark samt ved omtale i aviser og fagpresse. Endvidere vil slutrapporten blive offentliggjort på Forskningscenter Risøs hjemmeside.

Nedenfor er angivet de konferencer og seminarer, hvor projektet ”Energibesparelser med diodelys” er blevet præsenteret for offentligheden. Målgruppen for disse arrangementet har været forskere, rådgivende ingeniører, iværksættere, designere og firmaer som arbejder lys. Hensigten med foredragene har været dels at orientere om lysdioders store energibesparelsespotentiale dels at inspirere relevante fagfolk og iværksættere til selv at arbejde med denne nye teknologi.

Konferencer og seminarer

”LED-forskning og udvikling i Danmark”,

Paul Michael Petersen,
Seminar arrangeret af Lysteknisk Selskab og afholdt i Byggecentrum i Ballerup
7. december 2004,
antal deltagere ca. 40.

”Udvikling af fremtidens LED-lyskilder”,

Paul Michael Petersen og Carsten Dam-Hansen,
Seminar arrangeret af Musicon Valley,
24. februar 2005,
antal deltagere ca. 25

”Energibesparelser med LED-lys”,

Paul Michael Petersen,
Inviteret foredrag ved Energi og Miljø 05”, Brædstrup
1.-2. marts 2005,
antal deltagere ved arrangementet ca. 100.

”Udvikling af nye LED-lyskilder”,

Paul Michael Petersen og Carsten Dam-Hansen,
Seminar arrangeret af Ingeniørforeningen og afholdt på Forskningscenter Risø
28. april 2005
antal deltagere ved arrangementet ca. 30

”Udvikling af nye diodelyskilder”,

Paul Michael Petersen,
Seminar med deltagelse af Odense Erhvervsråd på Forskningscenter Risø
18. maj 2005
antal deltagere ved arrangementet ca. 15