

Slutrapport for LED-positivliste

PSO 342-035

Af Carsten Dam-Hansen, Dennis Corell, Anders Thorseth, Jesper Wolff, Peter Poulsen, DTU Fotonik og Jakob Markvart, Anne Iversen og Ásta Logadóttir, SBI

The screenshot shows the 'LED POSITIVLISTEN' website interface. On the left, there are filters for 'VÆLG PÆRETYPPE DER ØNSKES SKIFTET TIL LED-PÆRE' (Fatning: E27, GU5.3, GU10; Udlysning: Spot, Ikke spot; Watt: 5W, 15W, 25W, 40W, 60W, 75W). The main table lists various LED products with columns for Title, Forhandler, Lysstrøm, Effekt, Farvetemp., Farvogen, and Erstatning for. A pop-up window displays details for an '8W-E27-ND' bulb, including its image, a spectral power distribution graph, and technical specifications: E27, Ikke spot, 2550 K Varm hvid, 369 lm, 8.2 W, 81.7, 45 lm/W.

Titel	Forhandler	Lysstrøm [?] Lumen	Effekt [?] Watt	Farvetemp. [?] Kelvin	Farvogen. [?] Ra-værdi	Erstatning for [?]
E27-D	Lumodan	1389 lm	25.7 W	2926 K Varm hvid	80.5	80 W Halogen
E27-D	Lumodan	1325 lm	25 W	2662 K Varm hvid	80.5	76 W Halogen
E27-D	Lumodan	1314 lm				76 W Halogen
E27-D	Lumodan	1284 lm				74 W Halogen
18W-E27-ND	Prolamps	851 lm				63 W Glødepære
8.1W-E27-ND	LED - TEK A/S	659 lm				51 W Glødepære
8.5W-E27-ND	LED - TEK A/S	563 lm				46 W Glødepære
8.5W-E27-ND	LED - TEK A/S	551 lm				45 W Glødepære
14W-E27-D	Lumodan	498 lm				35 W Halogen
6W-E27-ND	LED - TEK A/S	441 lm				38 W Glødepære
7.5W-GU10-D	Lumodan	387 lm				29 W Halogen
8W-E27-ND	Prolamps	369 lm				33 W Glødepære
8W-E27-ND	Lumodan	367 lm				33 W Glødepære
7W-GU5.3-D	RAFA LYS A/S	309 lm				24 W Halogen
7W-GU5.3-D	RAFA LYS A/S	306 lm				24 W Halogen
5.7W-E27-ND	Lumodan	304 lm				29 W Glødepære
7.7W-E27-ND	Lumodan	304 lm	7.4 W	2774 K Varm hvid	78.1	29 W Glødepære
7W-GU10-D	Segel	304 lm	6.8 W	2704 K Varm hvid	82.8	23 W Halogen
9W-E27-ND	Lumodan	304 lm	7.3 W	3007 K Varm hvid	81.9	29 W Glødepære
7W-GU5.3-D	RAFA LYS A/S	288 lm	6.6 W	2965 K Varm hvid	79.8	22 W Halogen
8W-GU10-D	Flash Light A/S	281 lm	7.6 W	2927 K Varm hvid	83.4	22 W Halogen

Marts 2013

Forord

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

Projektet er gennemført i et samarbejde imellem følgende partnere: DTU Fotonik, Statens Byggeforskningsinstitut AAU, Dansk Center for Lys og Energirådgiveren samt følgende industrielle partnere: DANLED, RAFA Lys A/S, Dioder-Online I/S, Flash Light A/S, Lumodan og LED-TEK A/S. Projektet har været under ledelse af

DTU Fotonik

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

Projektet er finansieret af Dansk Energi under Elforsk's PSO program, indsatsområde 3a. LED belysning og 7b. Mærkning og effektivitetskrav. Projektet har projekt nr. PSO 342-035, og blev startet i januar 2010 og er afsluttet i marts 2013.

I rapportens første del gives et kortfattet resumé af projektet og dets resultater, herunder baggrunden for og formålet med projektet, hovedresultaterne samt konklusioner og perspektiverne af projektets resultater. I rapporten gives en beskrivelse af baggrunden for og opbygningen og funktionerne af det nye webbaserede værktøj, LED-Positivlisten. I rapportens sidste del gives en uddybende beskrivelse af resultaterne af testmålinger på LED lyskilder, som er foretaget i projektet, herunder langtidstest og en brugerundersøgelse af farvegengivelse. Endelig gives en beskrivelse af formidlingsarbejdet i projektet.



Carsten Dam-Hansen

DTU Fotonik, Roskilde, 31. marts 2013.

Preface

This report contains a description of the work carried out and the results of the research and development project: "LED lighting quality program" and form the final report for this project.

The project is carried out in cooperation between the following partners: DTU Fotonik, Statens Byggeforskningsinstitut AAU, Dansk Center for Lys and Energirådgiveren and the following industrial partners: DANLED, RAFA Lys A/S, Dioder-Online I/S, Flash Light A/S, Lumodan og LED-TEK A/S. The project has been led by:

DTU Fotonik

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

The project is financed by the Danish Energy Association through Elforsk's PSO program, under 3a. LED illumination and 7b. Marking and efficiency demands. The project has no. PSO 342-035 and was initiated in January 2010 and was ended in March 2013.

In the first part of the report a short resume of the project is given, describing the background and aim of the project, the work and results together with future perspectives of the results of the project. The report further contains a description of the background for and development and functionality of the new webbased tool, LED-Positivlisten. In the last part of the report a detailed description of the results of test measurement on LED light sources including the lumen maintenance long-term test and a user test of the color rendering properties. Finally, the work on communicating the results of the project are described.

Indhold

Forord	2
Preface.....	3
Resumé	5
Baggrund	5
Formål.....	5
Projektgruppen.....	5
Resultater	6
Konklusioner og perspektiver	7
LED-Positivlisten	8
Type af produkter	9
Kvalitetsparametre	10
Funktionen af LED-Positivlisten	12
Testmålinger på LED produkter	16
Målemetode	16
Variationer på lyskilder.....	17
Lysstrøm	19
Effektivitet	21
Farvekoordinater & Farvetemperatur	26
Farvegengivelse	28
Langtidstest	32
Brugerundersøgelse	37
Metode	37
Resultater	39
Konklusion af brugerundersøgelse.....	42
Formidling.....	42
Referencer	44

Resumé

I det følgende gives et kortfattet resumé af projektet og dets resultater, herunder baggrunden for og formålet med projektet, hovedresultaterne samt konklusioner og perspektiverne af projektets resultater.

Baggrund

Baggrunden for projektet var de store problemer, forbrugere stod overfor ved at skulle finde erstatninger for de energiineffektive glødepærer, som EU's udfasning af glødepærer over de kommende år ville fjerne fra markedet. Sparepærer var og er et energimæssigt godt alternativ, men på trods af mange kampagner og positivlister har deres farveegenskaber, opstartstid og design medvirket til, at brugen af sparepærer i DK har været begrænset. Med LED teknologiens mange fordele og stadig stigende effektivitet ville LED belysningsprodukter kunne udgøre en ideel, højkvalitets- og energieffektiv erstatning til glødepærer.

Problemet ligger i at markedet invaderes af stadig flere forskellige LED erstatningspærer og egentlige LED lamper og armaturer, der alle bryster sig af LED teknologiens mange fordele, men i realiteten lever mange ikke op til det de lover. Ved projektets start blev mange mindre gode LED belysningsprodukter ofte beskrevet ud fra databladsværdier for de benyttede LED komponenter. Disse afveg dog i høj grad fra det samlede LED produkts egenskaber, bl.a. på grund af de termiske forhold. Lysmængde, energieffektivitet og levetid af LED belysningsprodukter overvurderes derfor ofte fejlagtigt. Dette er med til at forvirre forbrugerne, professionelle som private, og give dem mange dårlige oplevelser og erfaringer med LED belysningsprodukter. Dette ville nedbryde tiltroen til LED teknologien, og dermed forsinke en markedsintroduktion af den nye belysningsteknologi, som vil bringe store energibesparelser i samfundet med sig.

Formål

Projektets formål var derfor at etablere en dynamisk positivliste for LED-belysningsprodukter på det danske marked, for derigennem at skabe et gennemskueligt overblik over disse produkters lyskvalitet og energieffektivitet og dermed et bedre grundlag for valg af produkter for såvel professionelle indkøbere som almindelige forbrugere.

Hoveddelene i arbejdet i projektet var derfor at

- Definere relevante kvalitetsparametre for LED belysningsprodukter
- Udvælge LED belysningsprodukter til test
- Tilvejebringe målefaciliteter og udvikle procedurer for udmåling af kvalitetsparametre
- Etablere en dynamisk positivliste over udvalgte grupper af LED belysningsprodukter med en kategorisering på kvalitetsparametre
- Formidle viden om LED belysningsprodukter
- Deltage internationalt i standardiseringsarbejdet for test og karakterisering af LED-lyskilder
- Udføre brugertest af LED belysningsprodukter

Projektgruppen

Til at gennemføre og opnå dette blev en forskningsgruppe bestående af DTU Fotonik (projektleder), Statens Byggeforskningsinstitut AAU, Dansk Center for Lys og Energirådgiveren sammensat. Gruppen havde således de ønskede kompetencer inden for LED teknologi, lys, måling på lys, belysning og brancheorienteret rådgivning omkring belysning og energi.

En række importører og forhandlere af de LED belysningsprodukter som positivlisten skulle indeholde blev inviteret til at deltage i projektet. Disse var:

- DANLED,
- RAFA Lys A/S,
- Dioder-Online I/S,
- Flash Light A/S,
- Lumodan Aps,
- LED-TEK A/S

De modtog ikke PSO tilskud igennem projektet og indvilligede i at være en del af projektet i en følgegruppe og deltage i møder omkring fastlæggelse af kvalitetsparametre og udvælgelse/levering af LED lyskilder til test. Derudover blev en der udsendt invitation i branchetidsskriftet, LYS, til forhandlere om at deltage i arbejdet.

Resultater

Hovedresultatet af projektet er etableringen af LED-Positivlisten, som er tilgængelig på hjemmesiden, www.lednet.dk. Det er et nyt webbaseret værktøj til formidling af testresultater for LED belysningsprodukter. Værktøjet gør det muligt at søge, sortere og sammenligne LED belysningsprodukters egenskaber som lyskvalitet og energiforbrug. Værktøjet er primært rettet mod professionelle forbrugere. Listen omfatter en række LED belysningsprodukter til erstatning af hhv. halogenspotlyskilder og glødepærer og er baseret på testresultater for en eller flere enheder af hvert produkt.

Resultaterne omfatter test af et stort antal LED baserede erstatningslyskilder på det danske marked. Disse viser, at størstedelen af produkterne har en varm hvid farve og en god farvegengivelse, der lever op til kravene i EU's Quality Charter¹. Derimod er energieffektiviteten af størstedelen af produkterne ikke på højde med kravene.

En omfattende langtidstest af 48 produkter, med over 11.000 timers driftstid til d.d., giver et godt billede af, hvorledes disse LED belysningsprodukters lysmængde falder og farveegenskaber ændres over tid. Disse undersøgelser viser store variationer i målt fald i lysmængde fra fatal fejl over få tusinde timers drift til svag aftagen med 5-10 % over de 11.000 timer, hvilket svarer til levetider på omkring og over 30.000 timer.

En brugertest af en række udvalgte LED baserede erstatningslyskilder viser, at hudfarven vurderes som værende mere naturlig med en øget R9 værdi. Balancen mellem negative og positive evalueringer viste sig at skifte med R9 værdier omkring 20. Dette blev fundet for LED-spots med en sammenlignelig farvetemperatur (CCT) på mellem 2909 K og 3056 K og Ra 80 ± 2 og varierende R9 fra 3 til 27.

Et vigtigt resultat af projektet har været deltagelse i det internationale samarbejde om krav og testmetoder for LED belysningsprodukter, IEA's SSL Annex, som indtil d.d. har resulteret i publiceringen af en række kravspecifikationer og en ny omfattende testmetode, der arbejdes videre med i de kommende år.

Projektet og dets resultater er blevet formidlet til forskellige interessenter igennem en række formidlingsaktiviteter, som workshops, foredrag og artikler i såvel aviser, brancheblade og videnskabelige tidsskrifter.

Konklusioner og perspektiver

Med lanceringen af LED-Positivlisten er der nu opbygget et nyt og stærkt værktøj til formidling af kvaliteten af LED belysningsprodukter, der i første omgang tager udgangspunkt i LED erstatningslyskilder til erstatning af laveffektsglødepærer og halogenspots, hvor LED teknologien i projektets løbetid har udviklet sig hen imod tilfredsstillende at fungere som erstatning herfor når det gælder især lysstrøm, farvetemperatur og farvegengivelse. Værktøjet fungerer som en platform, der kan udvides i takt med, at flere lyskildekonfigurationer bliver relevante (fx LED lysstofrørserstatninger) at sammenligne og foretage veloplyste og målingsbaserede valg i forhold til. Projektets måletekniske indhold såvel som standardiseringsarbejdet i IEA SSL Annexet har resulteret i en udviklingen af en række algoritmer, der på mere eller mindre simpel vis kan bruges til at præsentere kvalitetsparametrene for LED belysningsprodukter og bruges til at sortere efter. Dette er ligeledes en matematisk platform i værktøjet, der kan udvikles efterhånden, som der globalt opnås mere viden om brugerpræferencer i forhold til forskellige brugsscenarier, som gør det muligt at implementere denne viden i sorteringsfunktionerne og dermed hele tiden vejlede brugerne baseret på den nyeste viden givende det bedst mulige grundlag for valg af LED produkter. R9 brugertestene i nærværende projekt er netop et bevis på en generelt set uoplyst og for den generelle forbruger ubekendt parameter, som i en række brugstilfælde er relevant at have med i sit datagrundlag for sorteringen uden at have den lystekniske forståelse af parameteren.

LED Positivlistens optimale effekt opnås kun, hvis den placeres i det rette regi, hvor brugerne naturligt vil søge hen og der haves en markedsføringsplatform af en størrelse, der kan sikre at brugerne opnår kendskab til og dermed bruger listen aktivt. IEA SSL Annex samarbejdet har åbnet en mulighed for, at der med stor sandsynlighed vil kunne deles måleresultater anerkendte laboratorier imellem således at produkter, der findes på det internationale marked ikke behøver at undergå test i hvert land. Da LED Positivlisten er unik ved, at den består af udelukkende målte data og dermed er så retvisende som muligt frem for at basere sig på uverificerede producentdata, opnås også en relativ tung økonomisk drift, da det er bekosteligt med de mange lystekniske målinger. Ved at samarbejde om data kan dette udgiftsniveau nedbringes signifikant og de nationale laboratorier kan hjælpe hinanden med at opnå kvalitet i LED belysningen internationalt. Da lystekniske målinger er objektive mens brugernes behov subjektive og kan være meget varierende afhængig af kultur, breddegrad etc. så kan de nationale listeaktører selv filtrere de målte parametre i forhold til brugernes krav og opnå den bedste formidling til opnåelse af succes for LED belysningsprodukter til det givne lands brugere såvel professionelle som privatforbrugere.

Perspektiverne i en udvidelse af listen til også at omfatte et mere avanceret lag, hvor de meget krævende professionelle lysbrugere kan opnå udvidet produktinformation, er stor. Projektgruppen har via brugerfeedback på LED Positivlisten mærket en efterspørgsel herpå, hvor det fx er ydret relevant at kunne hente flere af de fotometriske data evt. i form af intensitets fordelingen (IES fil). Dette vil kræve lysfordelingsmålinger i goniometriopstillinger. Denne type måling vil også give en række relevante parametre (fx nyttelysstrømmen) for retningsbestemt lyskilder, som ikke kan opnås via de traditionelle integrerende kuglemålinger. Det er et fordyrende led i testplatformen for at kunne opretholde en altid tidssvarende LED Positivliste baseret på målte data, men også et spørgsmål om udbud og efterspørgsel og ikke mindst et relevant behov at afdække, da hvis dette ligeledes er et internationalt behov kan dækkes ved fælles internationale måleprogrammer og deling af måldata med en markant afledt omkostningsminimering. DTU Fotoniks lystekniske laboratorium vil fra medio 2013 være på internationalt state-of-the-art niveau med også denne type målinger og vil kunne fungere som måleplatform herfor.

LED-Positivlisten

Med EU's udfasning af glødepærer, som blev sat i værk 1. september 2009 er der sat pres på for at finde nye energibesparende lyskilder. Sparepærer er energimæssigt et fornuftigt alternativ til glødepærer, men deres lyskvalitet er ikke altid tilsvarende god. Dette har i høj grad bremset udbredelsen og brugen af sparepærer i DK. LED baserede erstatningslyskilder er p.t. på højde med eller lidt bedre end sparepærer når det gælder energieffektivitet, men har derudover også muligheden for at blive et lyskvalitetsmæssigt langt bedre alternativ til glødepærer end sparepærer har været. Og dertil kommer at energieffektiviteten af LED komponenter stadig øges og laboratorieresultater viser, at den nuværende energieffektivitet vil øges de næste 5-10 år, mod omkring 200-250 lm/W afhængig af farvetemperatur og farvegengivelse.

LED teknologiens succes som kvalitetsbelysning og som energibesparende belysningsteknologi afhænger dog helt af, om systemdesignere og producenter leverer LED belysningsprodukter af høj kvalitet på alle de kritiske punkter, der afgør, om et LED produkt vil fungere optimalt. Derudover skal produkterne mærkes, således at forhandlere og forbrugere får en realistisk information om produktets kvalitet og egenskaber. Dette er ikke altid tilfældet og mange mindre gode LED belysningsprodukter beskrives ud fra databladsværdier for de benyttede LED komponenter. Dette gør, at lysstrøm, energieffektivitet og levetid af disse LED belysningsprodukter fejlagtigt overvurderes. Dette er med til at forvirre forbrugerne og nedbryder tiltroen til LED teknologien og giver dem mange dårlige oplevelser og erfaringer med LED belysningsprodukter, der ikke lever op til, hvad de lover.

Der er således brug for tiltag, der bringer den relevante viden om disse nye belysningsprodukter til forbrugerne, professionelle såvel som private, således at de kan gøre de rigtige og fornuftige valg.

GoEnergi havde på deres hjemmeside en liste over LED-pærer, som viste en række af produkternes egenskaber og gjorde, at man kunne sortere på disse. Den var opbygget således, at LED-pærer, som lever op til kravene, der stilles til LED produkter i EU's quality charter¹, kunne komme med på listen. Listen var baseret på, at leverandørerne selv oplyser data for produkterne. Produkterne var således ikke testede, før de kom på listen. Ideen var at foretage en stikprøvekontrol af nogle af produkterne på listen. Hvis testen viste at produktet ikke levede op til kravene for at stå på listen, ville de blive fjernet herfra, og man ville publicere resultaterne. GoEnergi er i løbet af projektperioden blevet nedlagt og link til listen over LED-pærer findes i dag på energistyrelsens hjemmeside². Listen har ikke været opdateret i 2013. Problemet med denne type liste er, at produkter, som i realiteten ikke lever op til kravene, kan være på listen i lang tid. Og det er først efter en stikprøvekontrol, at de kan blive opdaget. Det kunne således være en god idé, at lave en produktliste, som var baseret på test af produkterne, og det er det, der er lagt op til med LED-Positivlisten. Problemet er at det er dyrt at teste produkter, og der skal skabes et økonomisk grundlag for at kunne opretholde og opdatere en sådan liste. I USA har man forskellige tiltag i denne retning. Energy star³ er en mærkningsordning, hvor produkter testes og skal leve op til en række kvalitetskrav, og der er omfattende lister over produkter, der har fået Energy star mærket - såvel LED belysningsprodukter som sparepærer. LED Lighting Facts⁴ er et program, under Department of Energy i USA, som fremviser LED produkter til generel belysning fra producenter, der forpligter sig til at teste produkter og rapportere deres ydeevne. Disse produkter gives et mærkat eller label⁵, som oplyser om produktets ydeevne mht. energieffektivitet og lyskvalitet. LED-Positivlisten, som den er udformet i projektet her, går imod det som LED Lighting Facts gør. Der er dog ikke arbejdet med en egentlig mærkatordning, der oplyser om et produkts ydeevne, da EU stiller krav til mærkning af belysningsprodukter⁶.

En ordning som en LED-Positivliste med en test og kategorisering af en række kvalitetsparametre er altafgørende for at sikre de gode produkter på markedet, deres overlevelse og give LED teknologien et ønsket og positivt gennembrud i belysningsammenhænge til realisering af teknologiens energibesparelspotentiale på belysningsmarkedet.

Type af produkter




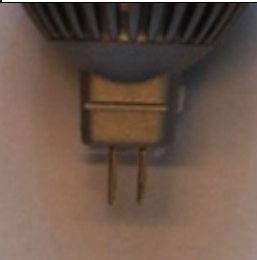
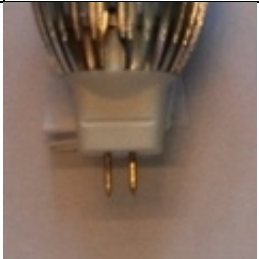
Det er valgt i dette projekt at arbejde med LED baserede erstatningslyskilder til erstatning af hhv. halogenspotlyskilder, som illustreret på Figur 1, og glødepærer. Dette blev gjort udfra at det allerede ved projektstart var energimæssigt og økonomisk fordelagtigt at udskifte halogen spotlyskilder med LED baserede erstatningslyskilder.



Figur 1 Typiske retningsbestemte LED produkter, samt et enkelt halogenspot som er blevet testet i projektet.

Det er valgt ikke at kikke på LED produkter til erstatning af lysstofrør, da der ved projektstart var mange problemer med disse, også sikkerhedsmæssigt. Der er blevet foretaget målinger på LED produkter med følgende forskellige fatnings typer: E14, E27, GU10, GU5.3 og G4/GU4. Både retningsbestemte og ikke retningsbestemte LED lyskilder er blevet målt. Disse produkter dækker en bred vifte af de LED erstatningsprodukter, der findes på markedet i dag. De er primært blevet hentet hjem via samarbejdspartnere i projektet samt nogle er købt i detailhandlen.

Tabel 1 Billeder af typiske fatningstyper for 12 og 230V lyskilder.

230 V LED - lyskilde fatninger			12 V LED - lyskilde fatninger	
E27	E14	GU10	GU5.3	G4
				

Tabel 2 oversigts tabel over de målte lyskilder.

Spænding [V]	Retningsbestemte	Ikke retningsbestemte	E27	E14	GU10	GU5.3	G4
230	95	49	62	4	78	0	0
12	99	23	0	0	0	75	47

I projektet er der blevet målt i alt 266 LED lyskilder, 72 af disse var ikke retningsbestemte lyskilder, tiltænkt erstatning af gløde- og sparepærer. De resterende 194 var retningsbestemte lyskilder, hvor disse er tiltænkt at skulle erstatte halogenspots og lignende lyskilder. Fordelingen af disse er som vist i Tabel 2. Som udgangspunkt ved levering af lyskilder til test, blev der bedt om 3-5 enheder af hver lyskilde, for at give et billede af, hvor stor spredning der er imellem forskellige enheder af samme produkt.

Kvalitetsparametre

Der er en række forskellige kvalitetsparametre der benyttes til at beskrive de fotometriske, kolorimetriske og elektriske egenskaber af lyskilder. I Tabel 3 er vist en liste af de kvalitetsparametre, der i projektet blev taget udgangspunkt i. For at få en indikation af hvilke parametre, der er vigtigst for brugerne, blev der lavet en uvidenskabelig spørgeskema undersøgelse. Den blev udført ved konferencen og workshop, "LED Belysning – krav, test og energibesparelser", der blev afholdt i februar 2011, af DTU Fotonik, Center for Energibesparelser og Dansk Center for Lys. Denne konference gik netop ud på at belyse den enorme mangel på dokumentation og pålidelig mærkning af LED produkter, der fandtes på markedet. På workshopen blev deltagerne undervist i, hvordan man tester og karakteriserer LED produkter.

Undersøgelsen skulle give et indtryk af, hvilke parametre og oplysninger om produkterne, der er vigtigst for brugerne ved valg af lyskilder. I alt 32 ud af 111 deltagere valgte at udfylde spørgeskemaet. I skemaet skulle man angive sin subjektive oplevelse af vigtigheden af givne udvalgte parametre. Vurdering skulle gå fra 0 til 10, hvor 10 var angivet som vigtigst. Resultatet af undersøgelsen kan ses i Tabel 3. Hvis man kigger på parameterprioriteringen i tabellen ses det at især tre ting virker vigtige for forbrugeren. Det vigtigste var om lyskilden kunne dæmpes eller ej, dernæst hvad effektforbruget samt hvad farvetemperaturen for lyskilden er. Det er overraskende, at forbrugeren ser ud til helst gerne vil have en specifik farvetemperatur oplyst fremfor den normale simplificerede oplysning, om lyskilden er varm-, neutral- eller koldhvid. Dernæst kommer oplysninger om lysstrøm (hvis den kom sammen med en tilhørende forklaring om, hvad det er for en størrelse), Ra-indeks og levetid i anden række. Farvekategori og effektivitet, virkede mindre vigtigt til sammenligning med de andre parametre. Dette skyldes formegentlig, at målgruppen for konferencen er blandt teknisk uddannede, og at man med baggrundsviden, ud fra farvetemperaturen ved hvad farvekategorien er samt ved at dividere lysstrømmen med effektforbruget nemt kan finde effektiviteten. Specifikke Ra-indeks for gengivelse af specielle farvede objekter og farvekoordinater var mindre vigtige.

Tabel 3 Resultatet af spørgeskemaundersøgelsen i forbindelse med konferencen. Middelværdien af prioriteringen er vist og herefter er tabellen er sorteret efter disse værdier. Parametre tilføjet af respondenterne er markeret med*

Parameter	Prioritering
Dæmpbarhed	7.5
Effektforbrug [W]	7.1
Farvetemperatur [K]	7.1
Lysstrøm [lm]	6.8
Generelt Ra-indeks (normalt angivet Ra-indeks)	6.6
Levetid	6.4
Effektivitet [lm/W]	6.1
Intensitet [cd] for spotlyskilder	5.9
Erstatningswattage (for tilsvarende glødepære)	5.8
Farvekategori (varm, neutral eller kold hvid)	5.8
Specifikke Ra-indeks (for specifikke farver)	3.9
Farvekoordinater	3.7
Dagslys*	0
EMC standard*	0
Akustisk støj*	0
Temperatur / afstand til afskærmning*	0

Tanken er den, at man i stedet for erstatningswattage skriver, hvad lysstrømmen af lyskilden er, og uddybende beskriver denne størrelse. I takt med glødepærens totale udfasning og introduktionen af nye og mere effektive lyskilder (sparepærer og LED), bliver det mere og mere relevant for forbrugeren at vide, hvor stor en mængde lys de skal bruge fremfor, hvor meget effekt lyskilden bruger. Hvis forbrugeren ved hvor stor en mængde lys, de skal bruge, samt kan få det oplyst på pakkerne, vil de kunne foretage et mere kvalificeret valg om, hvilken lyskilde de skal anvende. Om nogle år vil glødepæren være helt udfaset og der vil det ikke længere give nogen mening at snakke om erstatningswattager. Derfor giver det rigtig god mening at forbrugeren er blevet introduceret til og ved, hvad lysstrøm er for en størrelse, og hvor deres behov ligger, hvis de skal kunne foretage et kvalificeret valg. Dette er resultatet af spørgeundersøgelsen tilbage i starten af 2011. Hvis man foretager en ny spørgeundersøgelse i dag, kan det meget vel tænkes, at svarene ser anderledes ud. I bygge- og supermarkedernes lysafdelinger, findes allerede den dag i dag forklaringer om, hvad lysstrøm er for en størrelse dog sammenholdt med, hvad glødepæren forbruger, så det ser allerede ud til, at man så småt er i gang med at introducere forbrugeren til denne størrelse, så disse kan danne sig en fornemmelse om det.

Resultatet af undersøgelsen er benyttet som udgangspunkt for opbygningen af det webbaserede søge- og sorteringsværktøj, LED-Positivlisten. Denne indeholder i princippet en liste over lyskilder, som er beskrevet med værdier for 4 primære kvalitetsparametre. Det er lysstrøm i lumen, effektforbrug i Watt, korreleret farvetemperatur i Kelvin, farvegengivelse ved generelt Ra-indeks og erstatningswattage for gløde- eller halogenpære.

Derudover består værktøjet af sider med mere information omkring de enkelte lyskilder. Her er de primære parametre gengivet igen ved brug af en række nye pictogrammer. På disse sider er det valgt at give yderligere information om lyskilderne ved at vise den målte farvesammensætning og den beregnede effektivitet i lumen pr. Watt. I det følgende afsnit er funktionen af det webbaserede søge- og sorteringsværktøj, LED-Positivlisten, beskrevet.

Funktionen af LED-Positivlisten

Resultatet af projektet er en demonstrationsversion af LED positivlisten og der er udviklet en hjemmeside til listen, hvortil der er adgang fra www.lednet.dk. Det er i princippet en sortérbar dataliste med informationer om de måleresultater, der er for de enkelte lyskilder. Når hjemmesiden åbnes ses en liste, hvor alle målte lyskilder er med (se Figur 2). Alle skærmbilledeeksempler er genereret ved brug af browseren Google Chrome. På opstartssiden vises listen med alle de testede produkter. De er som standard sorteret efter lysstrøm med den højeste værdi øverst.

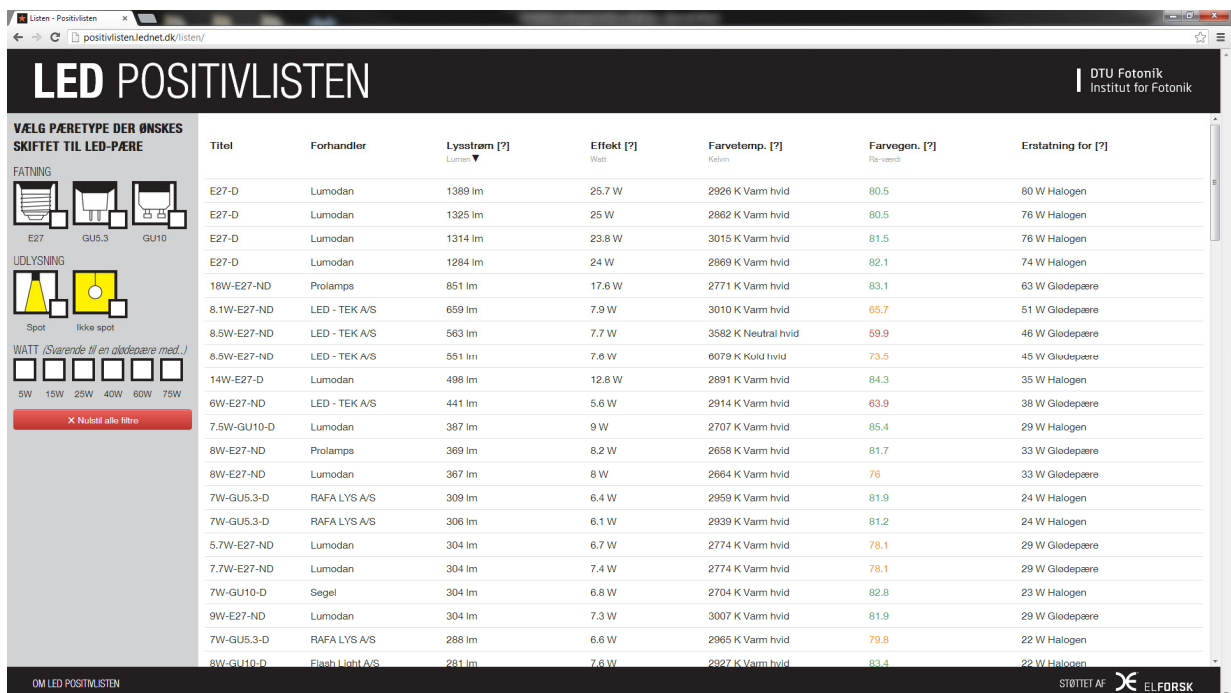
I listen er lyskilderne tildelt en titel, som er sammensat af deres effektforbrug, fatning og udstrålingstype, hvor D (directional) er spotlyskilde, og ND (non-directional) er ikke spotlyskilde. I anden søjle angives forhandler, som her er de firmaer, som har leveret lyskilder til test. I de næste 4 søjler er angivet de målte værdier for hhv. lysstrøm i lumen, effektforbrug i Watt, korreleret farvetemperatur i Kelvin og i den sidste søjle er angivet hvilken wattage og lyskildetype, gløde eller halogenpære, som lyskilden vil være erstatning for. Her vil forekomme wattager, som er beregnede og afrundet, og som ikke reelt vil findes som tilgængeligt produkt. Erstatningswattagerne er beregnet ud fra tabel 6 i ref. 6. For eksempel vil en ikke retningsbestemt lyskilde, der udsender en lysstrøm på 367 lm, svare til den lysstrøm, der udsendes fra en 33 W glødepære, selv om en sådan ikke findes. Erstatningswattagen benyttes alligevel, da mange har et forhold til hvor meget lys normale 25, 40 og 60 W glødepærer udsender og vil kunne relatere det hertil. Når man holder musen hen over en søjles titel, fremkommer der en kort beskrivelse af parameteren. Ved at klikke på dette område, ændres sorteringen af listen efter den valgte parameter. Ved at trykke udfor Farvetemp. opnås en sortering af listen efter stigende farvetemperatur. Klikker man en gang mere, sorteres listen efter faldende farvetemperatur. En lille sort trekant indikerer den aktuelle sorteringsparameter og retning. Der er indlagt en farvekodning til hjælp ved vurdering af parameteren for farvegengivelse, Ra-værdien. Denne er således skrevet med farven grøn, orange eller rød. I Tabel 4 er vist forklaringen til farvekodningen. Generelt er farvekoden lavet sådan, at grønt markerer eftertragtede værdier, orange, værdier der ligger på grænsen mens værdier markeret med rød markerer værdier som normalt ikke betragtes som eftertragtede.

Tabel 4 Farvekodning af Ra-værdier for farvegengivelse i LED positivlisten.

Ra-værdi	Farve	Vurdering
>= 80	Grøn	Acceptabel ifølge EU QC
80 - 65	Orange	Tæt på acceptabel
< 65	Rød	Uacceptabel

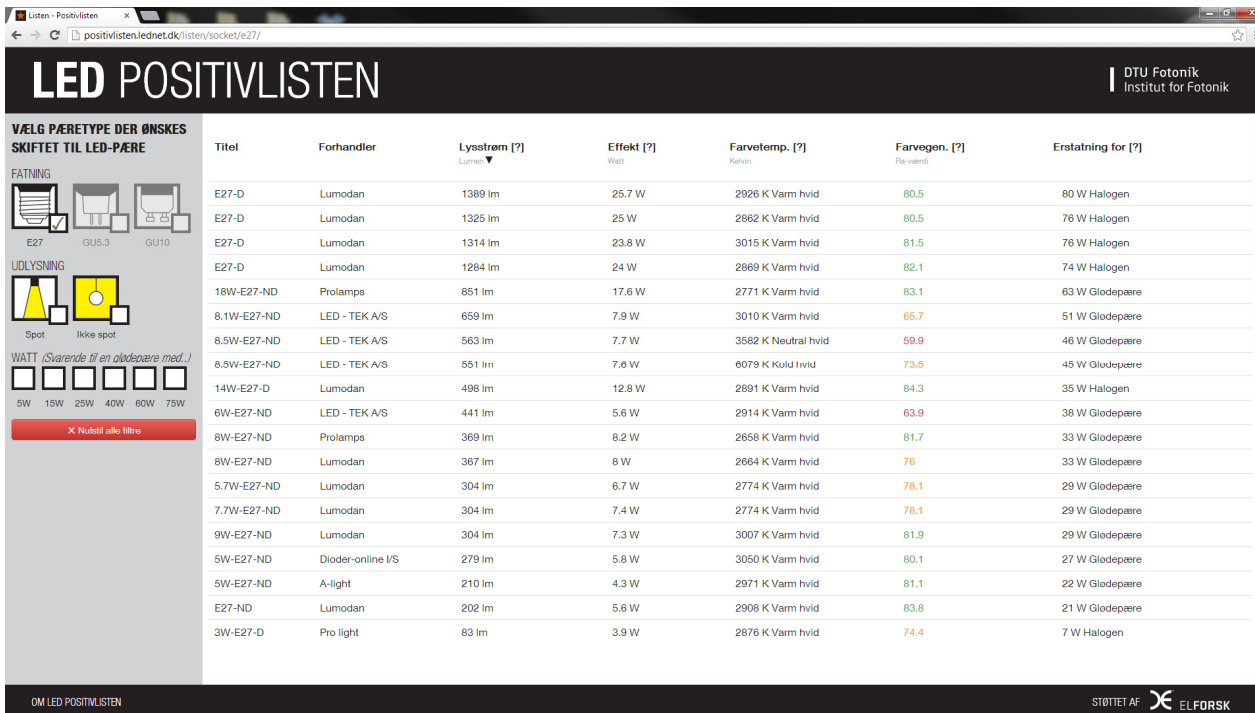
Tabel 5 Beskrivelse af farvetemperatur med farvetone i forhold til dennes værdi.

Farvetemperatur	Farvetone
< 3500 K	Varm hvid
3500 – 5000 K	Neutral hvid
> 5000 K	Kold hvid

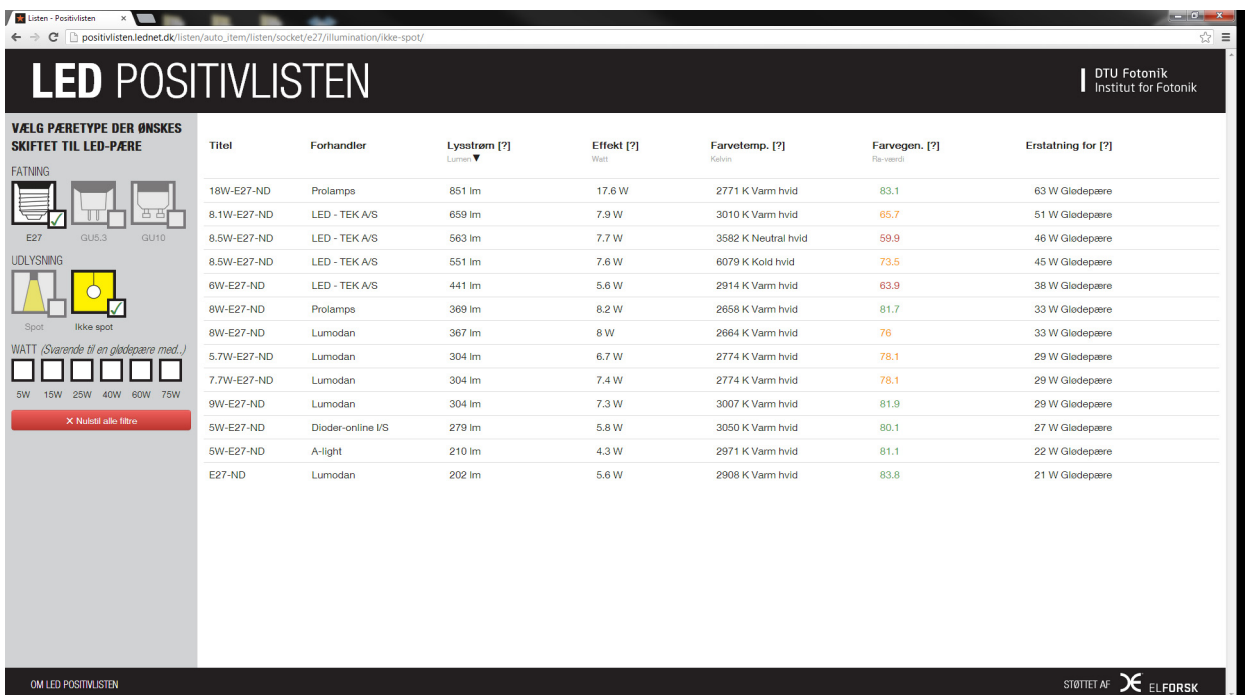


Figur 2 LED Positivlisten som den vises når man åbner hjemmesiden: <http://positivlisten.lednet.dk/>.

Yderst i venstre side, under overskriften "Vælg pæretype der ønskes skiftet til LED-pære" er en række pictogrammer som hjælper ved søgning. Man kan her vælge at få vist lyskilder med tre forskellige fatningstyper; E27, GU5.3 og GU10. Ved at klikke på E27 pictogrammet kommer der et grønt flueben og listen opdateres med de lyskilder, som har denne fatningstype. Dette er i alt 19 lyskilder, se Figur 3. Det er også muligt at søge på udlysningen; om det er en spot eller ikke-spot lyskilde. Vælger man nu ikke-spot, som vist på Figur 4, indeholder listen nu kun de 13 lyskilder med E27 fatning og som er betegnet ikke-spot lyskilder.



Figur 3 LED positivlisten opdateret efter valg af fatningstype til E27.



Figur 4 LED positivlisten opdateret efter valg af fatningstype til E27 og valg af udlysning til ikke-spot.

Som den sidste sorteringsmulighed kan der vælges antal Watt, som er det antal watt som en tilsvarende glødepære skulle have. Så ved at vælge f.eks. 40 W vil man få en vurdering af lysstrømmen fra lyskilderne i forhold til en 40 W glødepære. Dette er vist på Figur 5, hvor farvekodningen nu viser lyskildernes lysstrøm i forhold til den valgte erstatningswattage. Ifølge tabel 6 i ref. 6, kræves det, at en LED pære udsender min. 470 lm for at kunne betegnes som at kunne erstatte en 40 W glødepære. Alle lyskilder der udsender mere

end de 470 lm er skrevet med grønt og er ok i forhold til at levere høj nok lysstrøm til at kunne betegnes som en 40 W erstatning. Hvis lysstrømmen er over 60 % af de 470 lm anses lyskilden som acceptabel og lysstrømsværdien skrives med orange. Er den mindre end dette, er det ikke godt og den skrives med rødt.

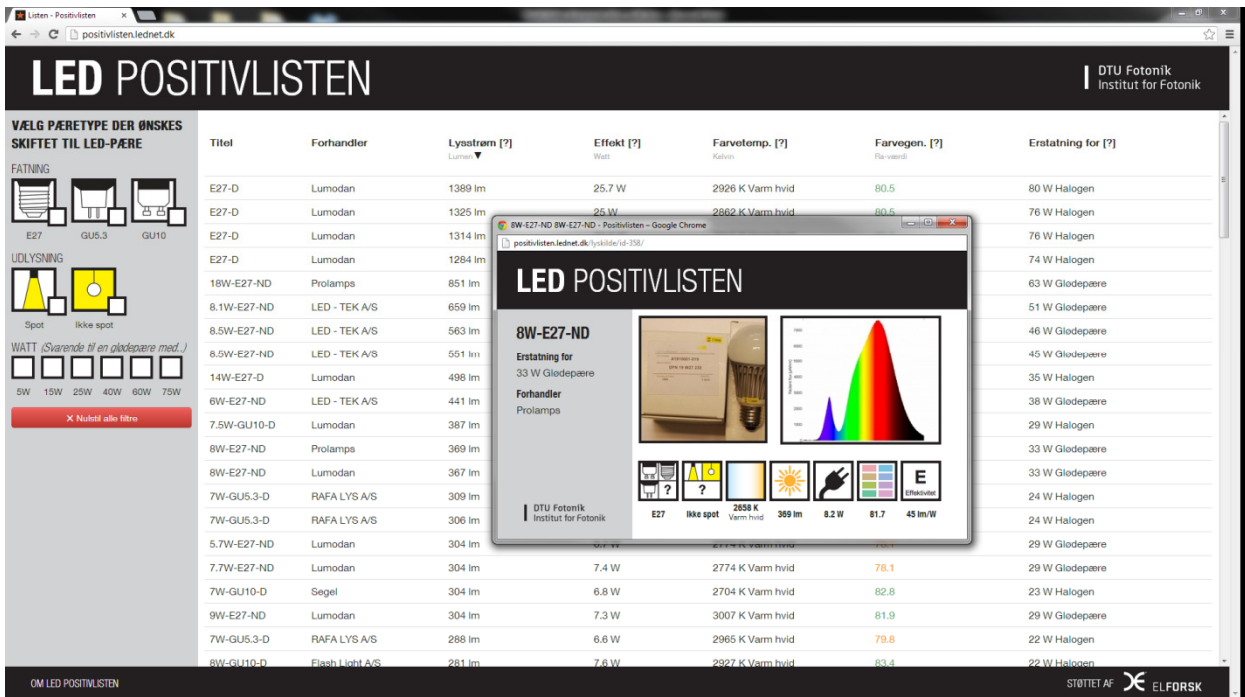
For at ændre på søgevalg er det nødvendigt at nulstille valg ved at klikke på den røde knap for at nulstille alle filtre.

The screenshot shows the 'LED POSITIVLISTEN' website interface. On the left, there are filter options: 'FATNING' (E27, GU5.3, GU10) with E27 selected, 'UDLYSNING' (Spot, Ikke spot) with Ikke spot selected, and 'WATT (Svarende til en glødepære med...)' (5W, 15W, 25W, 40W, 60W, 75W) with 40W selected. A red button below the filters says 'Nulstil alle filtre'. The main table lists LED products with columns for Title, Retailer, Light Flux, Power, Color Temp., Color Rendering Index, and Replacement. The table data is as follows:

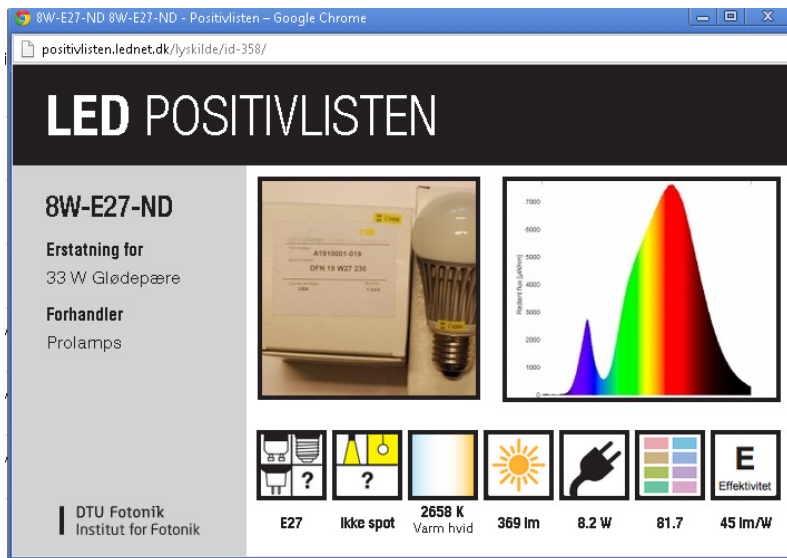
Titel	Forhandler	Lysstrøm [?] Lumen	Effekt [?] Watt	Farvetemp. [?] Kelvin	Farvegen. [?] Ra-værdi	Erstatning for [?]
8.1W-E27-ND	LED - TEK A/S	659 lm	7.9 W	3010 K Varm hvid	65.7	51 W Glødepære
8.5W-E27-ND	LED - TEK A/S	563 lm	7.7 W	3582 K Neutral hvid	59.9	46 W Glødepære
8.5W-E27-ND	LED - TEK A/S	551 lm	7.6 W	6079 K Kold hvid	73.5	45 W Glødepære
6W-E27-ND	LED - TEK A/S	441 lm	5.6 W	2914 K Varm hvid	63.9	38 W Glødepære
8W-E27-ND	Prolamps	369 lm	8.2 W	2658 K Varm hvid	81.7	33 W Glødepære
8W-E27-ND	Lumodan	367 lm	8 W	2664 K Varm hvid	76	33 W Glødepære
5.7W-E27-ND	Lumodan	304 lm	6.7 W	2774 K Varm hvid	78.1	29 W Glødepære
7.7W-E27-ND	Lumodan	304 lm	7.4 W	2774 K Varm hvid	78.1	29 W Glødepære
9W-E27-ND	Lumodan	304 lm	7.3 W	3007 K Varm hvid	81.9	29 W Glødepære
5W-E27-ND	Dioder-online I/S	279 lm	5.8 W	3050 K Varm hvid	80.1	27 W Glødepære

Figur 5 LED Positivlisten efter valg af E27 fatning, ikke-spot lyskilder og 40 W.

På ethvert tidspunkt er det muligt at få flere oplysninger frem om de enkelte lyskilder. Dette gøres simpelt ved at klikke på et sted på linjen i listen for den pågældende lyskilde. Dette er vist på Figur 6 og, hvor der således fremkommer et mindre vindue med en række oplysninger om lyskilden. Yderst til venstre vises lyskildens titel, erstatningswattage og forhandler. Der vises et foto af lyskilden og evt. dens pakning og til højre vises den målte spektralfordeling af lyset. Denne graf er farvelagt med de til bølgelængderne svarende (tilnærmede) farver. På den nederste linje er pictogrammer for en række parametre vist og lyskildens tilhørende parameterværdi er vist lige under pictogrammet. Parametrene er hhv. fatningstype, udlysningstype, farvetemperatur, lysstrøm, effektforbrug, Ra-indeks og effektivitet beregnet efter lysstrøm og effektforbrug.



Figur 6 LED positivlisten ved valg af yderligere oplysninger for en af lyskilderne.



Figur 7 Vindue med yderligere information om lyskilde i LED Positivlisten.

Testmålinger på LED produkter

I dette og de følgende afsnit beskrives kort den benyttede målemetode og en række af de resultater, der er opnået mht. lysstrøm, effektivitet, farveparametre, og disse sættes i relation til de krav, der stilles i EU's quality charter¹. Derudover vil resultaterne af en langtidstest af en stor gruppe af lyskilderne blive vist.

Målemetode

De tekniske lysmålinger er udført i DTU Fotoniks LED LYS Laboratorium. Målingerne følger de retningslinjer, der er beskrevet i LM-79-08⁷ og i den nye testmetode⁸, som i løbet af projektperioden er opbygget i

ekspertgruppen under IEA's SSL Annex. Laboratoriet har dog ikke temperaturkontrol og er ikke akkrediteret. Der arbejdes på at udbedre disse forhold, og det ventes, at nye laboratorier hos DTU Fotonik vil kunne leve op til alle krav i første halvår af 2013.

Der er benyttet en måleopstilling bestående af en integrerende kugle og et spektrometer. Kuglen har en diameter på 1m, der gør det muligt at måle på disse mindre lyskilder med største dimensioner på $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$. Spektrometer er fra Ocean Optics (QE65000), hvor detektorarrayet er kølet til -10°C for at sikre, at den termiske støj i lyssensoren bliver minimeret. Hele systemet er kalibreret med en kendt lyskilde, hvor den totale spektrale flux er kendt, dvs. hvor mange Watt, der udsendes ved hver bølgelængde over det synlige område, 360-830 nm. Den benyttede spektrale totalflux standardlampe er en halogenlampe, CSFS-600, fra LabSphere. Herudover er det nødvendigt at korrigere for absorptionsforskelle i den integrerende kugle, da de undersøgte LED lyskilder ikke er magen til kalibreringslyskilden. Med hjælp af en ekstra lampe i kuglen, bliver der korrigeret for det lys, som LED lyskilden absorberer ved at være placeret inde i midten af kuglen i forhold til, hvad kalibreringslampen absorberer. Lyskilderne er målt med fatningen nedad i måleopstillingen.

Et vigtigt forhold ved målinger på LED lyskilder er opvarmningen og stabiliteten af lysudsendelsen. Produkterne får lov til at stå tændt indtil det opnår en stabil tilstand. Dette er opnået, når lysstrømmen og effektforbruget, som målt, ikke varierer mere end 0,5 % over et tidsvindue på 30 minutter. Når produktet er stabilt, bliver dets spektralfordeling målt og gemt. Efter korrektion for absorptionsforhold bliver de radiometriske og kolorimetriske værdier beregnet ved hjælp af egenproduceret software programmeret i Matlab. Effektforbruget er blevet målt med en power analyser, PM1000+ Power Analyser fra Voltech.

Denne totaludstrålingsmåling er foretaget ved 0 timers drift af alle lyskilder. De har således ikke været brændt ind, som man gør det med sparepærer. De lyskilder, der har været til langtidstests, er yderligere blevet målt ved henholdsvis 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 og 6000 og omkring 10.000 timer brændetid. Lyskilderne er placeret i et specialudviklet rackskab, hvor de har stået tændt i et lokale med en rumtemperatur på 25°C . 230 V lyskilderne har været tilsluttet netstrømmen direkte, hvilket har givet en variation imellem 230-240 V, imens de har stået tændt. Lyskilderne har været placeret med fatningerne hhv. op og ned for at simulere de situationer de vil kunne blive anvendt i, under realistiske omstændigheder. Dog har de været placeret i fri luft, hvilket har gjort, at luften har kunne strømme frit rundt omkring pærene. Når produkterne har været tændt i de valgte brændetider, er de blevet målt efter samme testprocedure som nævnt ovenfor. I de følgende afsnit vises en række af resultaterne fra målingerne.

Variationer på lyskilder

Som nævnt i det foregående er der målt på 1-5 enheder af den samme lyskilde for at få et billede af variationen på disse. Et antal enheder af samme lyskildetype kaldes en serie. I Tabel 6 og Tabel 7 er vist middelværdier og standardafvigelser for de målte værdier af effektforbruget, farvetemperatur, farvegengivelse og lysstrømmen for henholdsvis retningsbestemte og ikke retningsbestemte LED lyskilder. I tabellerne er angivet, hvor mange enheder, der er i hver serie. Hvis man kigger på effektforbruget for både de retningsbestemte og ikke retningsbestemte lyskilder, ses det, at variationen er ret lille. For langt de fleste ligger standardafvigelse på 0.1 W for effektforbruget. Der er kun to retningsbestemte serier, hvor variationen ligger over 10% nemlig serie 8 og 13.

Tabel 6 Middelværdier og standardafvigelser for effektforbruget-, farvetemperatur-, farvegengivelse- og lysstrømmen for de forskellige serier af retningsbestemte LED-lyskilder målt

Serie	Effekt forbrug [W]	Farvetemperatur [K]	Farvegengivelses indeks [Ra]	Lysstrøm [lm]
Serie 1, 4 pærer	3,7 ± 0,1 W	3046 ± 15 K	79,4 ± 0,5	160,7 ± 4 lm
Serie 2, 3 pærer	3,9 ± 0,1 W	3007 ± 51 K	81,3 ± 0,1	129,6 ± 1 lm
Serie 3, 3 pærer	3,7 ± 0 W	2969 ± 18 K	80,0 ± 0,6	151,4 ± 9 lm
Serie 4, 3 pærer	3,1 ± 0 W	2661 ± 88 K	91,1 ± 0,9	173,8 ± 6 lm
Serie 5, 3 pærer	3,9 ± 0,1 W	2735 ± 69 K	72,9 ± 0,7	137,0 ± 6 lm
Serie 6, 6 pærer	3,7 ± 0,1 W	2778 ± 22 K	81,9 ± 0,8	170,7 ± 3 lm
Serie 7, 6 pærer	3,5 ± 0,1 W	2736 ± 33 K	83,2 ± 0,8	144,9 ± 4 lm
Serie 8, 6 pærer	4,9 ± 0,6 W	2732 ± 5 K	82,2 ± 0,5	202,4 ± 27 lm
Serie 9, 6 pærer	3,2 ± 0,1 W	2725 ± 18 K	83 ± 0,3	153,3 ± 4 lm
Serie 11, 6 pærer	2,7 ± 0,1 W	2737 ± 22 K	82,5 ± 0,3	150,6 ± 5 lm
Serie 12, 6 pærer	2,8 ± 0,1 W	2739 ± 11 K	82,7 ± 0,2	154,5 ± 4 lm
Serie 13, 3 pærer	1,9 ± 0,3 W	2813 ± 15 K	87,3 ± 0,2	88,55 ± 6 lm
Serie 14, 5 pærer	5,5 ± 0,1 W	2711 ± 5 K	89 ± 0,3	247,1 ± 7 lm

Tabel 7 Middelværdier og standardafvigelser for Effektforbruget-, farvetemperatur-, farvegengivelses- og lysstrømmen for de forskellige serier af ikke retningsbestemte LED-lyskilder målt.

Serie	Effekt forbrug [W]	Farvetemperatur [K]	Farvegengivelses indeks [Ra]	Lysstrøm [lm]
Serie 10, 4 pærer	5,9 ± 0,2 W	3035 ± 19 K	79,7 ± 0,7	281,7 ± 5 lm
Serie 15, 5 pærer	8,2 ± 0 W	2650 ± 16 K	81,7 ± 0,2	366,6 ± 5 lm
Serie 16, 4 pærer	18 ± 0,1 W	2763 ± 26 K	83,3 ± 0,5	863,5 ± 15 lm

Variationen på Ra-indekset er også meget lille. Her ligger den på omkring 1 % for samtlige af lyskilderne. Hvis man ser på farvetemperaturen ses det, at samtlige af de målte serier har en farvetemperatur defineret som varmhvid (definitionen for varmhvidt lys er 2700-3500K). Disse lyskilders farve passer godt til at erstatte glødepærer og halogenspots, hvis farvetemperatur også ligger inden for dette spænd. Standardafvigelsen for farvetemperaturen varierer lidt for de forskellige serier. Dette er kun et problem, hvis denne ændring i farvetemperature er større end, hvad mennesker netop kan opfatte. Hvis man holder sig under denne grænse, er det ikke et problem. Denne grænse varierer dog med farvetemperaturen og den mindst mærkbare forskel, mennesker kan opfatte, er blevet fundet til⁹:

$$\Delta CCT = 6.0e^{-7} \cdot CCT^{2.231}$$

Hvis der tages udgangspunkt i denne formel ligger standardafvigelsen for farvetemperaturen under denne grænse i alle serierne på nær i serie 2, 4, 5 og 7. Grænsen for, hvornår mennesker finder forskellen "forstyrrende", er givet ved:

$$\Delta CCT = 1.6e^{-6} \cdot CCT^{2.309}$$

Hvis denne grænse bliver anvendt, er der ingen af serierne, hvor mennesker virkelig vil kunne se stor forskel på farven af lyset fra enhederne i serierne af lyskilder. Mennesker vil ikke, ved at kigge ind i en lyskilde med det blotte øje se, hvilken af dem, der lyser mest. Dette vil kun kunne ses ved at kigge på det reflekterede

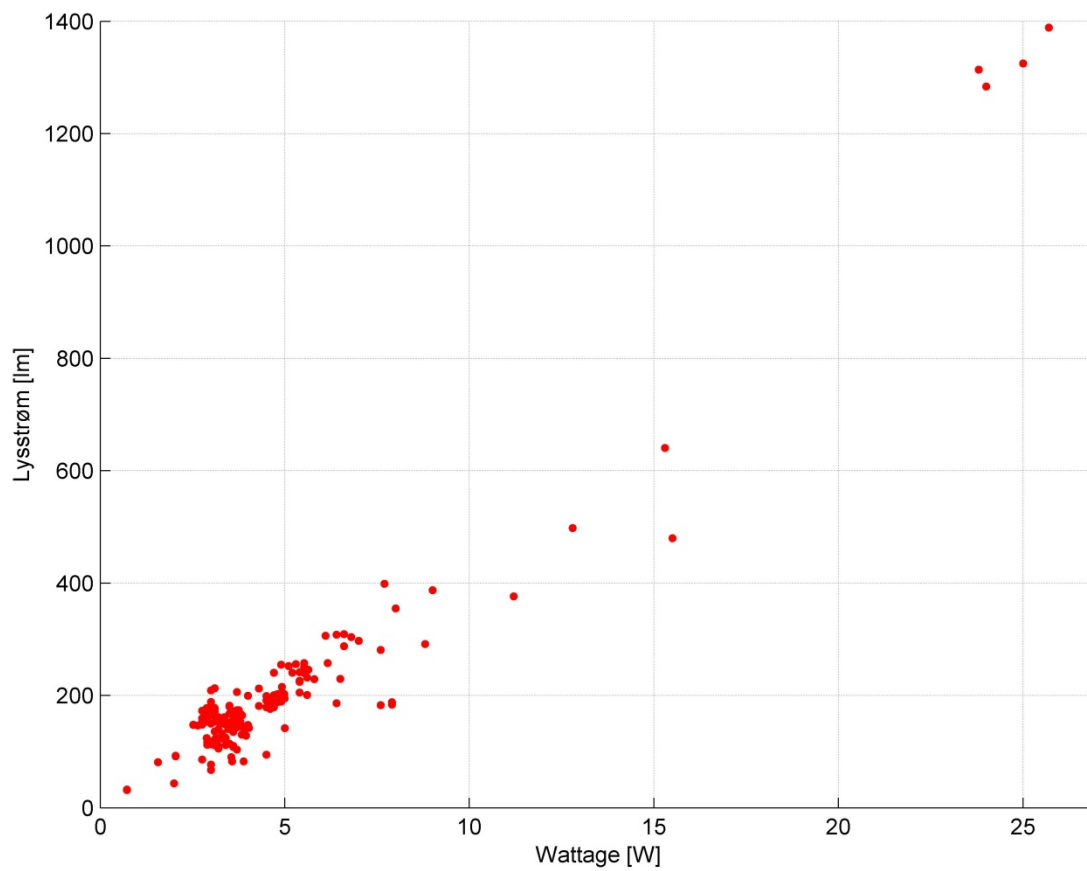
lys, der opnås, når lyskilden oplyser en flade, altså luminansen. Dette har vi dog ikke målt, men hvis man ved de forskellige serier antager, at deres udstrålingsprofil er den samme, og de holdes i samme afstand fra en hvid flade, kan man antage, at luminansen er proportional til lysstrømmen af lyskilderne. Under disse antagelser er den mindst mærkbare forskel mennesker kan detektere¹⁰:

$$\frac{\Delta L}{L} = JDN = 0.01$$

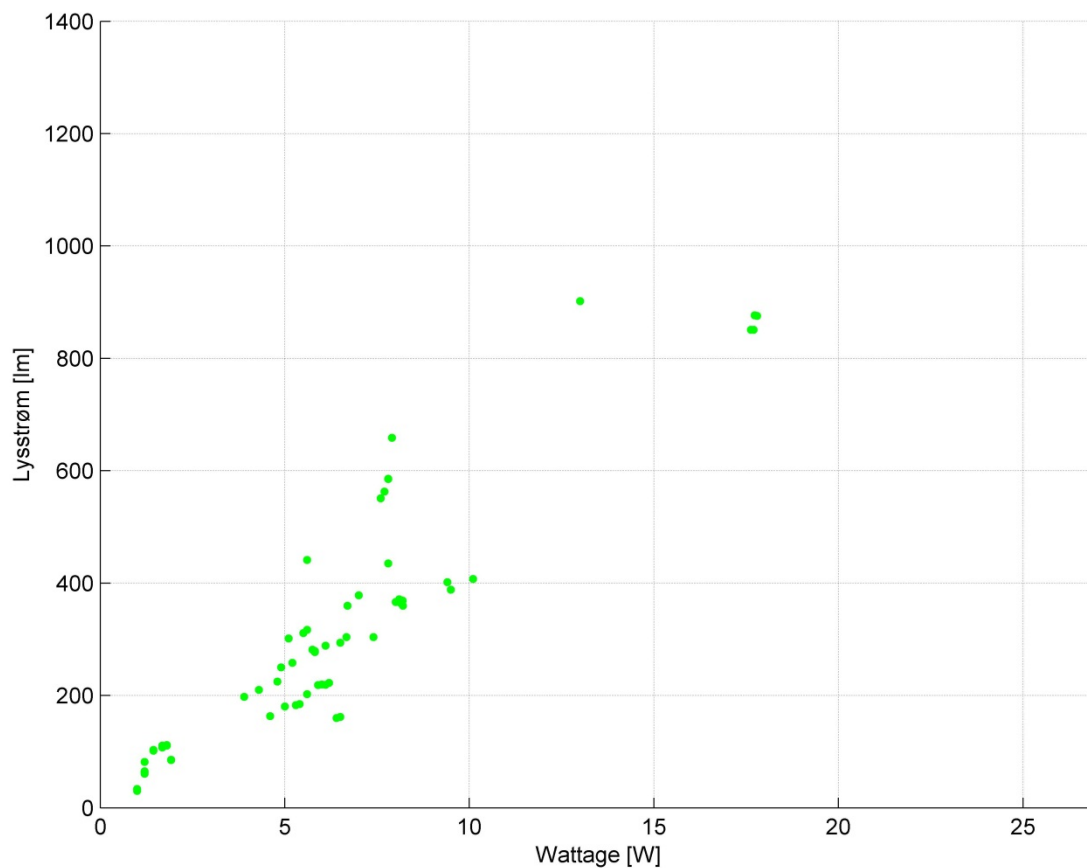
Her svare ΔL til luminansforskellen imellem de to lyskilder, man sammenligner med hinanden, og L er den oprindelige af lyskilderne. Dette svarer til, at hvis lyskilderne varierer med 1 % i lysstrøm, så vil mennesker kunne opfange det. Der findes nogen diskussion omkring denne grænse. Der er en tendens til, at lyskilder med høj intensitet har en højere grænse end lyskilder med lav intensitet. Dog nævnes der ikke, hvad der bliver betragtet som værende høj intensitet. Hvis denne grænse anvendes, vil kun serie 2 ligge inden for denne grænse. De resterende lyskilders lysstrøm varierer med mere end 1 %. De resterende lyskilders lysstrøm varierer med 1.7 – 13 %, hvor de fleste ligger i den lavere ende. Når dette så er sagt, er det sjældent, at lyskilderne oplyser en flade lige ved siden af hinanden. Ofte er de lokaliseret væk fra hinanden og ofte oplyser de forskellige objekter. Dette vil gøre det svært i praktiske situationer at se forskel på mængden af lys fra lyskilderne, med mindre forskellen bliver meget stor.

Lysstrøm

I det følgende ses på lysstrømmen eller mængden af synligt lys, som LED lyskilderne udsender. Når man kigger på lysstrømmen for retningsbestemte LED lyskilder generelt, Figur 8, ses det, at der eksisterer et forholds tilnærmelsesvist lineært forhold imellem den wattage, lyskilderne bruger og den mængde lys de udsender, svarende til en effektivitet på 40-50 lm/W, som det også ses på Figur 10. Figur 9 viser lysstrømmen som funktion af effektforbrug for ikke retningsbestemte lyskilder. Heraf ses det, at der er enkelte af produkterne, som udsender over 800 lm, hvilket er nødvendigt, hvis de skal kunne udgøre erstatning for en traditionel 60 W glødepære. En af de større milestones for LED erstatningsprodukter har været at udsende samme mængde lys som en 60 W glødepære og holde de samme dimensioner. Men hovedparten af de her målte LED lyskilder udsender mindre end 600 lm.



Figur 8 Lysstrømmen som en funktion af effekten for retningsbestemte LED-lyskilder



Figur 9 Målt lysstrøm som funktion af målt effektforbrug for ikke retnings bestemte LED-lyskilder

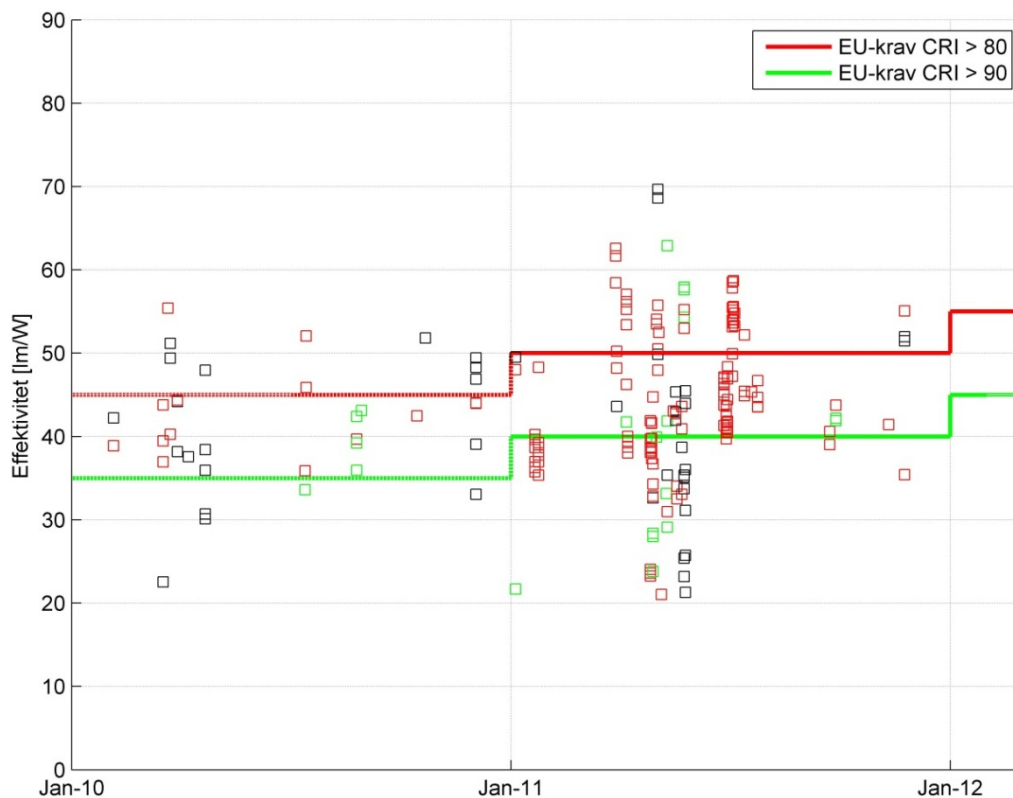
Effektivitet

Her vil de målte effektiviteter for alle lyskilderne blive sat i relation til de krav, der stilles i EU's quality charter¹. Disse er progressive med stigende krav til effektivitet med tiden, ud fra en forventning om, at LED teknologien vil bringe en stigende effektivitet over de kommende år. Der er differentieret i effektivitetskravene efter lyskildernes farvegengivelsesegenskaber. Generelt er der et krav om, at Ra-indekset skal være over 80 og der er et tilhørende effektivitetskrav. Men hvis Ra-indekset er over 90, svarende til en meget god farvegengivelse, er effektivitetskravet lidt mindre.

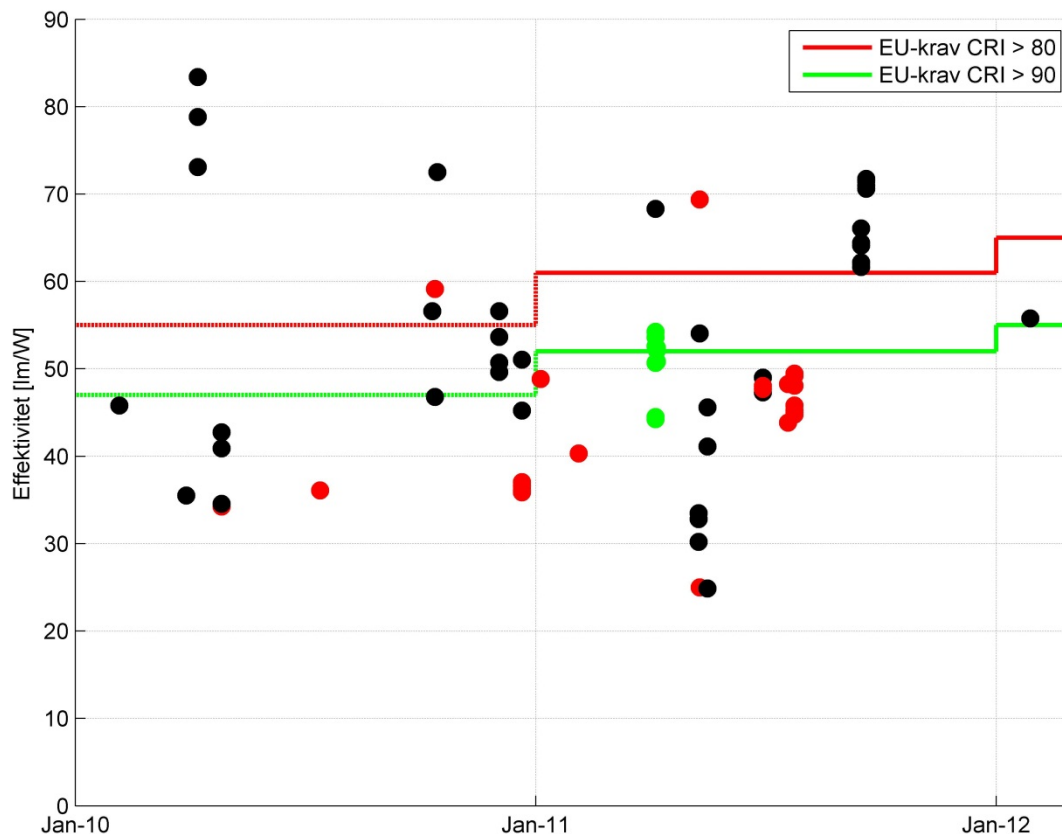
Figur 10 viser den målte effektivitet for retningsbestemte LED lyskilder, som funktion af det tidspunkt de er blevet målt på og Figur 11 viser tilsvarende for de ikke retningsbestemte. Det er altså ikke fabrications året / måneden, så det kan godt tænkes at nogle af lyskilde effektiviteterne på figuren stammer fra lyskilder af en ældre dato i forhold til hvornår de er blevet målt. De lyskilder vores samarbejdspartnere supplerede os i projektet var af nyere dato. De grønne og røde kurver på figuren viser de effektivitetskrav som LED lyskilder skal overholde for at blive leve op til EU's Quality charter¹, hvis deres Ra-indeks er henholdsvis over 90 og 80. Følgende farvekodning vil blive anvendt igennem rapporten:

- Sorte punkter repræsenterer LED lyskilder med et Ra-indeks under 80.
- Røde punkter repræsenterer LED lyskilder med et Ra-indeks imellem 80 og 90.
- Grønne punkter repræsenterer LED lyskilder med et Ra-indeks over 90.

Hvis man ser på figurerne, ses det, at effektiviteten stiger med tiden især for lyskilder med Ra-værdier over 80. Det ses endvidere, at en stor del af produkterne ikke ville kunne leve op til de krav, der stilles. Hvis man kigger på samtlige produkter som en helhed, vil kun 48 ud af 194 af de retningsbestemte lyskilder leve op til kravene og 6 ud af 76 af de ikke retningsbestemte lyskilder. Grunden til at så få ikke retningsbestemte lever op til kravene kan findes i, at der var mange lyskilder med Ra-indeks under 80 og, at effektivitetskravene er højere for ikke retningsbestemte lyskilder end for retningsbestemte. Dette skyldes, at ikke retningsbestemte lyskilder, ud over at skulle erstatte glødepæren, også skal kunne erstatte en sparepære, der i forvejen har en høj effektivitet. Effektiviteten for de ikke retningsbestemte LED produkter er alle væsentlig højere end glødepærens 10-12 lm/W, men det er ikke alle, der kan hamle op med sparepærens høje effektivitet, 50-80 lm/W.



Figur 10 Målt effektivitet for retningsbestemte LED-lyskilder sat i relation til EU's quality charter-krav. Linierne for 2010 er tilbageskrevne værdier, som ikke indgår i kravene. Sorte firkanter er for lyskilder med $R_a < 80$, røde for $80 < R_a < 90$ og grønne for $R_a > 90$.

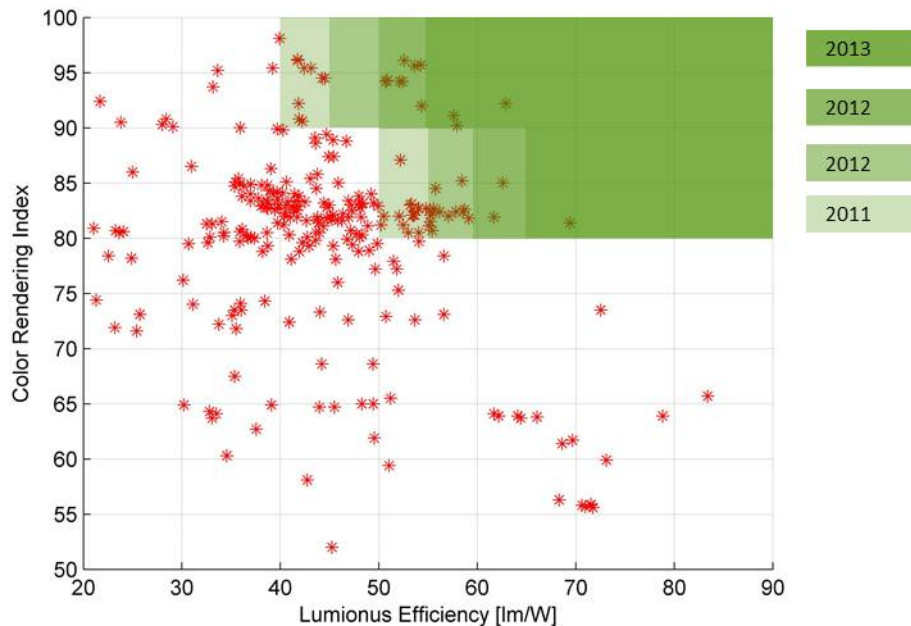


Figur 11 Målt effektivitet for ikke retningsbestemte LED-lyskilder sat i relation til EU's quality charter-krav. Linjerne for 2010 er tilbageskrevne værdier, som ikke indgår i kravene. Sorte punkter er for lyskilder med $R_a < 80$, røde for $80 < R_a < 90$ og grønne for $R_a > 90$.

Som det ses på figuren, er der umiddelbart ingen sammenhæng imellem et produkts R_a -indeks og dets effektivitet, imellem de her testede produkter. I teorien burde det være sådan, at lyskilder med en lav R_a -værdi burde have en højere effektivitet end lyskilder med en høj R_a -værdi. Når der snakkes om effektivitet for LED produkter, er det ikke bare for LED chippen i sig selv, det afhænger af, men det samlede LED produkt. Her er der flere faktorer, der spiller ind, når en høj effektivitet skal opnås. Der i blandt, hvor effektiv optikken, der er blevet anvendt til pæren, er. Blot en lille mismatch imellem optik og LED chip kan være udslagsgivende for, at meget af lyset gå tabt grundet interne refleksioner. Derudover er det et stort problem for LED produkter, hvis de ikke kan komme af med den varme de producerer. Jo varmere en LED er, jo mindre lys udsender denne. Ydermere har LEDernes temperatur en stor betydning for deres levetid. Hvis temperaturen bliver for høj, vil deres levetid blive drastisk nedsat. Slutteligt kan nævnes elektronikken i LED produktet. Hvis denne er for ineffektiv eller bruger for meget effekt, har det også en betydning for LED produktets samlede effekt.

På Figur 12 er lavet en oversigt over, hvorledes egenskaberne for R_a -indeks og effektivitet for de retningsbestemte LED lyskilder lever op til EU's quality charters krav. Disse krav, som skærpes med årene, er indikeret ved de grønne områder, hvor forskellige nuancer svarer til de forskellige år. Her er det klart, at

de LED lyskilder, der er målt i 2010 og 2011, ikke lever op til de stillede krav til effektivitet. En stor del lever op til kravene om Ra-indeks over 80.

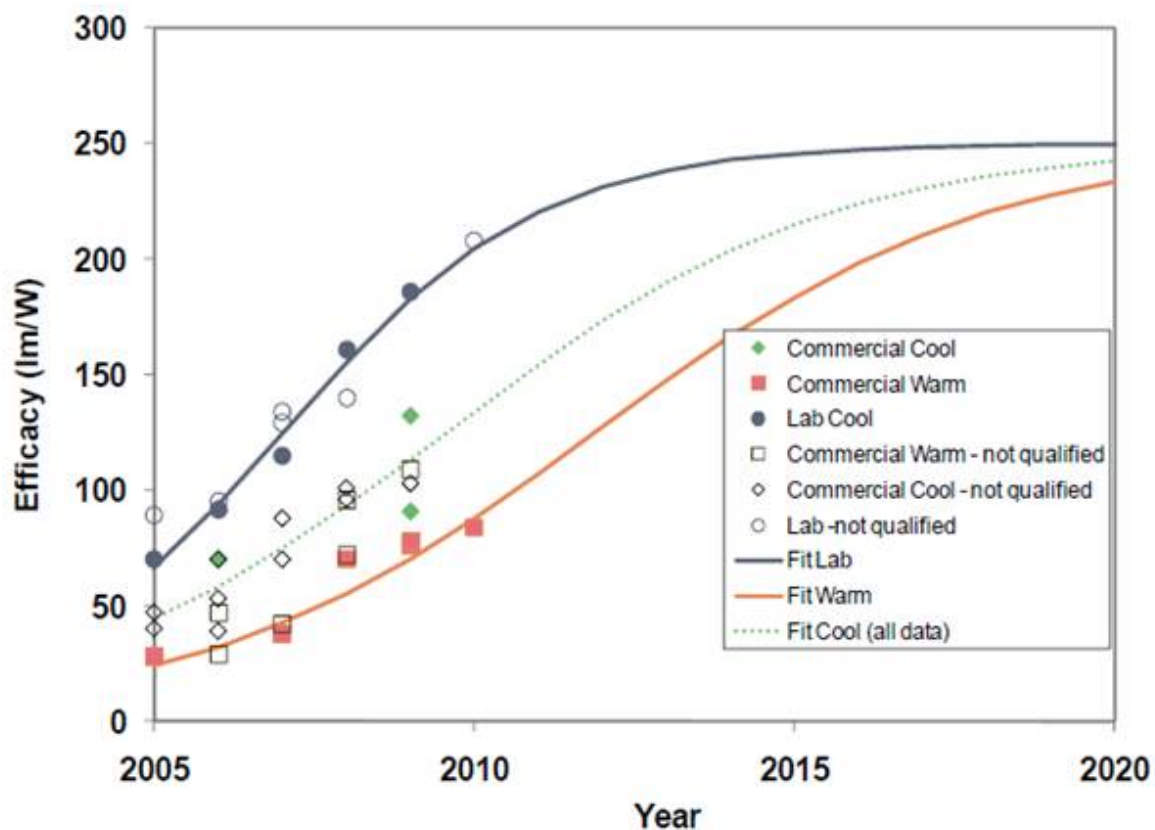


Figur 12 Sammenhæng imellem målt farvegengivelse ved Ra-indeks og effektivitet for retningsbestemte LED lyskilderne. De grønne områder indikerer de krav, der stilles i EU's Quality charter.

Det amerikanske energiministerium (DOE) kom i 2010 med projekteringer for LED produkters effektivitet som funktion af tid. Som det kan ses i Figur 13 er effektiviteterne af LED produkterne, ligesom med EU's-krav, afhængige af produktets farvegengivelsesindeks. Jo lavere Ra-indeks, jo højere forventet effektivitet. Forventningerne tager ikke højde for, om LED produktet er retningsbestemt eller ikke retningsbestemt, men giver alle samme effektivitetsforventning. Det ses på figuren, at kun enkelte produkter lever op til de forventninger, som ministeriet har givet. Hvis man sammenholder DOEs projekteringer med de generelle projekteringer for effektiviteten for LED chips, Figur 14, ses det, at DOE forventer et tab i effektivitet på ~45 % fra LEDchip til produkt. I denne beregning antages, at det er en varmhvid diode, der bliver anvendt, da disse typisk har højest Ra-indeks, og at Ra-indekset ligger imellem 76 og 91 svarende til den blå linje i Figur 13 og den orange i Figur 14. Det bør dog nævnes, at effektivitetsforventningerne for LEDchips er baseret på målinger ved 25°C. Det følger naturligt heraf, at der vil være et tab, når LED chippen bliver bygget ind i et produkt, og operationstemperaturen bliver væsentligt højere resulterende i et lavere lysudbytte.



Figur 13 Department of energy's projekteringer for effektiviteten for LED produkter.¹¹



Figur 14 Effektivitetsudviklingen for LED komponenter.

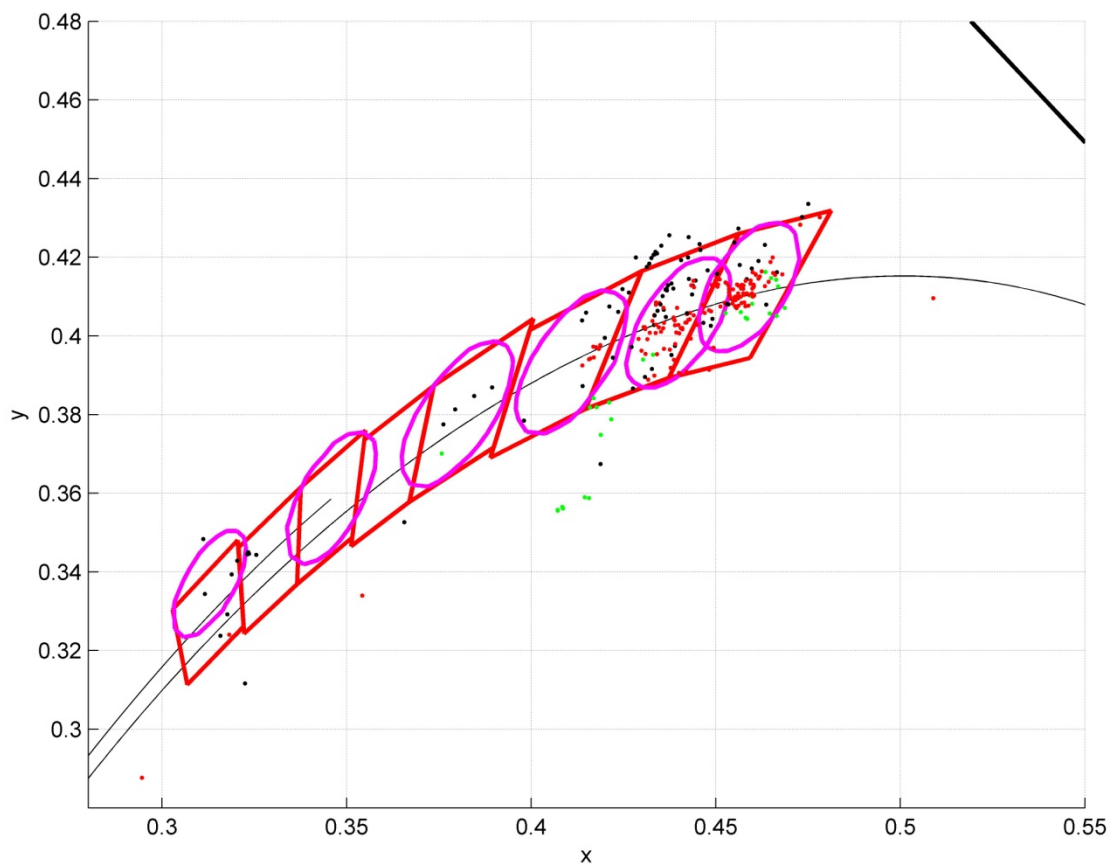
Farvekoordinater & Farvetemperatur

De kromatiske (farve) egenskaber af lyskilderne er beregnet ud fra den målte spektralfordeling. Deres farvekoordinater, efter CIE 1931 2° observer, kan ses på Figur 15. På figuren er indsat en række røde firkanter, som svarer til de grænser, der bliver betragtet som værende hvidt lys ifølge en nordamerikansk standard¹². Hver røde firkant svarer til en farvetemperatur af lyset, hvor den yderst til højre svarer til 2700 K, og den yderst til venstre svarer til 6500 K. De røde firkanter ligger omkring den sorte linje, som er hulrumsstrålerkurven, der viser farvekoordinaterne for lys fra en temperaturstråler¹³. Størrelsen af de røde firkanter er således, at afstanden til hulrumsstrålerkurven er under $5.4 \cdot 10^{-3}$ (regnet i et uv-farvekoordinatsystem). Farvekoordinaterne for lys fra en lyskilde skal således ligge inden for en af de røde firkanter og deres farvetemperatur specificeres herefter. De lilla ellipser er tilsvarende områder, som benyttes til specificering af farvetemperaturområder for lyskilder. EU's quality charter¹ benytter et krav, der siger, at lyskildernes farvekoordinater skal ligge inden for de tre lilla ellipser yderst til højre, svarende til hhv. 2700 K, 3000 K og 3500 K fra højre mod venstre. Altså et krav om, at lyskilderne skal være varmhvide inden for 2700-3500 K.

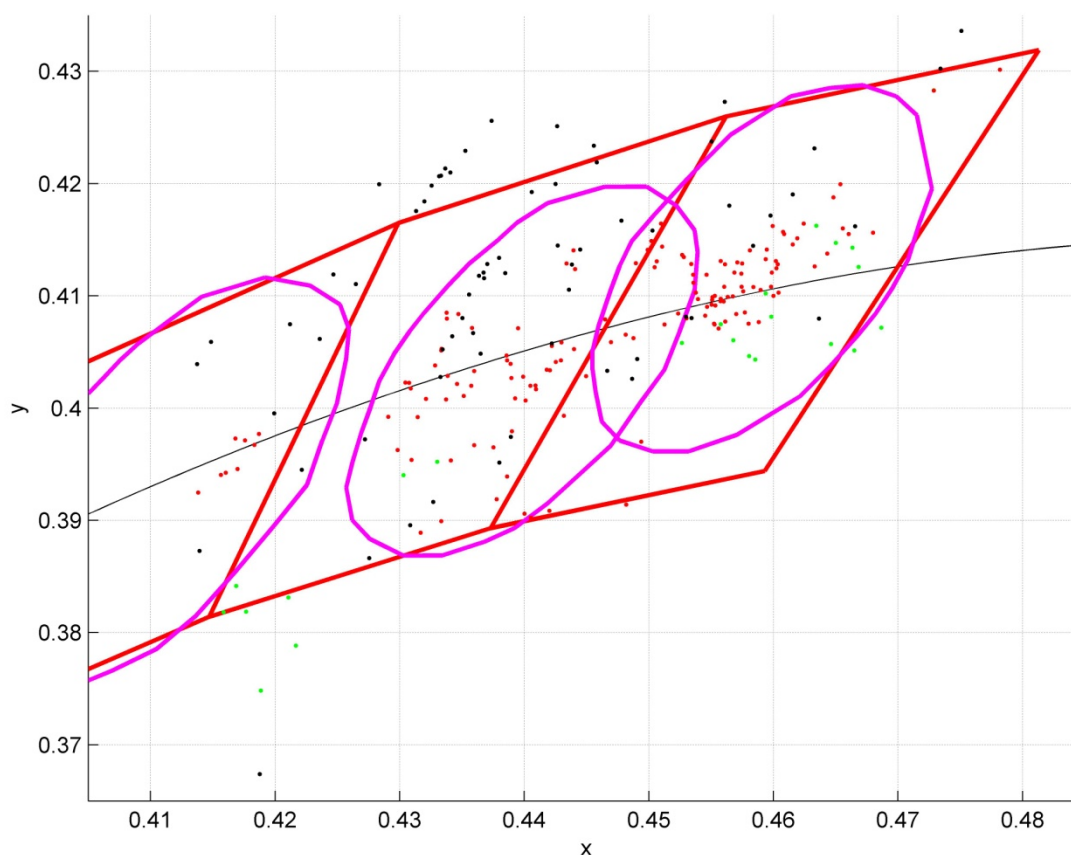
For langt de fleste af de målte LED lyskilder ligger farvekoordinaterne i den varmhvide ende af skalaen. Der er dog en mindre gruppe af lyskilder med farvekoordinater i hhv. 4500 K området og i det koldhvide område svarende til 6500 K. Disse ligger uden for det område som EU' quality charter angiver. Figur 16 viser et forstørret udsnit af Figur 15 med fokus på det varmhvide område. På denne figur ses det, at der er langt flere lyskilder med høj Ra-indeks over 90 i 2700K området end i 3000 og 3500 K området. Med nogle ganske få undtagelser ligger farvekoordinaterne for alle lyskilderne med Ra-indeks imellem 80 og 90 (angivet med

røde prikker) inden for en af de tre lilla ellipser. Det betyder, at de lever op til de krav, der stilles til farvetemperatur i EU's quality charter.

Af de LED lyskilder, der har et Ra-indeks over 90 (grønne prikker), ligger de fleste i 2700 K området inden for den tilsvarende lille ellipse. Nogle ligger i 3000 K området, og en del ligger under dette område. Det betyder, at det hvide lys fra disse lyskilder vil have et rødtligt skær. Der er tilsvarende en del LED lyskilder med Ra-indeks under 80 (sorte prikker), som ligger over 3000 K området, hvilket svarer til, at det hvide lys fra disse vil have et grønligt skær. Som nævnt ligger de fleste af de målte LED lyskilder i den varmhvide ende af skalaen. Dette svarer fint til den farvetemperatur som de traditionelle lyskilder, som de skal ind og erstatte, har.



Figur 15 Farvediagram (CIE 1931 2o observer), med (x,y) -kromatiske koordinater for de målte LED-lyskilder. De lilla ellipser er 7-step MacAdam ellipser. De røde firkanter er farvetemperatursområder på LEDprodukter, fra højre imod venstre: 2700K, 3000K, 3500K, 4000K, 4500K, 5000K, 5700k og 6500K¹².



Figur 16 Forstørret område af farvediagrammet i det varmhvide område af CIE1931-diagrammet, hvor størstedelen af de målte LED-lyskilders farvekoordinater befinder sig. De tre områder afgrænset af hhv. røde firkanter og lilla ellipser svarer til hhv. 2700 K, 3000 K og 3500 K fra højre.

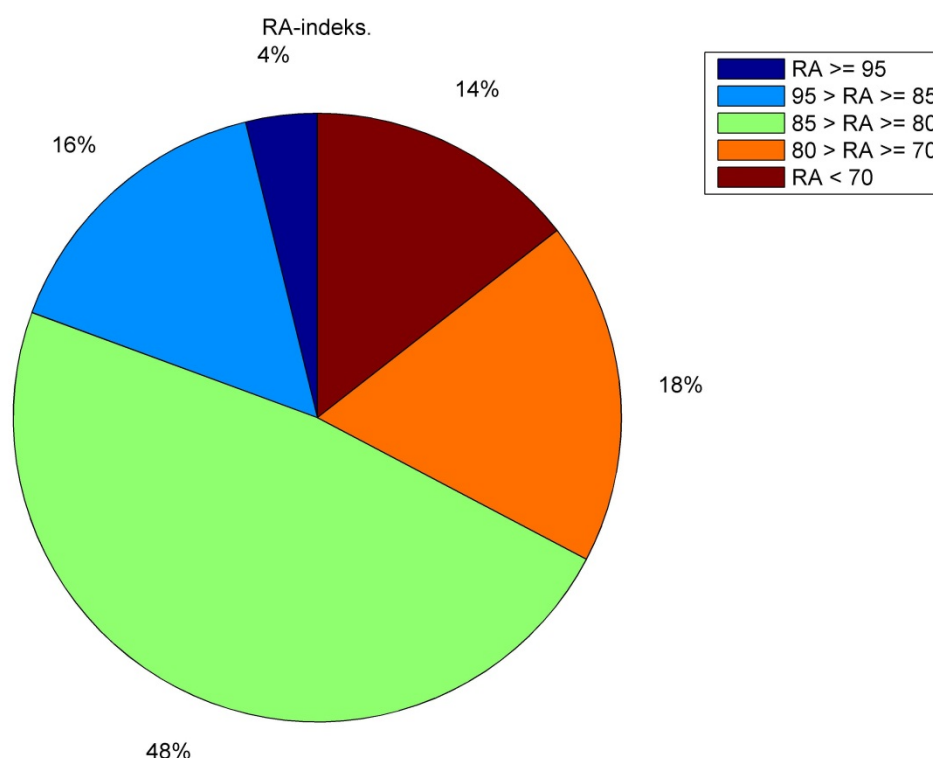
Farvegengivelse

Det er ifølge gældende standard valgt, at specificere LED lyskildernes farvegengivelsesegenskaber med det såkaldte Ra-indeks¹³. Det er blevet vist, at for nogle LED lyskilder giver det en dårlig beskrivelse af farvegengivelsesegenskaberne og er i modstrid med testpersoners præferencer. Undersøgelserne her vil også blive brugt til at evaluere mange af de nye farvegengivelsesparametre, men det ligger uden for denne rapport. Alle de produkter, som er testet i dette projekt, er baseret på hvide LEDer, som er blå LEDer, der via et fosforescerende lag omsætter det blå lys til hvidt lys. For disse menes det, at Ra-indekset giver en god beskrivelse, og i nogle tilfælde kan det være fordelagtigt at benytte sig af de specifikke Ra-indeks for klare farvede objekter. Det er R9, R10 og R11 for hhv. kraftig røde, gule og grønne objekter.

Ra-indekset er et dimensionsløst tal, der beskriver, hvor godt en hvid lyskilde gengiver farver i forhold til en referencelyskilde. Som referencelyskilde bruges enten en hulrumsstråler (temperaturstråler) eller en fase af dagslys. Referencelyskilden skal have samme farvetemperatur som testlyskilden. Udstrålingen fra de traditionelle lyskilder som glødepærer og halogenspots svarer til udstrålingen fra en temperaturstråler og

de har derved næsten per definition en ideel farvegengivelse givet ved et Ra-indeks på 99-100. Normalt anbefales det, at en lyskilde skal have et Ra-indeks på 80 for at kunne blive anvendt til kontorbelysning¹⁴, og det er også det krav, der indgår i EU's quality charter¹.

Farvegengivelsen givet ved det generelle Ra-indeks for de målte LED lyskilder ses inddelt i et lagkagediagram i Figur 17. Her ses det, at 19% af de målte lyskilder har et Ra-indeks over 85, og godt og vel halvdelen ligger med Ra-indeks imellem 80 og 85, hvilket højst sandsynligt skyldes, at produkterne bliver fremstillet og importeret til at kunne leve op til kravene. 2/3-dele af alle produkterne har et Ra-indeks på over 80 og lever op til kravene. Den sidste 1/3-del falder uden for kategori. Disse vil kunne anvendes andre steder, hvor farvegengivelse ikke er af betydning.

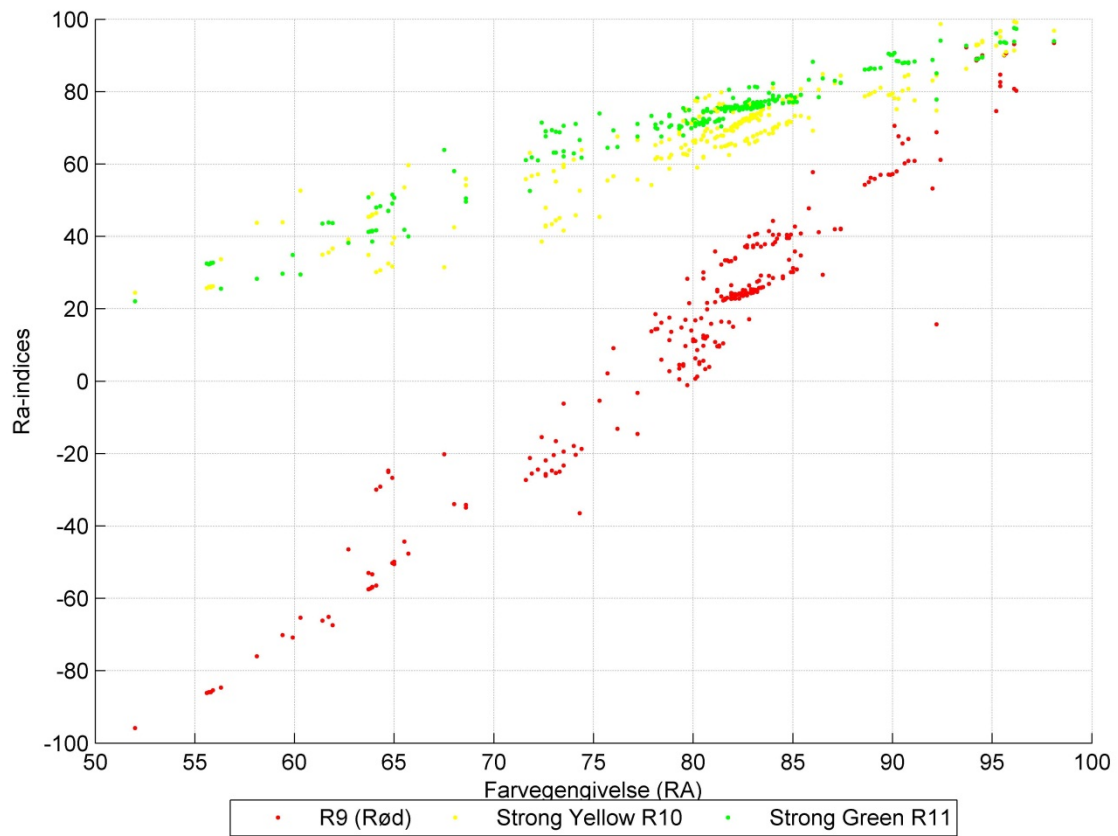


Figur 17 Farvegengivelse for målte lyskilder

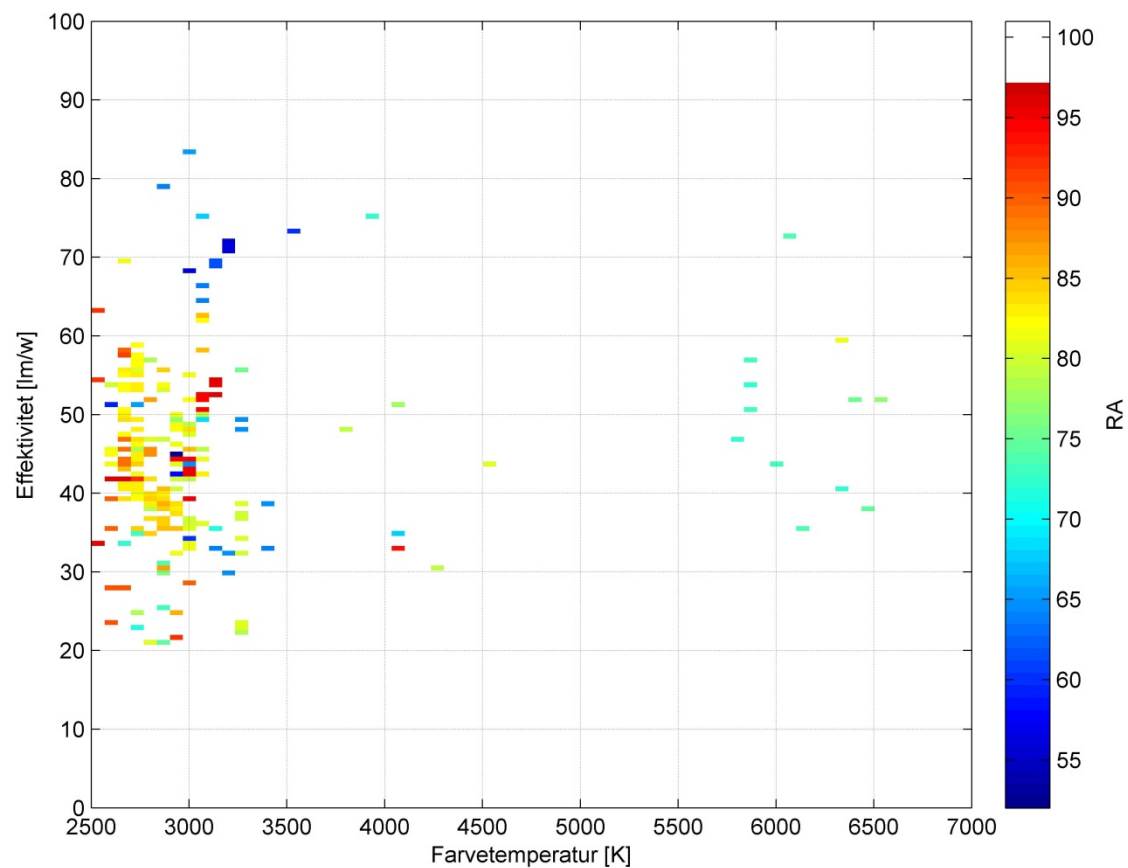
Hvide LED lyskilder, har ofte problemer med at gengive den kraftig røde farve, som indgår i Ra-indeksberegningen som objekt nr. 9. Det tilsvarende specifikke Ra-indeks kaldes R9, og for dette performer LED lyskilder typisk dårligt. I forbindelse med de mange målinger, der er lavet i projektet, har vi forsøgt at finde en sammenhæng imellem R9 og det generelle Ra-indeks for at kunne sige noget om, hvor højt Ra-indekset generelt skulle være, førend at R9 havde en vis størrelse. Resultatet af denne sammenhængsundersøgelse kan ses på Figur 18. De røde punkter viser R9 som funktion af det generelle Ra-indeks, og det ses, at der eksisterer en tilnærmelsesvis lineær sammenhæng for de her målte LED lyskilder. Ud fra de målinger vi har foretaget, ses det, at man som tommelfingerregel kan sige, at Ra-indekset skal være over

75, førend R9 går hen og bliver positiv. Og end ikke dette er sikring nok, da der stadig var produkter med negativ R9 på trods af, at Ra-indekset var over 75. For at R9 skal være over 80, skal det generelle Ra-indeks være over 95. Dette viser, at det er meget sjældent, at R9 er særligt højt, når der kun anvendes hvide dioder i LED-belysningsprodukter. Kun 4 % af de målte LED produkter havde et Ra-indeks over 95. Hvis man til sammenligning kigger på R10 og R11 (kraftig gul og grøn), ses det, at der også eksistere en tilnærmelsesvis lineær sammenhæng imellem hhv. R10 og R11 og det generelle RA-indeks. Ydermere ses det at de, ud fra de målinger vi har foretaget, aldrig er negative. Det grøn-gule område er der, hvor øjet er mest følsomt. For at opnå en høj effektivitet for LEDs, ville producenterne derved kunne optimere deres lysudsendelse fra LEDerne til det område. Til sammenligning er øjet ikke særligt følsomt i det røde spektralområde. Dette kan være en af grundene til, at R9 ofte er meget lav, da der ikke er et ønske om at ofre effektivitet for at opnå en høj farvegengivelse i det røde område.

Figur 19 er et forsøg på en sammenkobling imellem Figur 13 og Figur 15. Her er Ra-indeksinddelingerne blevet fjernet og erstattet med en farveskala til højre i figuren, og farvekoordinaterne er erstattet med deres tilhørende farvetemperatur. Figuren viser, at det ser ud til, at der eksisterer følgende sammenhæng imellem farvetemperatur og Ra-indeks: jo lavere farvetemperatur, jo højere RA-indeks. Grundet få målepunkter for farvetemperaturer over 3500K kan man dog ikke sige dette helt præcist. Her bør flere produkter med høj farvetemperatur måles. Der eksisterer dog umiddelbart ingen sammenhæng imellem Ra-indeks og effektivitet. Dog har produkter med det laveste Ra-indeks umiddelbart også en høj effektivitet. I Ra-indeksområdet 70-97 varierer effektiviteten som funktion af Ra-indekset dog ret meget. Der findes produkter med høj RA-indeks og høj effektivitet, ligesom der findes produkter med lavt Ra-indeks og lav effektivitet, så umiddelbart kan der ikke ses nogen sammenhæng der. Der er ikke målt nogen produkter med et Ra-indeks over 97.



Figur 18 Målte specifikke Ra-indeks for R9, R10 og R11 som funktion af det generelle Ra-indeks for de undersøgte LED lyskilder.

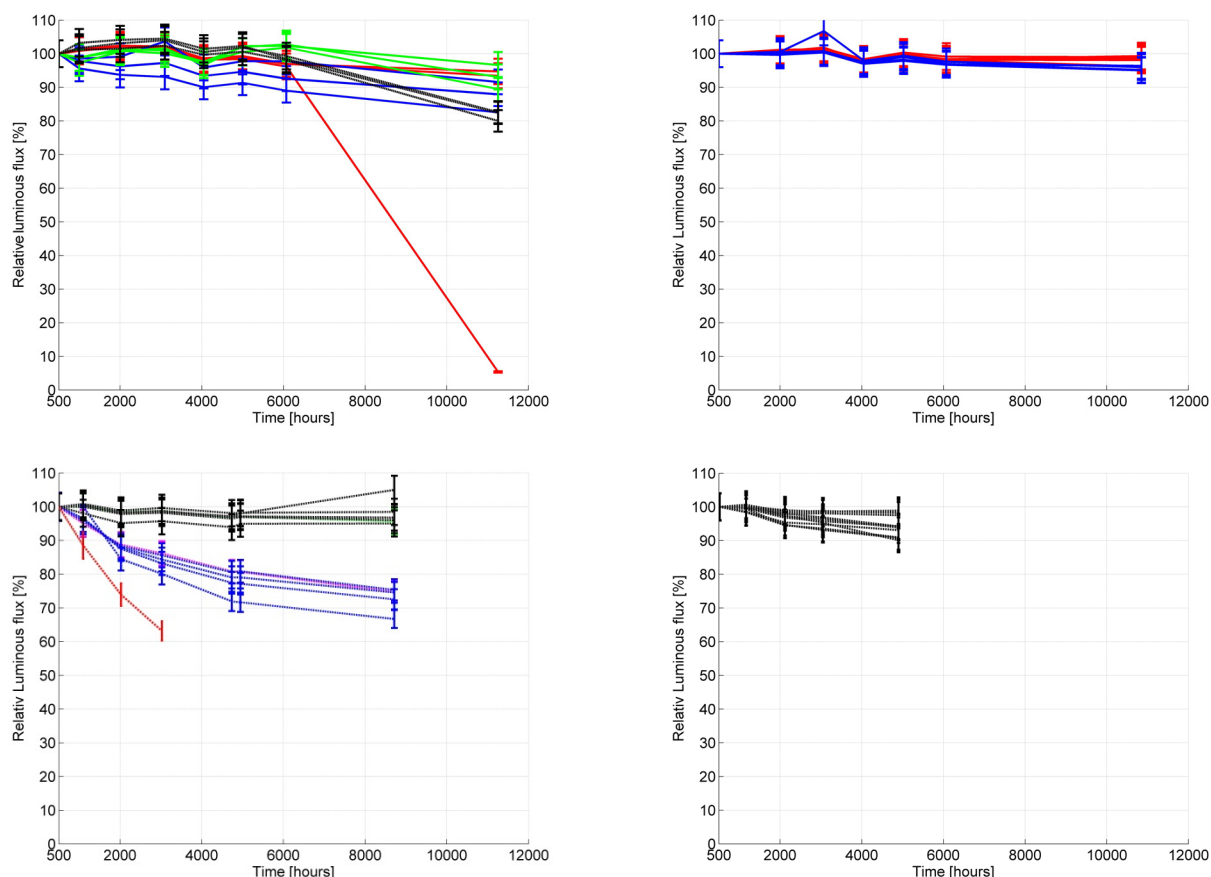


Figur 19 Effektiviteten som funktion af farvetemperatur samt det generelle Ra-indeks

Langtidstest

En af de vigtige og attraktive egenskaber for LED lyskilder er deres lange levetid. Levetiden for et LED produkt er oftest defineret til at være tiden, hvor produktets lysstrøm er aftaget til 70 % (L70) af den lysstrøm produktet havde til at starte med. Alternativt arbejdes der med L50 eller L80 svarende til hhv. 50 og 80 % af den initiale lysstrøm. I dette projekt har vi foretaget langtidstests på 48 LED produkter for at finde ud af, hvordan de opfører sig henover tid. Der er foretaget en test, der svarer til den, der anbefales af IEC¹⁵, hvor lysstrøm og farveegenskaber måles over en operationstid på 25 % af den opgivne levetid, men maksimalt 6000 timer. Lyskilderne er blevet målt ved 0, 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 og 6000 timer. Da der er megen vigtig information at udlede fra denne test, er det er valgt at fortsætte langtidstesten og der foretages løbende målinger. De er så efterfølgende blevet målt igen efter 8700, 10800 samt 11250 timer. Produkterne blev fordelt ud på 4 bakker med 12 på hver bakke. 3 af bakkerne med retningsbestemte lyskilder og en enkelt med ikke retningsbestemte lyskilder. Bakkerne er indsat i et racksystem, hvor der er fri luftstrømning omkring lyskilderne. Resultaterne for hhv. 0, 500 og 1000 timers viser en meget stor variation og ændring i lysstrøm inden for de første 500 timers drift. Derfor er det valgt at basere langtidstestene på 500 timers operation som nulpunkt for målingen.

Resultatet af disse målinger kan ses på Figur 20. Denne figur viser lysstrømmen normaliseret til 500 timer som funktion af tid for de forskellige bakker. Hvis man ser på figuren, ses det, at produkternes relative lysstrøm er aftaget til 68-97 % i løbet af de 9000-11250 timer, de har været tændt. Mange af LED produkterne påstås at have en levetid imellem 25000 – 50000 timer. Dette er langt fra tilfældet for alle LED produkterne. Det ses ud fra figuren, at mange allerede er meget tæt på L70, og et enkelt produkt ramte ved allerede 9000 timers operation. Derudover stoppede et enkelt produkt med at virke efter imellem 3000 og 5000 timers drift og to produkter omkring 7000 timers drift.



Figur 20 Den målte lysstrøm normaliseret til 500 timer, som funktion af tid. Figuren øverst til venstre, 4 serier af produkter med 3 i hver. Figuren øverst til højre 2 serier af produkter med 6 og 5 i hver. Figuren nederst til venstre, 1 serie af produkter med 5, 2 serier med 4 og 3 enkelte produkter. Figuren nederst til højre, 12 forskellige produkter.

I alt 8 serier har undergået langtidstests. I Tabel 8 vises, hvorledes farvetemperaturen og lysstrømmen har ændret sig henover tid for disse 8 langtidstestsserier. De 6 første serier er blevet testet hver tusinde time (og en måling ved 500 timer). I Serie 7 og 8 er målingen ved 4000 timer blevet erstattet med en 4700 timers måling i stedet. Hvis der kigges på farvetemperaturændringen henover tid ses det, at de forskellige serier performer meget forskelligt. I halvdelen ændres farvetemperaturen over tid ikke med mere end hvad øjet kan opfatte og til de enkelte testtidspunkter er variationen i selve serien heller ikke større, end hvad øjet kan opfatte. Anderledes står det til med den anden halvdel. Her ændres farvetemperaturen betydeligt, og i en enkelt af serierne helt op med 340 K, hvilket er langt over det, som øjet kan se (ved disse farvetemperaturer ligger grænsen for, hvad øjet kan se tæt på 33 K). Ses der på, hvordan de serier, hvis

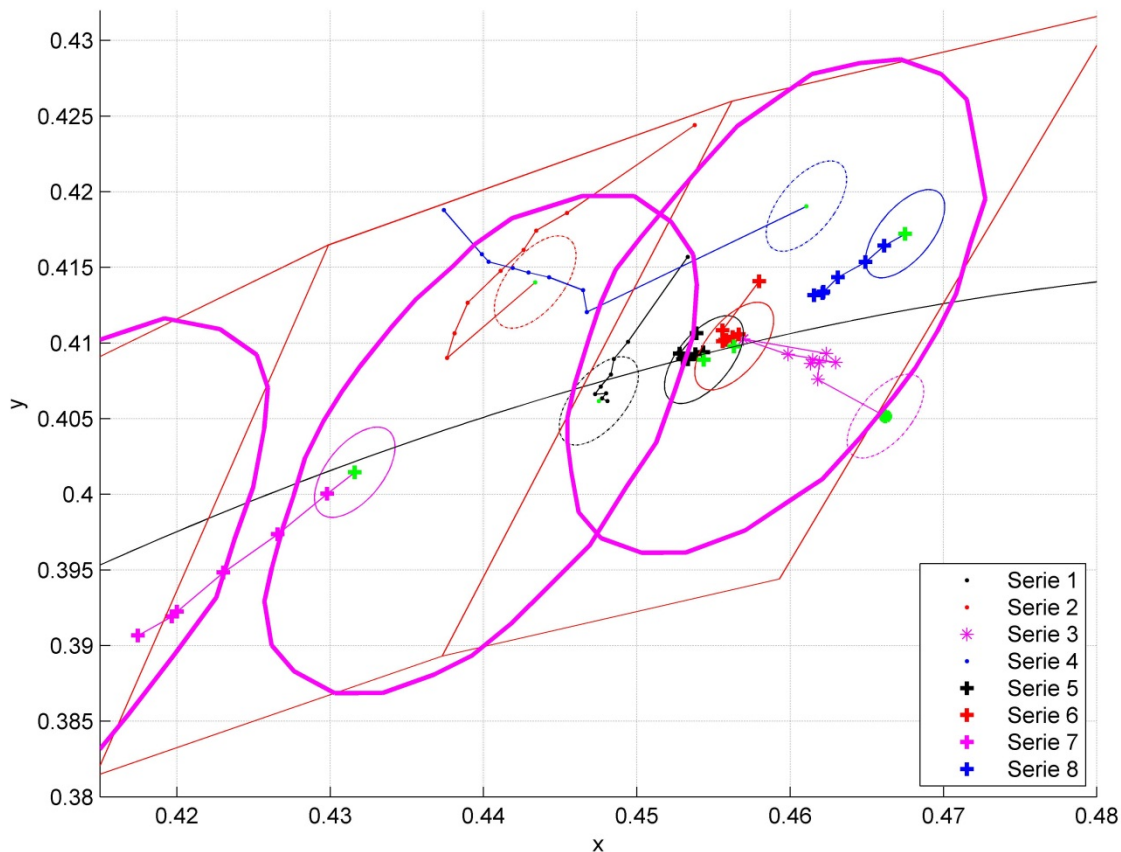
farvetemperatur fejler over tid, performer til de enkelte testtidspunkter, er variationen imellem dem også meget stor. Nogle variere med 110 K i den enkelte serie til det specifikke testtidspunkt og andre med mindre end, hvad øjet kan opfange. Man må konkludere, at med en "fejlrate" på 50 % henover tid, at LED produkterne ikke performer acceptabelt.

Hvis man kigger på lysstrømmen henover tid er billedet lidt et andet. De fleste af produkternes lysstrøm ændres ikke synderligt henover tid, når først de har opnået deres "stabilitetsniveau". Hvor lang tid dette tager varierer lidt fra serie til serie. De fleste har opnået et stabilt niveau efter 500 timers brændetid. Herefter ændres lysstrømmen ikke meget henover tid. Dog med mere end de 1 % som mennesker kan opfatte. De fleste holder sig under 5 % lysstrømsvariation. Det samme gør sig gældende, hvis der kigges på de enkelte testtidspunkter og lysstrømsvariationen internt i en serie. Her varierer de fleste kun med omkring 5 -10 %. Serie 4, 6 og 7 træder dog meget udenfor. For serie 4 gælder, at lysstrømmen både henover tid men også til testtidspunkterne, ændrer sig en hel del. Især variationen internt i serien er meget stor. I serie 6 er variationen henover tid ikke særligt slemt. Her er det til de enkelte testtidspunkter, at variationen er stor. I Serie 7 aftager lysstrømmen henover tid bekymrende meget. Den opnår ikke rigtigt et stabilt niveau, og på sigt kunne den godt gå hen og fejle. Denne serie samt serie 4 er også de serier, hvor farvetemperaturen ændres meget.

Tabel 8 Farvetemperaturen og lysstrømmen som funktion af tid for de forskellige serier af lyskilder, der har været til langtidstest.

Langtids Serie 1								
Tid [timer]	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000	11250
Farvetemperatur [K]	2839 ± 20	2838 ± 20	2848 ± 20	2846 ± 19	2840 ± 19	2845 ± 19	2838 ± 20	2810 ± 23
Lysstrøm [lm]	224 ± 0.27	227 ± 0.88	230 ± 0.66	229 ± 0.98	221 ± 0.71	222 ± 1.3	217 ± 1.3	145 ± 120
Langtids Serie 2								
Farvetemperatur [K]	3043 ± 17	3045 ± 11	3033 ± 12	3003 ± 24	2984 ± 24	2979 ± 25	2962 ± 13	2872 ± 20
Lysstrøm [lm]	132 ± 3	128 ± 2.2	127 ± 3.7	129 ± 6.8	123 ± 3.6	124 ± 4.1	123 ± 5.7	115 ± 5.3
Langtids Serie 3								
Farvetemperatur [K]	2784 ± 120	2781 ± 110	2794 ± 110	2796 ± 110	2774 ± 110	2810 ± 100	2881 ± 120	2748 ± 82
Lysstrøm [lm]	176 ± 4.4	173 ± 5.7	178 ± 5.2	178 ± 4.1	172 ± 5.2	179 ± 4.7	180 ± 5	164 ± 5.9
Langtids Serie 4								
Farvetemperatur [K]	2959 ± 49	2968 ± 42	3003 ± 36	3025 ± 36	3041 ± 34	3070 ± 38	3081 ± 40	3145 ± 47
Lysstrøm [lm]	95.4 ± 20	97.3 ± 20	98.1 ± 20	98.8 ± 20	95.9 ± 19	96.9 ± 20	94.1 ± 20	77.9 ± 16
Langtids Serie 5								
Tid [timer]	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000	10800
Farvetemperatur [K]	2793 ± 22	-	2804 ± 23	2805 ± 23	2799 ± 22	2808 ± 22	2815 ± 24	2810 ± 24
Lysstrøm [lm]	174 ± 3.2	-	175 ± 2.8	177 ± 3.1	170 ± 2.8	174 ± 2.5	171 ± 2.8	172 ± 3.4
Langtids Serie 6								

Farvetemperatur [K]	2743 ± 5	-	2752 ± 5.4	2754 ± 6.2	2747 ± 5.3	2756 ± 5.4	2761 ± 5.7	2752 ± 5.4
Lysstrøm [lm]	208 ± 28	-	209 ± 28	212 ± 27	203 ± 27	205 ± 27	202 ± 27	199.4 ± 27
Langtids Serie 7								
Tid [timer]	500	1000	2000	3000	4700	5000	6000	8700
Farvetemperatur [K]	2648 ± 15	2657 ± 12	2666 ± 12	2681 ± 13	2687 ± 13	2687 ± 13	-	2699 ± 4.8
Lysstrøm [lm]	371 ± 15	371 ± 12	362 ± 12	364 ± 12	358 ± 11	360 ± 11	-	364 ± 3.9
Langtids Serie 8								
Farvetemperatur [K]	3094 ± 22.8	3108 ± 24.1	3148 ± 31.7	3191 ± 38.5	3226 ± 46.3	3232 ± 47	-	3270 ± 48
Lysstrøm [lm]	259 ± 10	252 ± 8.1	226 ± 12	216 ± 13	201 ± 16	200 ± 16	-	188 ± 15



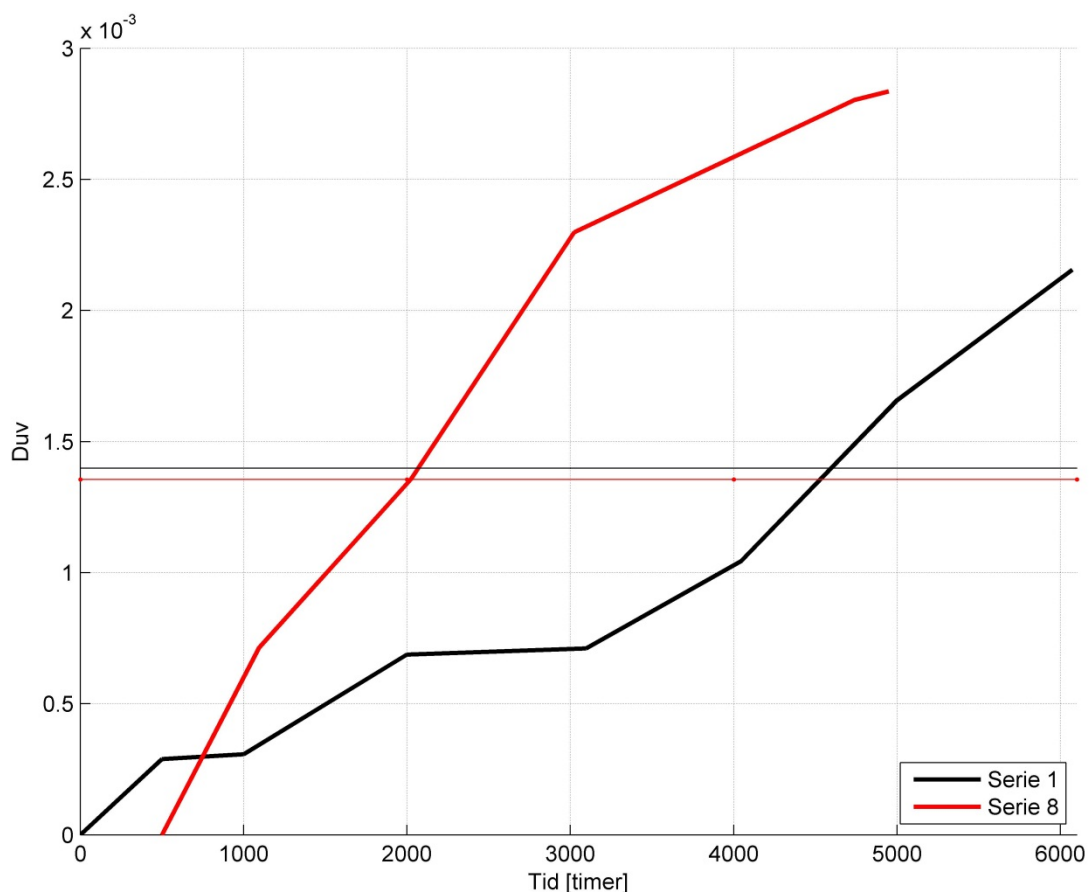
Figur 21 Målte farvekoordinater for en af lyskilderne for hver af de forskellige langtidsstestsserier som funktion af operationstid. De grønne punkter viser lyskildens startkoordinater.

Figur 21 er lavet for at undersøge stabiliteten af farvekoordinaterne for lyset fra LED lyskilderne over tid. Her ses en udvalgt lyskilde fra hver langtidsstestsserie. De grønne punkter viser startfarvekoordinaterne (500

timer) for hver af lyskilderne. Hvert punkt efterfølgende svarer til et af testtidspunkterne, der kan ses i Tabel 8. Serie 5 og 6 er meget stabile, og deres koordinater bevæger sig næsten ikke, når de har været tændt i 6000 timer. Derudover ses på figuren, at serie 1 og 8, der ellers bliver betragtet som værende stabile serier, hvis der alene kigges på farvetemperaturen, måske ikke er så stabile alligevel. Deres koordinater bevæger sig henover et forholdsvis stort område i farvekoordinatsystemet, når de har været tændt et godt stykke tid. Følgende grænse kan anvendes for at se, om lyskilder er stabile, når de bevæger sig langs de isotermske linjer¹⁶:

$$\Delta u'v' = 0.0008 + CCT \cdot 2.1e^{-7}$$

Det ses altså, at grænsen for, hvad mennesker kan opfatte er afhængig af farvetemperaturen. Jo højere farvetemperatur, jo større bliver grænsen. Figur 22 viser denne grænse for serie 1 og 8. Her ses det, at serie 8 allerede overskrider denne grænse efter en brændetid på 2000 timer, og at serie 1 overskrider denne efter ca. 4500 timer.



Figur 22 Den kromatiske afstand fra startpunktet til slut for serie 1 og 8

Fra Figur 21 kan det også ses at seks af serierne bevæger sig fra lave farvetemperaturer imod højere farvetemperaturer. Dette er en vigtig observation, og skyldes, at det fosforescerende materiale, der er anvendt til at lave dioden, degraderes, når dioderne bliver varme, og dioderne derfor henover tid vil begynde at udsende en større del af deres lys i det lave bølgelængde område og mindre i det høje. To af

serierne bevæger sig dog ikke fra lave farvetemperaturer imod højere farvetemperaturer over tid. Disse holder farvetemperaturen nogenlunde konstant men bevæger sig væk fra hulrumsstrålerkurven, parallelt med de isotermiske linjer. Dette vil gøre, at dioden vil bevæge sig væk fra hulrumsstrålerkurven og op imod det grønne område i CIE1931 diagrammet.

Hvis det antages, at den farvetemperatur, som LED produkter har til at starte med, er den farvetemperatur, som de er designet til at have, så kan det siges, at alle på nær en enkelt, holder sig inden for tolerancefirkanterne, der er sat for LED produkter for henholdsvis 2700 K og 3000 K efter 5-6000 timer. Så de vil stadig kunne kaldes 2700 K eller 3000 K farvetemperatursprodukter. Umiddelbart ser det dog ud som om, at endnu et produkt vil bevæge sig ud af den tolerancefirkant, det startede i, efter 6000 timers brændetid. Derudover foregår disse farvetemperaturs skift i en glidende overgang henover en lang periode, så mennesker vil højst sandsynligt vende sig til farveskiftet og først opdage det, den dag pæren står og skal skiftes ud, eller et nyt produkt sættes op ved siden af. Når det så er sagt, er det dog bekymrende, hvis pæren skifter for meget i farvetemperatur henover tid, da det godt kunne tyde på, at elektronikken eller den termiske kontrol af dioderne ikke er helt i orden, hvilket i værste tilfælde kan føre til, at produktets levetid bliver stærkt forringet. Så jo mere stabilt et produkt er henover tid jo bedre.

Brugerundersøgelse

I løbet efteråret 2012 blev der foretaget brugerundersøgelser på Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet. Formålet med brugerundersøgelsen var at vurdere indflydelsen af R9 på farveopfattelsen af røde farver, herunder hudfarver belyst af forskellige hvide LED-lyskilder til rådighed på markedet i dag. Betydningen af hvide LEDers spektralsammensætning for farvegengivelsen er under stor diskussion. Ikke mindst hvordan farveopfattelsen kan måles og beskrives¹⁷. I dag er CRI den anvendte standard, og den angives med en såkaldt Ra-værdi, der er baseret på et gennemsnit af 8 udvalgte farver, og hvordan disse farvers fremtoning afviger fra, når de er belyst med en standard lyskilde af samme farvetemperatur. Andre særlige farvegengivelsesindekser har dog betydning. Herunder er især R9 væsentlig, da gengivelse af mættet rød er vigtig for udseendet af hudtoner (Martinkauppi, 2002^{18,19}). Et studium af R9's betydning vurderedes derfor væsentlig som udgangspunkt for brugerundersøgelsen.

Metode

Af disse 266 lyskilder, der blev testet for deres fotometriske og kolorimetriske egenskaber i projektet, blev otte spotlyskilder udvalgt til forsøget. Syv af de udvalgte LED-spots havde en sammenlignelig farvetemperatur (CCT) på mellem 2909 K og 3056 K og et Ra-indeks på 80 ± 2 og varierende R9 fra 3 til 27. Den ottende (en afvigende LED-spot) blev inkluderet havende en CCT på 2700K. De målte kolorimetriske egenskaber som CCT, CRI, R9 og Duv for de anvendte LED-kilder er vist i Tabel 9.

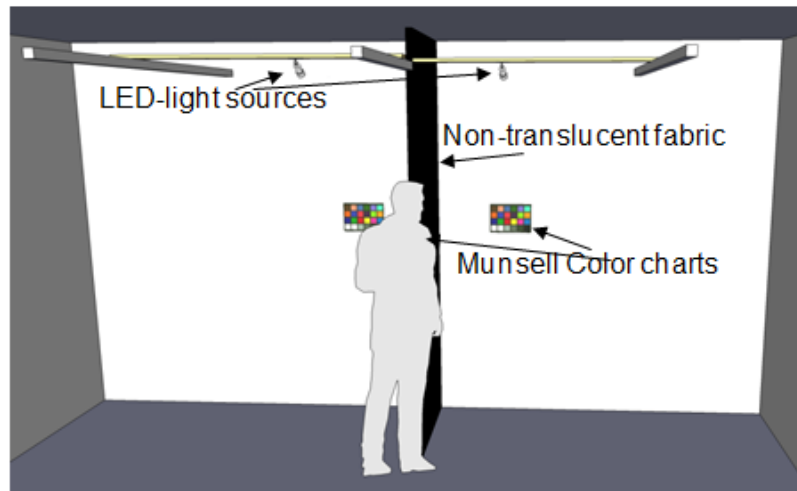
Et antal af 64 unge (<38 år) testpersoner med normalt farvesyn deltog i vurderingen af LED kilderne. Forsøgssopstillingen bestod af fire identiske mørklagte rum (Figur 23). Hvert rum var opdelt i to, adskilt af sort Molton stof. I hvert delområde blev et Munsell Farvekort (Macbeth ColorChecker) monteret på en hvid væg belyst med en LED-lyskilde. LED lyskilden blev omhyggeligt placeret i en afstand fra Munsell farvekortet resulterende i 115 lux på farvekortet. I hvert testrum vurderede forsøgspersonerne to LED lyskilder op imod hinanden.

Eksperimentet bestod af 16 sub-test, hvor de 8 kilder blev sammenlignet to og to. Fire personer roterede systematisk mellem rummene. Hver person havde 5 minutter til at evaluere belysningen i hvert rum. Placeringen af LED-lyskilderne blev ændret efter hver sub-test-runde. Ved afslutningen var hver af LED-lyskilderne, gruppe A, blevet evalueret mod fire af de andre lyskilder, gruppe B, to gange (dvs. i alt 8 forsøgspersoner per LED-kilde evaluering).

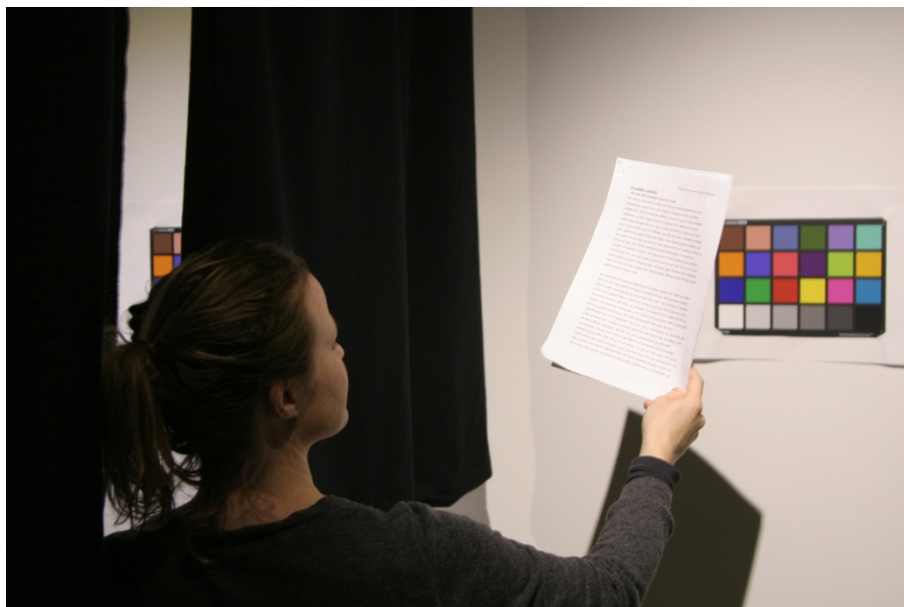
Ved evalueringen blev forsøgspersonerne efter grundig instruktion bedt om at udfylde et spørgeskema, om: 1) Farvefremtoningen af Munsell farvekortet, 2) Farven af lyset på et hvidt papir, 3) Evnen til at læse to linjer tekst i lyset (Figur 24), 4) Udseendet af hudtoner på egen hånd og 5) i hvilken type rum, de ville placere lyskilden, hvis de skulle vælge.

Tabel 9: Målte kolorimetrisk egenskaber (CCT, CRI, R9 og Duv) af de otte LED-kilder, der anvendes i forsøgene. Tabellen er inddelt i LED-gruppe A og B som inddelt under evalueringen af LED-kilderne. Duv er inkluderet i tabellen og beskriver en lyskilders kromatiske afstand til Planck locus i CIE1960 farverummet. Duv angiver, om lyskilden kromatiske koordinater er placeret over Planck locus (+) eller under (-).

LED-gruppe	LED-spot/kilde	CCT	CRI	R9	Duv (10^{-3})
A	A1	2988	79.6	17.0	3.2
	A2	2704	82.8	17.3	0.86
	A3	2965	79.8	21.6	-4.6
	A4	2959	81.9	26.7	-5.6
B	B1	3056	78.8	3.0	1.9
	B2	2950	81.3	9.6	-0.78
	B3	2909	81.4	23.5	-1.6
	B4	2939	81.2	25.5	-5.4



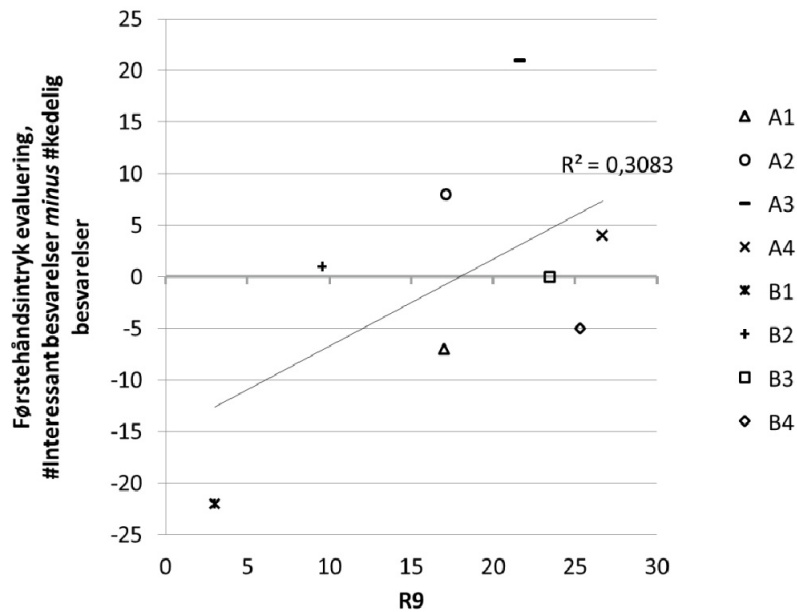
Figur 23 Skitse af forsøgsopstillingen i et rum.



Figur 24 Billede af forsøgsperson, der læser en tekst belyst med en af LED kilderne

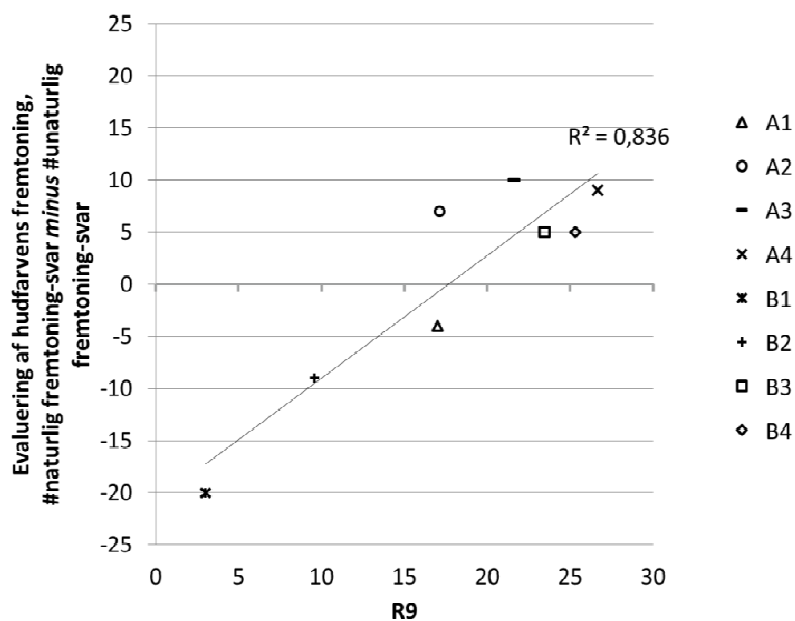
Resultater

For de udvalgte LED-lyskilder forventes det, at det særlige farvegengivelsesindeks, R9, har en udtalt effekt på udseendet af hudtoner. Dette viste sig at være tilfældet, og resultaterne bliver præsenteret ved 'CIE CENTENARY CONFERENCE, Towards a new century of light' i Paris d. 15. og 16. april 2013²⁰. Evalueringen af hvorvidt kilderne blev vurderet overvejende interessant eller kedeligt imod LED-kildernes R9 værdi er vist i nedestående figur (Figur 25).



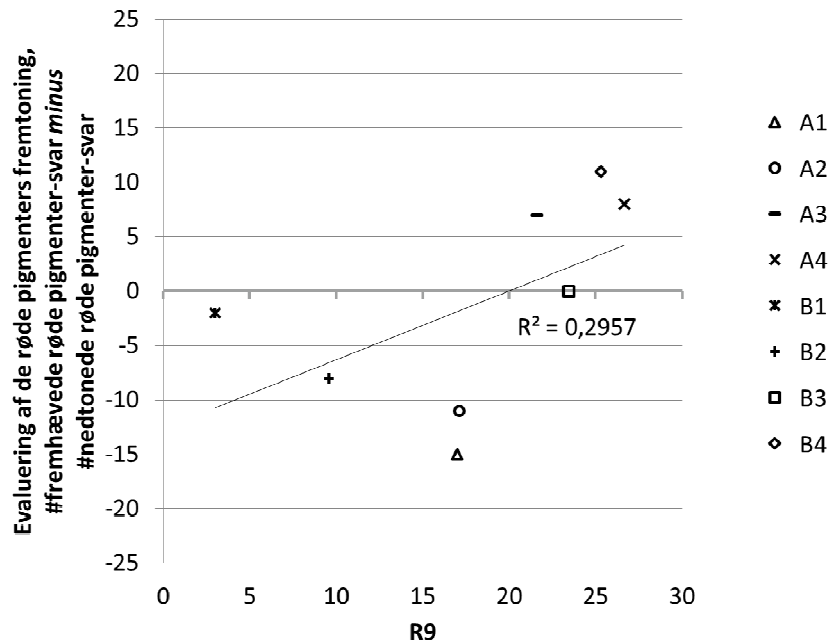
Figur 25 Figuren viser mængden af testpersoner for hver LED, der vurderer lyset som værende interessant minus testpersoner, der evaluerede lyset som værende kedelig, plottet mod den tilsvarende R9 værdi. De maksimale evalueringer (positive og negative) der indgår per LED er 64.

En svag trend af at lyset fra LED-kilder med en højere R9 værdi vurderes mere interessant (end kedelig) blev fundet (Figur 25).



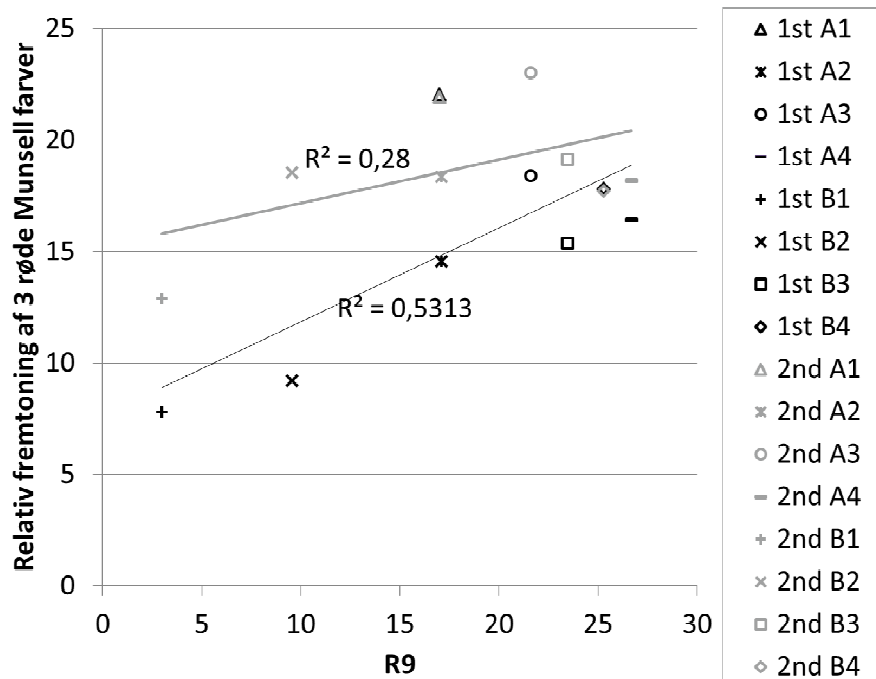
Figur 26 Figuren viser mængden af testpersoner for hver LED, der evaluerede hudfarve udseende som værende naturlig minus testpersoner, der evaluerer hudfarve udseende som værende unaturlig, plottet mod den tilsvarende R9 værdi. De maksimale evalueringer (positive og negative) der indgår per LED er 64.

Der var også en positiv trend mht. at hudfarvens naturlighed blev vurderet mere positiv ved højere R9 værdier (Figur 26), og en svag trend af at røde pigmenter er mere fremhævet (end nedtonet) ved højere R9 værdier (Figur 27).



Figur 27 Figuren viser for hver LED-kilde mængden af testpersoner, der evaluerede de røde pigmenter i deres hånd som fremhævet minus testpersoner, der evaluerede de røde pigmenter i deres hånd som værende nedtonet, plottet mod den tilsvarende R9 værdi. De maksimale evalueringer (positive og negative), der indgår per LED, er 64.

Denne trend med mere fremhævede røde pigmenter med højere R9 værdier, blev understøttet af evalueringer af 3 røde Munsell farveprøver, der blev vurderet mere fremhævet, når belysningen stammede fra LED-kilder med højere R9 værdier, især ved en i forsøget tidlig evaluering. Der blev i resultaterne af testen fundet en tendens til, at forsøgspersonerne adapterede sig til lyset, sådan at de røde farver ikke fremtonede tydeligere sidst i evalueringsperioden (Dvs. adaptionstid < 5 minutter, Figur 28).



Figur 28 Resultatet af den normaliserede sum af tre røde Munsell farvers fremtoning for hver LED-kilde i forhold til det tilsvarende R9. Spørgsmål blev stillet tidligt (1st) og sent (2nd) i undersøgelsen.

Konklusion af brugerundersøgelse

Et forsøg blev udført med henblik på at analysere betydningen af R9 for kommercielt tilgængelige hvide LED lyskilder for den røde farveopfattelse og den kaukasiske huds udseende. Den mest udtalte fundne korrelation var mellem evalueringen af hudens udseende på bagsiden af hånden og R9 for de forskellige LED-lyskilder. Vi fandt, at hudfarven vurderes som værende mere naturlig med en øget R9 værdi. Balancen mellem negative og positive evalueringer viste sig at skifte med R9 værdier omkring 20. Dette blev fundet for LED-spots med en sammenlignelig farvetemperatur (CCT) på mellem 2909 K og 3056 K og Ra værdi 80 ± 2 og varierende R9 fra 3 til 27.

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:

Carsten Dam-Hansen, "LED positivliste projekt" Foredrag ved DTU Fotoniks, LED konference "Krav, test og energibesparelser", 8. febr. 2011, Ingeniørhuset, København.

Carsten Dam-Hansen, Anders Thorseth, Dennis Corell og Peter Poulsen, "Kvalitetstest af LED lyskilder" Artikel i branchetidsskriftet LYS, nr. 2, (2011)

Carsten Dam-Hansen, "Spectroradiometry for LED characterization", Foredrag ved Dansk Optisk Selskabs Spectroscopy Day, September 30, 2011, Roskilde, Denmark

Casper Kofod og Carsten Dam-Hansen, "Danish work related to IEA SSL Annex", foredrag ved IEA 4E SSL Annex 3rd Expert meeting, September 6-8, 2011, Stockholm, Sweden

Carsten Dam-Hansen, "Nyt LED system til udstillingsmontre", Forum for energieffektivisering, Hindsgavl, Middelfart, November 16, 2011.

Casper Kofod og Carsten Dam-Hansen, "Danish work related to IEA SSL Annex", foredrag ved IEA 4E SSL Annex 4th Expert meeting, 5.-8. marts 2012, Tokyo, Japan.

Casper Kofod og Carsten Dam-Hansen, "Danish work related to IEA SSL Annex", foredrag ved IEA 4E SSL Annex 5th Expert meeting, 12.-14. september 2012, Beijing, China.

Dam-Hansen, Carsten ; Corell, Dennis Dan ; Thorseth, Anders ; Poulsen, Peter Behrensdorff "LED lighting quality", Abstrakt indsendt til konferencen Nordic Lighting Conference 2012, Oslo.

Dennis D. Corell, "LED lighting quality", Foredrag ved Nordic Lighting Conference 2012, Oslo.

Dam-Hansen, Carsten ; Corell, Dennis Dan ; Thorseth, Anders ; Poulsen, Peter Behrensdorff "Light quality and efficiency of consumer grade solid state lighting products", SPIE Photonics West : Green Photonics, San Francisco, CA. Foredrag holdt af Anders Thorseth. Modtager Green Photonics Award for artiklen.

"Han kaster lys over LED-junglen" af Marianne Vang Ryde, Artikel i DTU Avisen nr. 2, pp. 14-15 (2013).

"Hjælp at hente inden køb af LED-pærer" af Jesper Tornbjerg, Artikel i Nyhedsbladet Dansk Energi . nr. 1 . januar 2013.

Efter lanceringen er LED-Positivlisten blevet omtalt på en række forskellige hjemmesider:

<http://www.teknovation.dk/default.asp?id=10000&aid=17907&sid=6>

<http://www.elteknik-online.dk/?p=4077>

http://www.danskenergi.dk/Aktuelt/Arkiv/2013/Februar/13_02_12C.aspx

<http://www.nyhedsbladet.danskenergi.dk/Nyheder/Nyhed2.aspx>

<http://www.noe.dk/pages/webseite.asp?articleGuid=176694>

<http://www.danskenergi.dk/Aktuelt/Arkiv.aspx?FilterCategory=Belysning>

[http://vbn.aau.dk/da/clippings/hjaelp-at-hente-inden-koeb-af-ledpaerer\(a03f3a74-96cc-46c4-9816-76e97f728659\).html](http://vbn.aau.dk/da/clippings/hjaelp-at-hente-inden-koeb-af-ledpaerer(a03f3a74-96cc-46c4-9816-76e97f728659).html)

<http://ipaper.ipapercms.dk/TEKNIQ/electra2013/electrafebruar2013/?Page=37>

Referencer

- ¹ http://re.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/LED_Quality_Charter/PDF/EU_LED_Quality_Charter.pdf
- ² <http://www.ens.dk/offentlig-og-erhverv/vaerktoejer/produktlister/belysning/find-lysdiodepaerer%20> 25. marts 2013.
- ³ http://www.energystar.gov/index.cfm?fuseaction=find_a_product.showProductGroup&pgw_code=LB, 25. marts 2013.
- ⁴ <http://www.lightingfacts.com/>, 25. marts 2013.
- ⁵ <http://www.lightingfacts.com/content/label>, 25. marts 2013.
- ⁶ KOMMISSIONENS FORORDNING (EF) Nr. 244/2009 af 18. marts 2009, om gennemførelse af Europa-Parlamentets og Rådets direktiv 2005/32/EF for så vidt angår krav til miljøvenligt design af ikke-retningsbestemte lyskilder i boliger, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:076:0003:0016:DA:PDF> 25. marts 2013.
- ⁷ IES LM-79-08, Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products, ISBN: 97808799522
- ⁸ IEA 4E SSL Annex Interlaboratory Comparison Test Method version 1.0, http://ssl.iea-4e.org/files/otherfiles/0000/0051/SSL_Annex_2013_IC_Test_Method_v.1.0.pdf, 25. marts 2013.
- ⁹ Dynamic Lighting – Perception of luminous colour variation, Karin Bieske and Christoph Schierz
- ¹⁰ Color Science, Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae s.569, Wyszecki & Stiles
- ¹¹ Energy Savings Potential of Solid-State Lighting in General Illumination Applications 2010 to 2030, http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_energy-savings-report_10-30.pdf 25. marts 2013.
- ¹² ANSI_NEMA_ANSLG_c78.377-2008 (American National Standard C78.377-2008)
- ¹³ Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources. CIE 13.3-1995. ISBN 978 3 900734 57 2.
- ¹⁴ DS 700:2005, Dansk Standard, 6. udgave, Kunstig belysning i arbejdslokaler.
- ¹⁵ IEC/PAS 62612, Edition 1.0 2009-06, Self-ballasted LED-lamps for general lighting services Performance requirements
- ¹⁶ Dynamic Lighting – Perception of luminous colour variation, Karin Bieske and Christoph Schierz
- ¹⁷ Davis, W. & Ohno, Y. (2010) Color quality scale. Optical Engineering, 49, 033602, 1–16.
- ¹⁸ Martinkauppi, B. (2002). Face colour under varying illumination - analysis and applications (PhD Thesis). Department of Electrical and Information Engineering and Infotech, University of Oulu, ISBN 951-42-6788-5
- ¹⁹ Angelopoulou, E. (2001) Understanding the color of human skin. SPIE Proceedings Vol. 4299, Human Vision and Electronic Imaging VI (eds B.E. Rogowitz & T.N. Pappas), pp. 243–251. SPIE.
- ²⁰ Markvart, J., Iversen, A., Logadóttir, Á., Corell, D.D. & Thorseth, A. (2013) USER EVALUATION OF EIGHT LED LIGHT SOURCES WITH DIFFERENT SPECIAL COLOUR RENDERING INDICES R9. CIE CENTENARY CONFERENCE, Towards a new century of light.