

Kombineret dagslys og intelligent LED belysning

- få dagslys ind i bygningerne



Slutrapport for PSO 342-044 og PSO 344-007

Af Carsten Dam Hansen, Dennis Corell, Anders Thorseth, Peter Poulsen, DTU Fotonik
& Jakob Markvart, Anne Iversen og Ásta Logadóttir, SBi

Marts 2013

Forord

Denne rapport indeholder en beskrivelse af arbejdet udført i og resultaterne af forsknings og udviklingsprojektet "Kombineret dagslys og intelligent LED belysning - få dagslys ind i bygningerne" og udgør slutrapportering for dette projekt.

Projektet er gennemført i et samarbejde imellem følgende partnere: DTU Fotonik, Statens Byggeforskningsinstitut, Rambøll Danmark, Energirådgiveren og Philips Lighting Denmark. 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 var finansieret af Dansk Energi under Elforsk's PSO program, under indsatsområderne 1. Bygninger, 3. Belysning og 5. Effekt- og styringselektronik. Projektet har projekt nr. PSO 342-044 og tillægsprojektet PSO 344-007, og blev startet i februar 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 oversigt over dynamiske belysningsystemer og en beskrivelse af opbygningen af et nyt intelligent dynamisk belysningsystem baseret på farveblandings LED teknologi. Systemet, som er udviklet til forskningsbrug, er beskrevet i rapportens sidste del sammen med en beskrivelse af forsknings brugerundersøgelser udført med systemet. 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 "Combined daylight and Intelligent LED lighting - getting the daylight into the buildings" and form the final report for this project.

The project is carried out in cooperation between the following partners: DTU Fotonik, Statens Byggeforsknings-institut, Rambøll Danmark, Energirådgiveren and Philips Lighting Denmark. 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 was financed by the Danish Energy Association through Elforsk's PSO program, under actions 1. Buildings, 3. Lighting and 5. Power and control electronics. The project has no. PSO 342-044 and PSO 344-007. It was initiated in February 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 contains an overview of dynamic lighting systems and a description of the development of a new intelligent dynamic lighting system based on color mixing LED technology. The system, which has been developed for research purposes, is described in the last part of the report together with a description of the research user test done with the system. Finally the work on communicating the results of the project is described.

Indhold

Forord	2
Preface.....	3
Resumé	5
Baggrund	5
Formål.....	5
Projektgruppen.....	6
Resultater	6
Konklusioner og perspektiver	6
Dynamiske belysningsystemer.....	8
Forskningsanlæg	8
Forbrugerprodukter.....	8
Professionelle produkter	9
Dynamisk LED system	10
LED moduler	10
Lys armaturerne	11
Komponent karakterisering.....	13
Lys moduleringen	14
Lysstyring	17
Elektronisk styring	21
Brugertest	22
Formål.....	22
Fremgangsmåde	22
Resultater	23
Rumbelysningen	23
Arbejdsbelysningen	24
Sammenligning af koncepter.....	25
Konklusion af brugertest	25
Formidling.....	26
Videnskabelig publikation	26
Præsentationer.....	26
Referencer	27

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 at dynamisk belysning som indebærer mulighed for at styre lysets farvetemperatur såvel som styrke så småt var ved at komme frem på markedet, og mange nye dynamiske belysningsystemer har igennem projektperioden vundet mere og mere frem. Der er nogle systemer som er baseret på lysstofrørteknologi, men langt de fleste er baseret på LED teknologi. Det er bl.a. LED teknologiens muligheder med hvide LEDer ved forskellige farvetemperaturer og farveblandings teknologi der gør det muligt at lave belysningsystemer hvor lyset kan ændres i farvetemperatur og styrke. Det er blevet vist at menneskers døgnrytme, hormonproduktion og igennem disse menneskers velvære er afhængig af det lys og mørke som vi får i løbet af et døgn. Specielt har lyset blå spektraldele betydning herfor. Kunstig belysning der kan bringe dagslysets foranderlighed ind i bygninger, siges derfor at vil kunne bringe velvære og øget aktivitet til mennesker. Men der er mange ting der ikke er afklaret og hvor mange muligheder skal folk have for selv at styre lyset. Skal det være automatisk styring, der følger dagslyset? Eller skal det være forprogrammerede scenarier og hvilke? Kræver det at man øger belysningsstyrken, for at modsvare dagslysets høje belysningsstyrker? Hvilken effekt får det på energiforbruget? Hvor store dynamikområder er nødvendige, farvetemperaturmæssigt og lysstyrke mæssigt? Hvad er menneskers præferencer? Og ikke mindst kan man påvise en positiv effekt hos mennesker der påvirkes i løbet af dagen i lyset fra dynamiske belysningsystemer?

Formål

Projektets formål var derfor at udvikle og demonstrere et nyt koncept med intelligent dynamisk belysning, der kan supplere og følge dagslysets rytme og dermed bringe "dagslyset" ind i bygninger. Systemet udvikles til at benyttes i forskningundersøgelser til at forsøge at besvare nogle af disse påtrængende spørgsmål. Systemet baseres på LED teknologiens unikke farveegenskaber og høje energieffektivitet, som muliggør et koncept, der både giver mulighed for høj kvalitets belysning og kan være energibesparende. Det nye LED lysystem kombineres med et nyt farvesensorsystem til styring efter dagslyset farvesammensætning og lysstyrke. LED lyskilde placering og styringsstrategier analyseres og optimeres igennem modelberegninger der inkluderer dagslysbidrag. Brugernes oplevelse af forskellige belysnings scenarier undersøges ved at det nye LED belysningsystem installeres i SBI's dagslyslaboratorie. En række forskellige belysnings scenarier testes med en stor række forsøgspersoner. Formålet med tillægsansøgningen til hovedprojektet var at gennemføre disse brugertest.

Hoveddelene i arbejdet i projektet har derfor været

- Design af intelligent dynamisk LED belysningsystem til demonstrationsforsøg
- Udvikling og karakterisering af styrbare LED lyskilder/lamper og kalibrering af farvesensorsystem
- Design, programmering og optimering af styringsstrategi til demonstrationssystem
- Opbygning og lystekniske test af demonstrations system i SBI's dagslyslaboratorie
- Udførelse af brugertest i SBI's dagslyslaboratorie
- Analyse og publicering af resultater af brugertest

Projektgruppen

Til at gennemføre og opnå dette blev en forskningsgruppe bestående af DTU Fotonik som projektledende, Statens Byggeforskningsinstitut (SBI), Rambøll Danmark, Energirådgiveren og Philips Lighting Denmark. DTU Fotonik har kompetencer indenfor LED teknologi, beregning og måling på lys og stod for opbygning, programmering og test af LED system. SBI står med deres dagslyslaboratorium og kompetencer indenfor belysning og brugertest for, design af system, scenarier og forskningsundersøgelserne af menneskers præferencer i forhold til systemet. Rambøll og Philips Lighting har deltaget i design og dimensioneringsfasen af projektet og Energirådgiveren har set på de energimæssige betragtninger.

Resultater

Hovedresultatet af projektet er opbygningen af det nye intelligente og dynamiske LED belysningssystem til demonstrations og forskningsformål og en række omfattende brugertest er gennemført, analyseret og vil blive publiceret ved CIE's 100 års jubilæums konference "Towards a new century of Light" i april, 2013.

LED belysningssystemet er et fuldt system til kontorbelysning med loftsarmaturer og arbejdslamper, hvilket har gjort det muligt at skabe generel og arbejdsplads belysning i to kontorer med hver to arbejdspladser. Systemet er installeret i SBI's daglyslaboratorium i sådanne to kontorum. Alle lamper kan styres via et udviklet computerinterface og arbejdslamperne er yderligere manuelt styrbare for en bruger med to drejknapper for hhv. farvetemperatur og lysstyrke.

Det nye intelligente og dynamiske belysningssystem er baseret på farveblandings LED teknologi, og gør det muligt at styre lysets farvesammensætning, farvekoordinater og dermed den korrelerede farvetemperatur af lyset. Styringsmæssigt er systemet forprogrammeret til at kunne producere hvidt lys med en korreleret farvetemperatur fra 2700 K til 7000 K. Farvesammensætningen er optimeret ud fra ønske om en meget god farvegengivelse givet ved et generelt Ra-indeks på 92-97 over hele området. Systemet kan dæmpes 20-100 %, uden væsentlig ændring af lyset farveegenskaber. Et mini-spektrometer er kalibreret og indbygget i systemet og leverer løbende estimat af dagslysets lysstyrke og farvetemperatur, igennem måling af dagslysets farvesammensætning i det synlige område. Systemet benytter dagslysets egenskaber til at styre lyset fra LED belysningssystemet.

Resultatet af brugertestene viser at den udviklede mulighed for automatisk regulering af lyset på arbejdsområdet efter dagslysets farvetemperatur vurderes at være lige så foretrukket og medføre lige så tilfredse brugere som et traditionelt lysanlæg med jævn belysning i rummet. Til gengæld viste brugerresultaterne at der både var energibesparelse at hente samt mere tilfredse brugere ved at give brugerne mulighed for selv at justere enten lysniveauer eller den korrelerede farvetemperatur på arbejdsområdet og reducere almenbelysningen i rummet.

Projektet og dets resultater er blevet formidlet til en række forskellige interessenter igennem en række formidlingsaktiviteter som, foredrag ved workshop og kurser for studerende og industrien, møder med internationale samarbejdspartnere, og ved internationale konferencer om belysning.

Konklusioner og perspektiver

Med projektet er der udviklet et nyt forskningsværktøj, i form af et intelligent dynamisk LED belysningssystem, til demonstrationsformål og til forskningsundersøgelser af brugerpræferencer med hensyn til belysning i f.eks. kontorer enten kun som kunstig belysning eller i samspil med dagslys.

LED belysningsystemet giver mulighed for en lang række nye undersøgelser, hvor nye scenarier kan afprøves i forhold til brugere. Et område der diskuteres er hvorvidt folk foretrækker lys, der har farvekoordinater på hulrumsstråler kurven, eller om folk foretrækker lys med et lidt rødtligt skær. Med dette system er det netop muligt at styre farvekoordinaterne af lyset og ikke bare farvetemperaturen. Man kan således lade brugere vurdere belysning med fast farvetemperatur men med mere eller mindre rødtligt eller grønligt skær, den såkaldte kromatiske afstand. Amerikanske undersøgelser (Ohno, 2012) peger på at for varmt hvidt lys foretrækker folk lys der har et rødtligt skær. Med LED belysningsystemet er der skabt en mulighed for at generere nye resultater indenfor belysningsforskning og mulighed for øget samarbejde med andre forskningsinstitutioner.

Mange nye dynamiske belysningsystemer baseret på LED teknologi er på vej på markedet med anvendelses områder som f.eks. kontor, hospitals og skole-belysning. Og med den generelle udvikling inden for LEDers effektivitet vil systemer med LED kunne lave store energibesparelser, ikke kun som følge af øget lys udsendelse pr. tilført watt men også i øget intelligens og styring af lyset og dermed energiforbruget. Udbredelsen og brugertilfredsheden af disse belysningsystemer vil kunne øges hvis der kommer flere videnskabelige svar på de mange spørgsmål der er til sådanne systemers egenskaber og virkemåde.

Dynamiske belysningsystemer

Dette kapitel indeholder et overblik over tilgængelige lysprodukter/kilder og faciliteter med dynamiske egenskaber som blev udarbejdet parallelt med projektet af DTU Fotonik, i samarbejde med de andre partnere. Da denne type systemer ikke deler en fælles overordnet kategori eller navn er det vanskeligt at danne et omfattende overblik. Fremgangsmåden der her er benyttet fremhæver løsninger fra store aktører indenfor belysning, med vægt på løsninger stillet til rådighed af danske erhvervsliv.

Som det ses i Tabel 1 er alle produkterne fra perioden 2011 – 2012, med undtagelse af forsknings anlæg og lysstofrørsløsninger. Det var derfor vurderingen ved den indledende del af projekt at der for at der kunne laves de nødvendige demonstrationer skulle bygges et system op fra bunden. Da et sådan ikke kunne findes på det åbne marked.

Forskningsanlæg

NIST Spectrally Tunable Lighting Facility

NIST har faciliteter bestående af 2 værelser oplyst af loftsplader med LED moduler bestående af 22 farvekanaler til eksperimenter indenfor farvegengivelse og farveopfattelse (Miller, et al., 2009). Her er dog ikke fokus på samspillet med udelyst og systemet kan ikke realistisk set bruges i f.eks. en kontor sammenhæng.

Colour Engineering Center (CEC)

Department of optical engineering ved Zhejiang universitetet i Hangzhou i Kina har faciliteter der ligner dem fra NIST. Loftet er udstyret med ca. 200 moduler af 16 farvekanaler hver med en udskiftelig fatning til LED med lav styrke (Dam-Hansen, 2012)., centret blev indviet i september 2012, og har der for ikke publiceret nogen resultater.

Forbrugerprodukter

Philips Hue

Hue fra Philips er et LED system med 3 farvekanaler bestående af E27 retrofit pærer der styres med en iPhone mini applikation(app) der integrerer med Zigbee samt WiFi netværk. Angiveligt har produktet en maksimal farvegengivelse på CRI=91. Der foreligger ikke megen teknisk information (Wright, 2012), men produktet er til salg i Danmark.

LIFX

En fælles finansieret (crowd source) opstartsvirksomhed på hjemmesiden kickstarter.com (Bosua, 2012) som umiddelbart virker til at være sat op til at have de samme egenskaber som Philips Hue bare over WiFi. Internetbrugere har tilsammen givet tilsagn om 1,3 mio. USD til projektet.

Panasonic Everleds

Panasonic har sit eget mærke indenfor loftsbelysning (*Everleds*) som reguleres med ECONAVI styring som kan skifte farvetemperatur og dæmpe belysningen. Produktet virker ikke til at henvende sig til det engelsktalende marked (Panasonic Corporation, 2012).

Professionelle produkter

Philips SchoolVision

Philips *SchoolVision* er en løsning målrettet til klasseværelser på skoler. Der er 4 indstillinger: standard, energi, fokus og hvile. (Philips, 2010). En undersøgelse peger på forbedring af børnenes præstationsniveau på forskellige karakterer (Wessolowski, et al., 2009). Her er dog tale om en løsning med lysstofrør som har de andet sted omtalte begrænsninger.

Philips HealWell

HealWell fra Philips er en løsning målrettet patienter på hospitaler der skifter den generelle værelsesbelysning (lysstofrørs) og LED farver i en wall wash over døgnets 24 timer. En undersøgelse viser forbedring af søvn og generel tilfredshed (Giménez, et al., 2011).

Philips DayWave

DayWave fra Philips er et eksklusivt design produkt der benytter mikrolinser samt 2x96 LED med en CCT (korreleret farvetemperatur) på 3000 og 5500 Kelvin. Produktet er styret af DALI eller DMX (Philips, 2012).

Riegens down light

Concido 150 LED fra Riegens er et forsænket down light produkt med mulighed for varierende DALI-regulering/styring mellem 2700 og 6500 Kelvin (Riegens lighting, 2012).

iGuzzini Sivra Compact

Sivra Compact er et armatur med 7 T16 lyskilder, der kan dæmpes og afstemmes mellem 2700 og 6500 Kelvin (iGuzzini, u.d.).

Tabel 1 En oversigt overfaciliteter og produkter.

Benævnelse	Fabrikat/ organisation	Farve kanaler	Farvetemperaturspænd	Specialisering	Teknologi	Introduktions tidspunkt
Hue	Phillips	3		Hjemmebrug	LED, ZigBee	2012
SchoolVision	Philips	?		Uddannelse	T5	2009 ¹
HealWell	Philips			Hospitals	LED and konventionel	2011
Spectrally Tunable Lighting Facility	NIST	22	Ubegrænset	Forskning	LED	2009
	CEC, China	16	Ubegrænset	Forskning	LED	2012
Sivra Compact	iGuzzini	2	2700-6500		T16	<2009
Line Up wall-washer RGB	iGuzzini	3			LED	
	Rune Lighting	4		Hospitaler	LED	
iSign (RGB)	iGuzzini	3			RGB LED	
DayLight-0001	I-NO		3000-5500	Kontor,	LED	2012

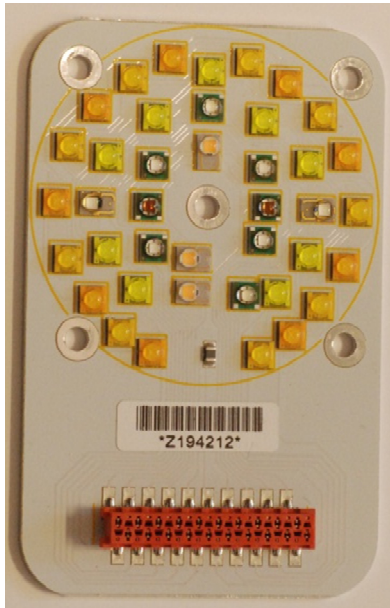
Dynamisk LED system

Det dynamiske lyssystem der er blevet anvendt til at foretage undersøgelserne er blevet udviklet af DTU Fotonik og vil blive beskrevet i denne sektion.

LED moduler

Systemet er bygget op af LED moduler bestående et print med i alt 40 LEDs på, med 9 typer af hhv. hvide og farvede LEDer: Rød (636 nm), Cyan (505 nm), PCAmber (596 nm), Grøn (517 nm), Blå (455 nm), Blå (465 nm), varmhvid (2811 K), neutralhvid (3899 K), koldhvid (6017 K). Et enkelt modul kan levere op til 1400 lumen hvidt lys med en høj farvegengivelse (Ra > 93). LED'erne er monteret i et lille cirkulært område med en diameter på 45 mm, se Figur 1. Disse moduler er små nok til at et enkelt kan monteres i en arkitektlampeskærm, eller flere kan sættes sammen i en klynge til områdebelysning. Hvis de enkelte moduler ikke dæmpes og drives ved fuld styrke bruges der ca. 25 W.

¹ First case story, dated 2009.



Figur 1 Foto af udviklet printkort med 9 kanals LED enhed.

Lys armaturerne

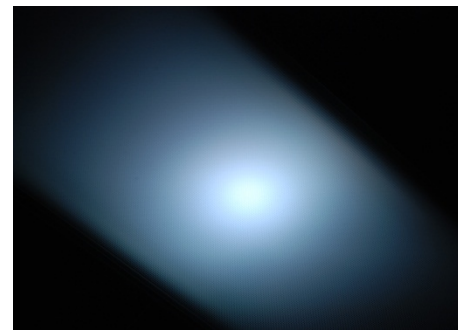
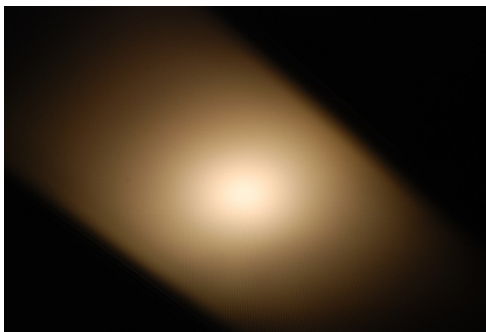
Til undersøgelsen er der blevet opbygget to helt identiske rum, der kan ses på Figur 16. Lyssystemet i hvert af disse rum består af 3 loft armaturer (5 LED modul i hver) samt 2 bordlamper (1 LED modul i hver).

Bordlampen, se Figur 2, består af et enkelt LED modul indfattet i skærmen på en kommerciel bordlampe med en varmeafleder og en polymer diffuser plade monteret på lampeskærmen. Bordlampen er udstyret med 2 trinløse 240° justeringsknapper, der kan justere henholdsvis farvetemperaturen eller lysniveauet for bordlampen.

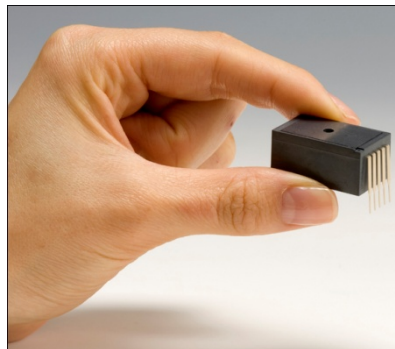
Loftsbelysningsarmaturerne kan ses i Figur 3 og består af 5 LED moduler indsat i et modificeret Philips Savio armatur. Armaturet er blevet modificeret med en reflekter skærm der er coated med en høj reflekterende, stærkt diffuserende maling, BaSO₄. Derudover er der indsat en prismatisk difusser for at blande og sprede lyset fra armaturet endnu mere.



Figur 2 Ny arbejdslampe der indgår i det intelligente dynamiske belysningsystem. Lampen er med computer eller manuel styring af lysets styrke og farvetemperatur. Indgår i brugertest som arbejdspladsbelysning.



Figur 3 Loftarmatur der indgår i det intelligente dynamiske belysningsystem. Armaturet som er bygget op omkring Philips Savioarmatur med kølelegeme og ledningsføring set fra siden samt nedfra når en enkelt LED enhed er indstillet til at udsende hhv. varmt hvidt og koldt hvidt lys. Loftarmaturet indgår i brugertest som zoneopdelt generel belysning.



Figur 4 Minispektrometer der er installeret i det intelligente dynamiske belysningsystem til at måle farvesammensætning en af dagslyset.

Komponent karakterisering

Spektral fordelingen af de enkelte LEDs er blevet målt med kalibreret karakteriserings system bestående af en integrerende kugle (\varnothing 1m) der er fiber (\varnothing 1000 μ m) koblet til et termisk stabiliseret spektroradiometer fra Ocean Optics (QE65000).

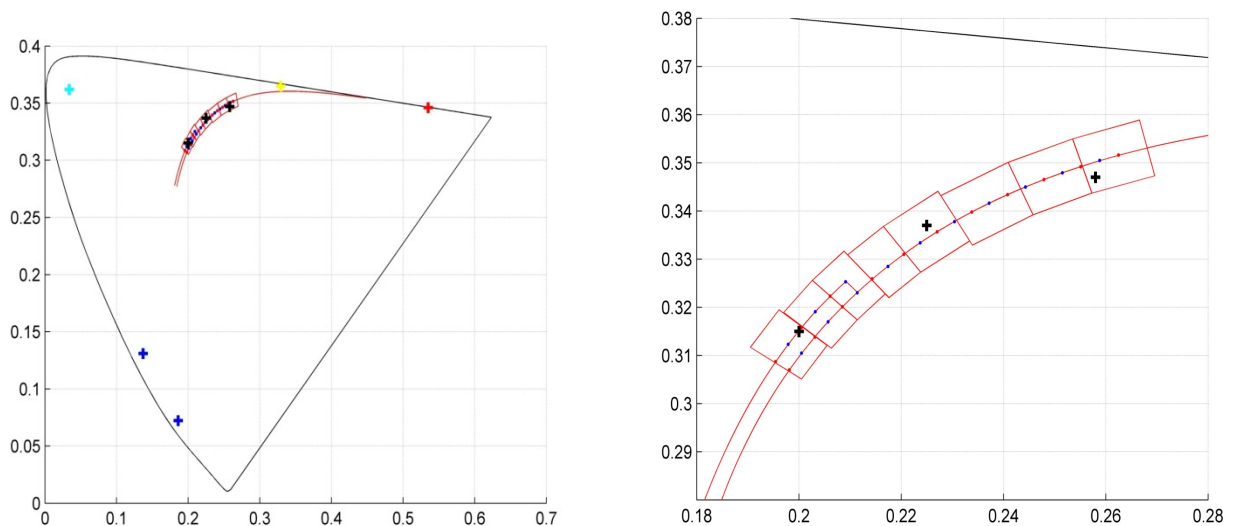
Farvestyringen af lyset fra LED-enheden er baseret på en spektral karakterisering af de enkelte LEDer på diodeprintet målt i steady state som funktion af strøm og PWM dæmpning. Forhold som diode temperatur og ældning er der ikke implementeret korrigeret for.

Dagslysets spektral fordeling blev målt gennem et vindue ved, at anvende et kalibreret Hamamatsu CMOS C10988MA mini-spektrometer med en cosinus diffuser ved indgangsporten.

Lys moduleringen

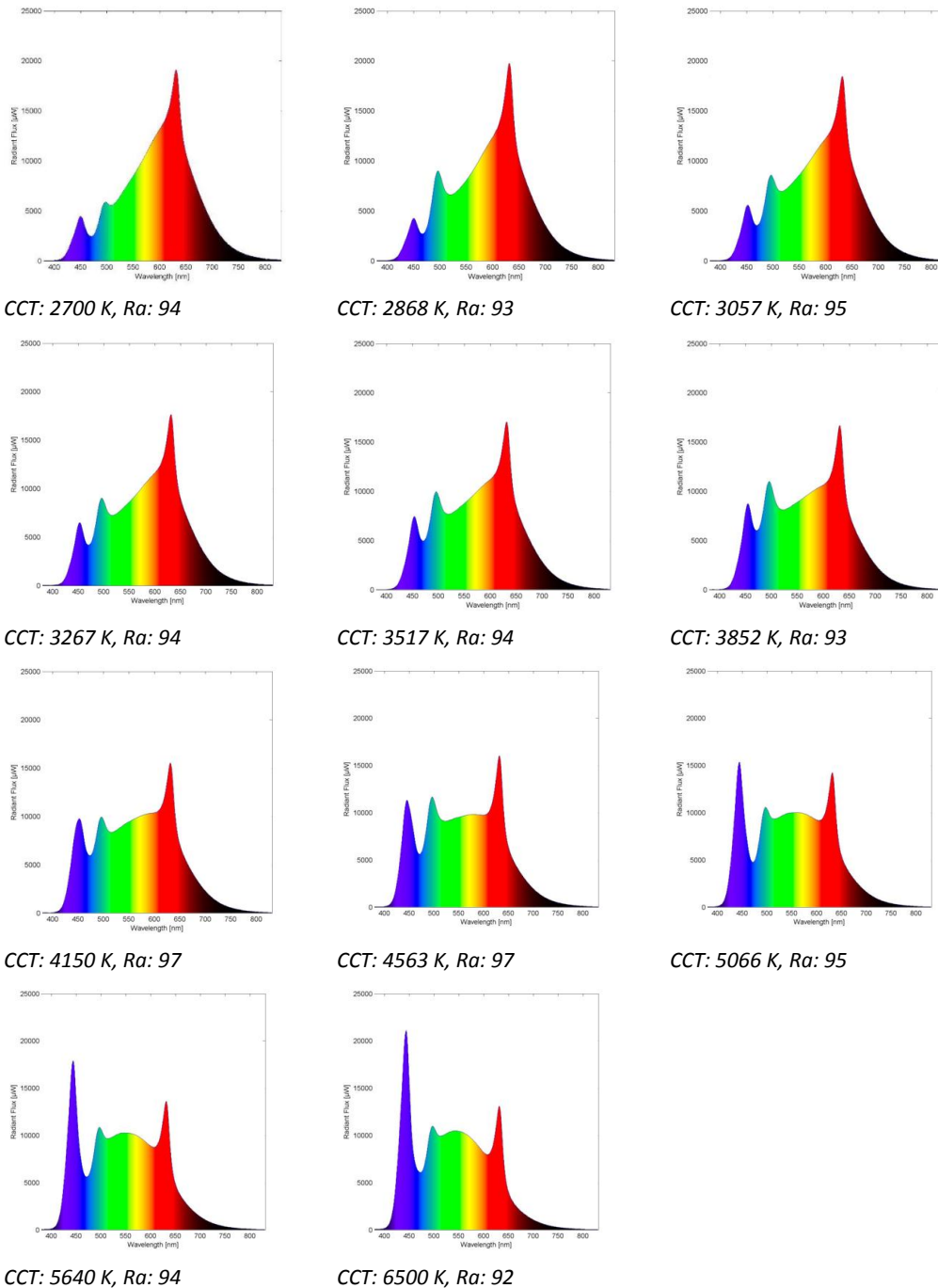
Kravet til lyset fra systemet var at det skulle kunne varieres i farvetemperaturområdet fra 2700 K til 7000 K med en meget god farvegengivelse ($R_a > 92$) samt en lav kromatisk afstand. I dette system bliver de farvede dioder drevet med en konstant strøm og intensiteten af deres spektral fordeling varieres ved at ændre på den PWM de drives ved. Ved de hvide dioder kan der både ændres ved operationsstrømmen og deres PWM.

Farvediagrammerne (CIE 1960) på Figur 5 viser henholdsvis de kromatiske koordinater for de dioder der er anvendt i designet (venstre), samt koordinaterne for 21 nøje udvalgte fikspunkter (højre). Det ses at den muliggjorte farve gamut næsten dækker hele farve diagrammet hvilket betyder at LED modulerne ville kunne udsende lys der dækker det meste af det synlige spektrum. Lyset fra LED modulet kan variere i farvetemperatur fra 2700 - 7000 K over i alt 319 trin, hvilket gør at folk ikke kan registrere nogen ændringer i farvetemperaturen på to nabo punkter (Bieske & Schierz, 2010). For at sikre at dette foregår glidende og at det resulterende lys er af høj kvalitet blev 21 fikspunkter udvalgt, hver af disse lever op til kravene om høj farvegengivelse og lav kromatisk afstand.



Figur 5 Kromaticitetsdiagram (u,v) der viser punkterne for de hvide farver af de tre hvide LEDer i lampen (sorte krydser) af det resulterende lys fra lampen som ligger på og mellem de røde og blå prikker.

Imellem hver af de røde og blå prikker ligger 15 farveblandinger, spektral fordelingerne kører med en glidende overgang fra spektral fordelingen i det "røde" fikspunkt over til spektral fordelingen i det "blå" fikspunkt. Dette sikrer, at farveblandingerne imellem fikspunkterne også har en høj farvegengivelse. Figur 6 viser hvordan farvesammensætningen af lyset ser ud, det ses at ved lave farvetemperaturer at der er en stor rød komponent i spektral fordelingen og at som farvetemperaturen stiger at denne komponent aftager og det blå indhold i spektral fordelingen går hen og bliver mere og mere dominerende.



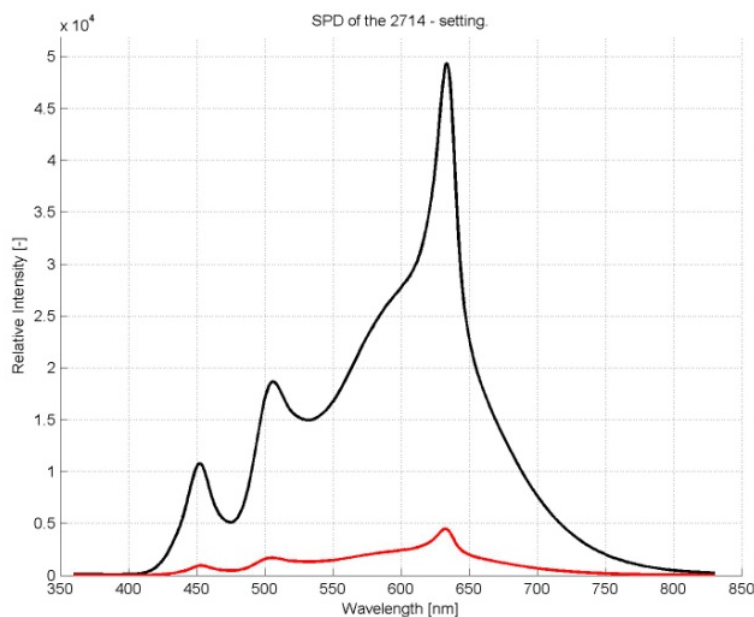
Figur 6 Simulerede farvesammensætninger af lyset fra det intelligente dynamiske belysningsystem. Lysets korrelerede farvetemperatur varierer fra 2700 K til 6500 K, med en høj farvegengivelse givet ved Ra-indeks 92-97.

Lyssætningen for hvert LED modul kan dæmpes fra den maksimale lysstrøm ned til 20 % henover 37 trin, i simuleringerne er dette gjort så variationen af farvetemperaturen ligger indenfor hvad der kan registreres med øjet (Bieske & Schierz, 2010). Strømmen på de enkelte kanaler kan med den valgte driver variere +/- 5 %, hvilket vil forårsage en forskel på farvetemperatur og lysstrøm imellem de enkelte LED enheder. For at finde ud af hvor stor en betydning dette egentlig vil have i realiteten er der blevet taget simuleringer på dette der viser at usikkerheden for lave farvetemperaturer går fra 1 % til 2 % for høje

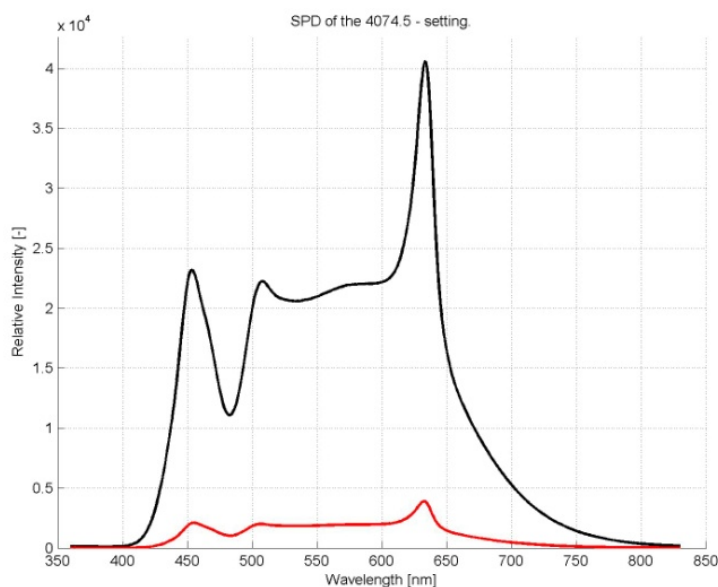
farvetemperaturer. Dette gjorde at der ikke ville kunne registreres nogen forskel på farvetemperaturen fra de enkelte enheder så længe de drives fra 3000–7000 K.

Alle indstillingerne bliver gemt i en organiseret tabelform der anvendes som input til styringselektronikken, på denne måde sikres at der er fuld kontrol over input paramterne for indstillingerne.

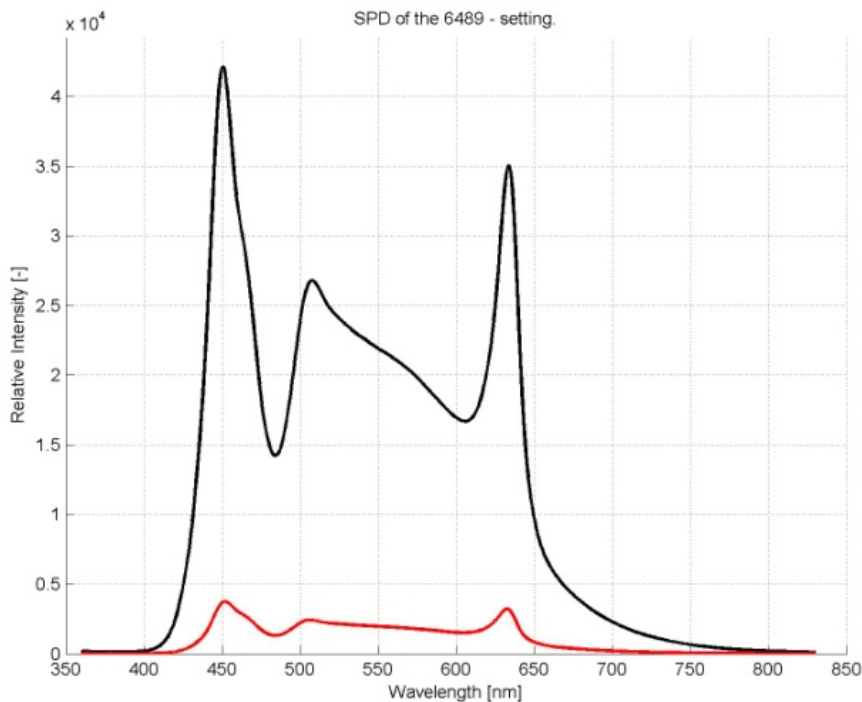
På Figur 7 - Figur 9 er vist en optimeret spektral fordeling, den sorte kurve for varmt hvidt, neutral hvidt og koldt hvidt lys. Den røde kurve på figurerne viser hvorledes spektral fordelingen ville se ud hvis den var dæmpet til 10 % (Vores system dæmpes dog kun ned til 20 %) Det ses at der næsten ingen forskel er i lyssammensætningen når der dæmpes ned fra 100 til 10 %.



Figur 7 Optimeret spektralfordeling for varmt hvidt lys ved 2714 K, ved hhv. 100 og 10 % lysstyrke.



Figur 8 Optimeret spektralfordeling for neutralt hvidt lys ved 4075 K, ved hhv. 100 og 10 % lysstyrke.



Figur 9 Optimeret spektralfordeling for koldt hvidt lys ved 6489 K, ved hhv. 100 og 10 % lysstyrke.

Lysstyring

Lyset bliver styret efter nogle lyskoncepter / scenarier, de vil blive beskrevet herunder. De forskellige koncepter beskriver hvilke armaturer der er sat til forskellige lysindstillinger, og hvordan de kan ændres (om det er brugeren eller forsøgslederen der må ændre lysindstillingerne.)

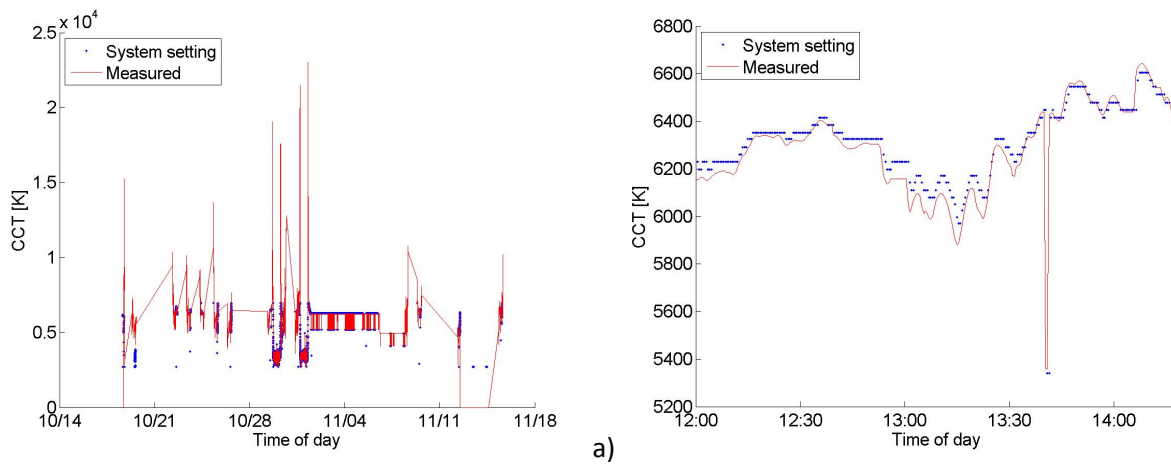
Der er valgt i alt 4 forskellige lyskoncepter, der er blevet testet igennem i denne undersøgelse, en beskrivelse af disse kan ses i Tabel 2. Denne tabel viser målte farvetemperaturer og illuminanser for de forskellige armaturer ved arbejdsfladerne. I de forskellige koncepter kører loftlamperne ved konstant farvetemperatur og konstant illuminans niveau på bordet. Det er muligt for brugeren at indstille på bordlamperne i to koncepter, enten hvor farvetemperaturen bliver holdt konstant og lysniveauet kan ændres, eller hvor lysniveauet er konstant og farvetemperaturen kan justeres. Der blev i begyndelsen af projektet arbejdet med andre scenarier også, men det blev valgt kun at køre med disse fire. LED systemet giver dog rig mulighed for at lave et hav af andre scenarier at teste igennem også.

Tabel 2 The key parameters of the concepts used in the study. The daylight CCT is calculated from the SPD recorded in the window.

Concept	A	B	C	D
Ceiling light, CCT [K]	3494±7	3491±17	3491±17	3491±17
Ceiling light, illuminance [lx]	351±20	177±10	177±10	177±10
Task light CCT [K]	-	2698 ± 56	User adjustable	Daylight*
Task light illuminance [lx]	-	User adjustable	300	388±77

*) Farvetemperaturen der er blevet beregnet ud fra det målte dagslys er anvendt i scenarie D.

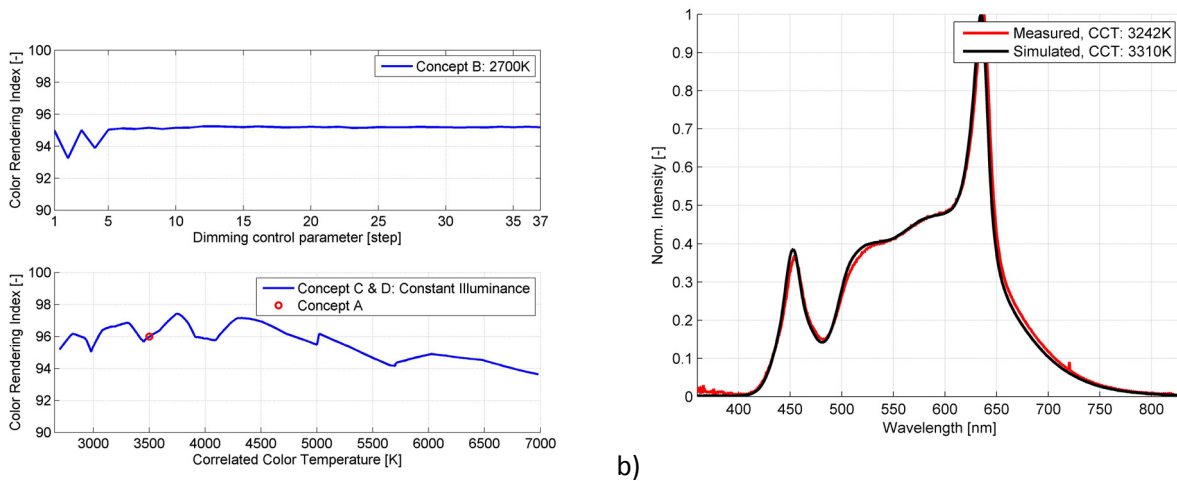
Da undersøgelserne stod på var det ofte overskyet, dette giver meget høje farvetemperatur værdier for dagslyset, LED systemet havde en øvre farvetemperatur begrænsning på 7000 K og under overskyede tilstande ville systemet altid have denne værdi og derfor ikke variere i farvetemperatur som funktion af dagslyset som ønsket. For at komme dette til livs blev der indført en farvetemperatur forskydnings-faktor som forsøgslederen kunne indstille manuelt. Dette forskydnings faktor blev dog udregnet som en forskel i Kelvin. Dette forårsagede at mindre ændringer i dagslyset, som man normalt ikke ville kunne se den store forskel på med øjet, blev til meget store ændringer i den lave del af farvetemperatursskalaen, grundet ulinearitet af ændringer i farvetemperatur, påvist af (Bieske & Schierz, 2010). Disse ændringer blev anset for værende alt for forstyrrende til at kunne blive anvendt i undersøgelsen. Desværre blev årsagen til fejlen ikke opdaget tidnok til at ændre i forskydnings-faktoren og den blev derfor nulstillet under forsøget. Desuden viser plot af lysmålinger i vindueskarmen (Figur 10) at der er målt voldsomme svingninger i både farvetemperatur og intensitet.



b)

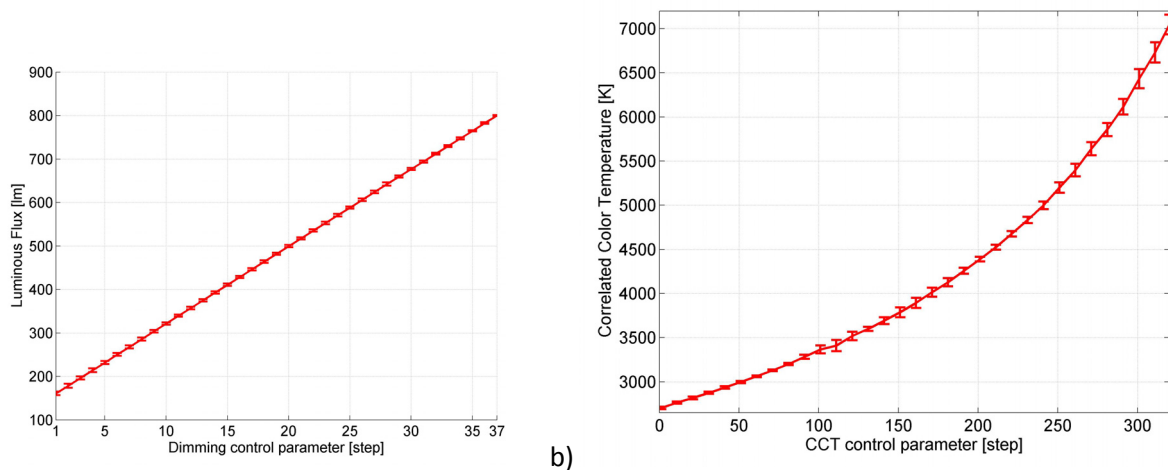
Figur 10 Den korrelerede farvetemperatur målt i vindueskarmen og den tilsvarende indstilling brugt i scenario D, vist som en funktion af tiden henover en almindelig dag.

Når man ændrer på PWM eller strømmen for de forskellige dioder, vil der være ændringer på LEDernes spektral fordeling, dette vil give nogle ændringer i farvegengivelsen, disse ændringer kan ses på Figur 11. Det ses at farvegengivelsen ikke falder under de 92 som var krævet j.f. i afsnittet "Lys moduleringen".



a) *Figur 11 Det simulerede farvegengivelsesindeks til de enkelte løsninger som en funktion til lysdæmpning og korreleret farvetemperatur a). Et eksempel på simuleret og målt spektral lysstyrke b).*

Figur 12a) viser hvorledes lysstrøm for et LED modul opfører sig som funktion af dæmnings trin. Fejlmarginen viser standard afvigelsen for lysstrømmen hvis de enkelte drivere variere +/- 5 %. Figur 12b) Viser farvetemperaturen som funktion af farvetemperaturs step. Det ses at lysstrømmen aftager lineært når der dæmpes og standard afvigelsen er meget lille. Omvendt ses det at farvetemperaturen ikke opfører sig lineært når man kører igennem de forskellige farvetemperaturs steps. Grunden til dette skyldes et ønske om at den oplevede farveforskel imellem to steps ikke måtte være forskellig ligegyldig om der blev drejet ved lave eller høje farvetemperaturer. For at tage højde for dette er farvetemperaturs stepsne udført således at hvert farvetemperaturs trin ændrer farvetemperaturen med $0,7 \text{ MK}^{-1}$ (mired) ligegyldigt om man er ved høje eller lave farvetemperaturer, dette gør at denne ikke lineære sammenhæng kan ses.



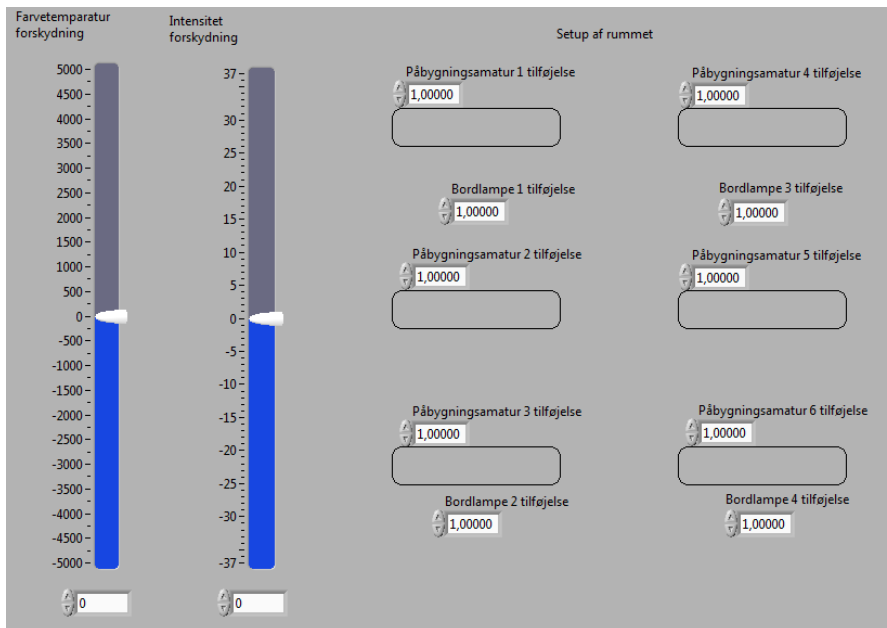
a)

b)

Figur 12 a) lysstrøm som funktion af dæmpnings parameter b). Farvetemperaturen som en funktion tuning parameter, Errorbars indikerer standard afvigelse på grund af variationer i driver elektronik.

Farvetemperaturen og lysstrømmen for hver LED enhed i loft armaturet opfører sig på samme måde som det anvendt i bordlampe (Figur 12). Det er ikke muligt for forsøgspersonerne at indstille loftlamperne, lyset fra disse afhænger af hvilket scenarie der bliver kørt efter.

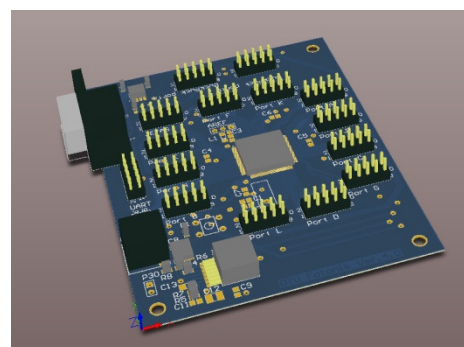
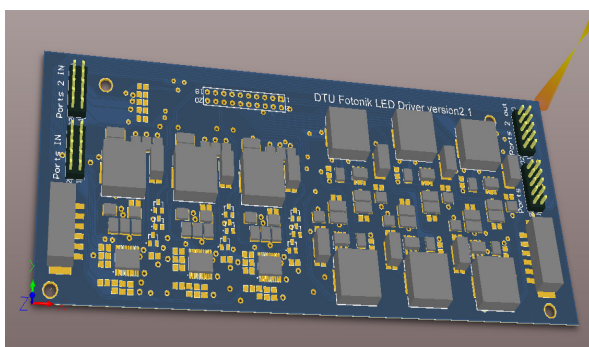
Det er muligt for forsøgslederen at vælge hvilke lamper der skal være tændt og hvilket scenarie / koncepter der skal køres efter. Der er programmeret en brugergrænseflade i LabView, et udsnit af denne kan ses på Figur 13.



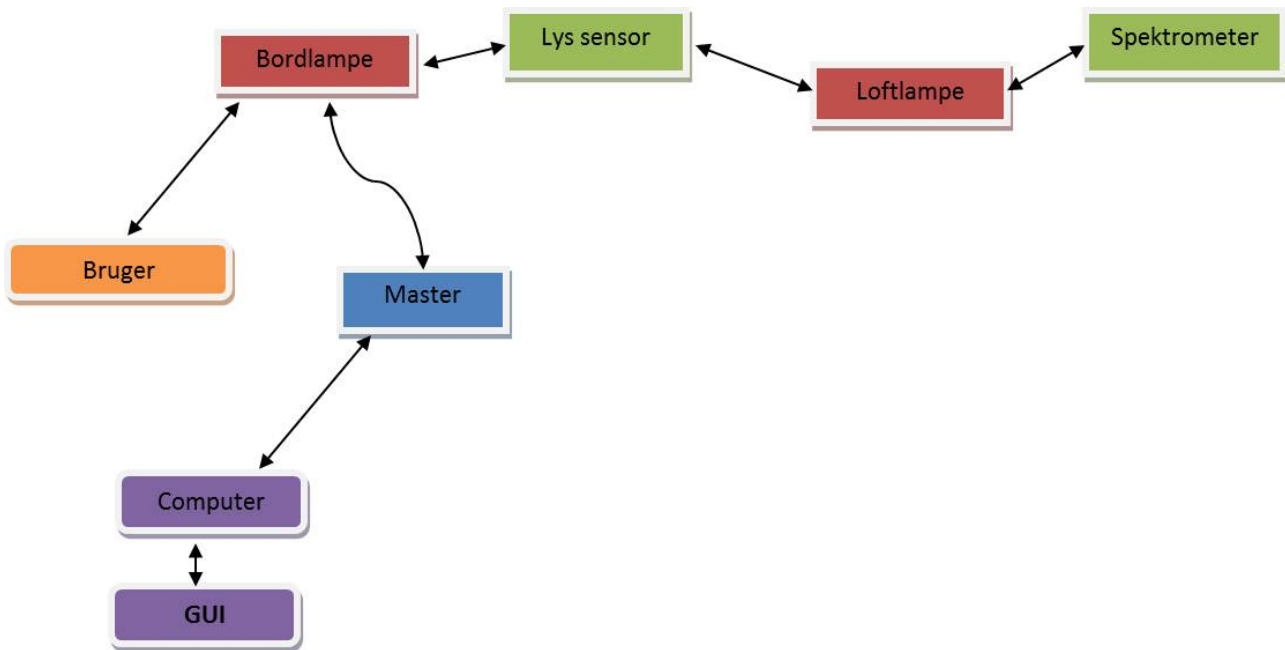
Figur 13 Udsnit af brugergrænsefladen for forsøgslederen

Elektronisk styring

Der er udviklet driver- og styring-enheder til det intelligente belysningsystem, renderinger af de elektroniske komponenter er vist i Figur 14. Driverenheden styrer lyset fra de enkelte typer (farver) af LEDer, som er serieforbundet, ved styring af operationsstrømmen og pulsviddemodulation/pulse width modulation (PWM). Der er 3 LED kanaler som kan strøm- og PWM styres, fra 0-1A, og 6 LED kanaler (5 stk 1A, 1stk 700mA), der kun kan PWM styres. Tabelværdier for operationsstrøm og PWM dæmpning for de enkelte typer af LEDer sendes fra Labview styring programmet til styringsenheden som sætter de ønskede værdier på driverenheden. Kommunikationen mellem enhederne som ses i **Error! Reference source not found.** foregår over CAN bus interfacet. CAN bus er en robust dataprotokol der også bruges i mere kritiske anvendelser, som f.eks. til sikkerhedsfunktioner i fly og biler.



Figur 14 Driverprint (til venstre) og styreprint (til højre) til intelligent belysningsystem



Figur 15 Skematisk tegning af det intelligente dynamiske belysningsystem.

Kontrolsystemet der regulerer lyset i dette projekt er lavet således at det er realtidskontrol af belysningen for både forskere og testpersoner. De benyttede scenarier i undersøgelsen er forudprogrammerede i kontrolenheden og kan ændres af undersøgelseslederen.

Brugertest

Formål

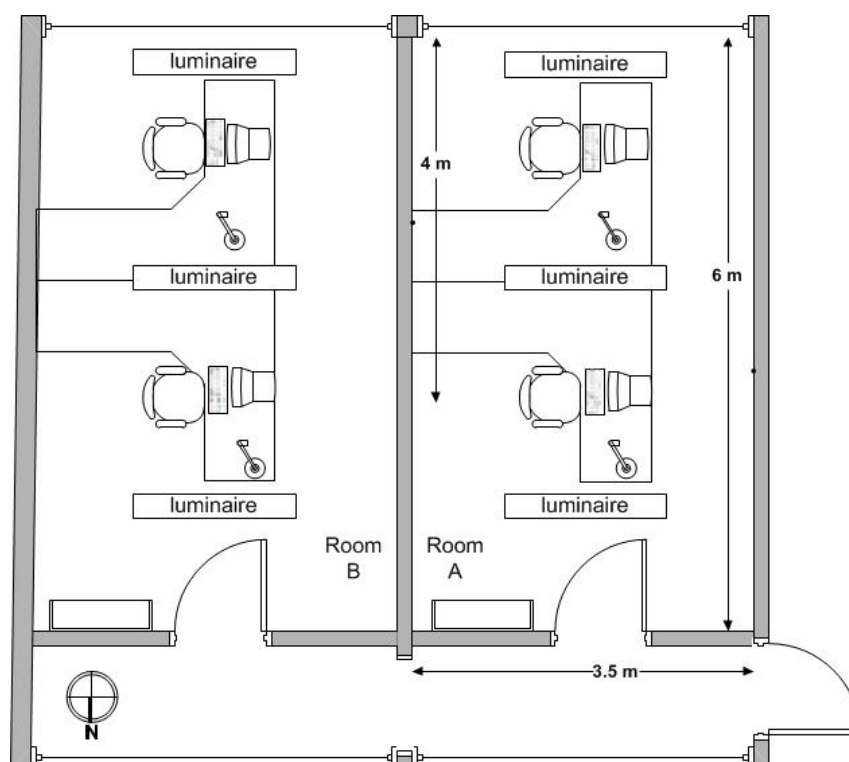
Der findes mange forskellige måder at lave elektrisk dynamisk belysning på, fra regulering efter dagslyset til manuel regulering efter behov. For at et koncept om dynamisk elektrisk belysning bliver implementeret på en god måde, er det nødvendigt at afprøve i hvilken grad, brugerne ønsker dynamisk belysning, og vurdere muligheder for energibesparelser. For at implementering af dynamisk belysning udføres optimalt er det derfor nødvendigt at kortlægge brugertilfredsheden samtidigt med, at energiforbruget betragtes.

Formålet med brugerundersøgelsen er at undersøge, om brugertilfredshed øges ved brug af dynamisk belysning i kontormiljøer. Det gøres ved at sammenligne brugertilfredshed og energiforbrug for fire forskellige lyskoncepter i et lyslaboratorium.

Fremgangsmåde

Forsøget foregik i SBi, AAU's lyslaboratorium i Hørsholm fra 15. oktober til 15. november 2012. Dagslystilgangen i rummene blev minimeret ved brug af persienner i vinduer mod syd. Forsøgssopstillingen vises på Figur 16 og forklares yderligere i (Logadottir, et al., 2013). Lyskoncepterne er beskrevet i afsnit Lysstyring side 17-18. Lyskoncepterne afprøves et ad gangen i hvert lokale som skulle forestille forsøgspersonernes tommands kontorer, Figur 16. Fire forsøgspersoner deltog hver dag, to i hvert lokale og hver forsøgsperson blev udsat for alle fire lyskoncepter i løbet af dagen i en tilfældig rækkefølge. Det ene

koncept blev afprøvet i lokale A og det andet koncept i lokale B per forsøgsperiode (P1-P4) på halvanden time hver.



Figur 16 Forsøgsopstilling i SBi, AAU's lyslaboratorium i Hørsholm.

Forsøgspersonerne var til stede en hel arbejdsdag og udførte egne kontoropgaver. Ved udgangen af hver forsøgsperiode (P1-P4) udfyldte forsøgspersonerne spørgeskemaer om tilfredshed med det visuelle indeklima og det afprøvede lyskoncept mere specifikt. Sidst på dagen blev de yderligere bedt om at vurdere de fire lyskoncepter op i mod hinanden.

Forsøgspersonerne var i alderen 19-37 år. De havde normalt syn eller brugte briller/linser samt normalt farvesyn, 45 kvinder og 38 mænd. Fuldt dataset eksisterer for 81 forsøgspersoner.

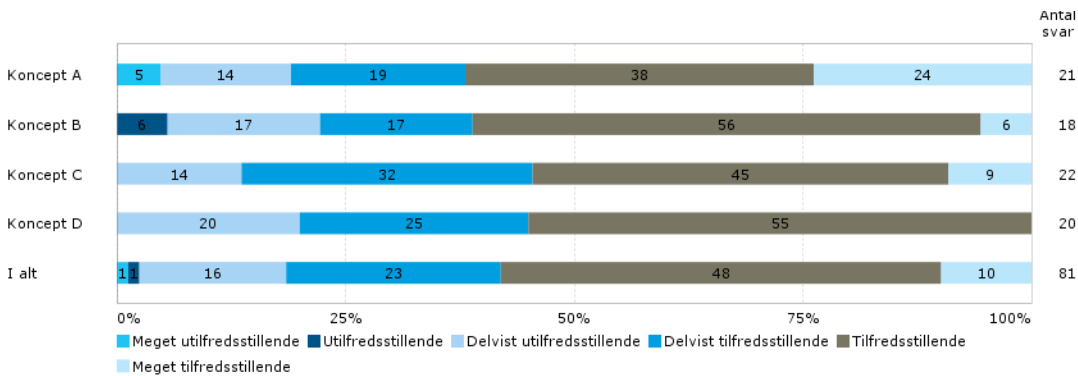
Resultater

For en detaljeret beskrivelse af tilfredshedsdataanalysen henvises der til (Logadottir, et al., 2013). Ifølge forsøgspersonerne arbejdede de på computer 69,2 % af tiden, læste fra papir 25,3 % af tiden og skrev på papir 5,5 % af tiden. Resultaterne som fremgår i denne rapport viser besvarelser fra de to sidste spørgeskemaer, besvarelser ved periode P4 (efter forsøgspersoner har oplevet alle lyskoncepter men bliver bedt om at vurdere det lyskoncept de er udsat for i løbet af perioden) samt det sidste spørgeskema om sammenligning af alle fire koncepter.

Rumbelysningen

Mellemværdi for vurdering af rumbelysningen lå et sted mellem 'delvist tilfredsstillende' og 'tilfredsstillende' uafhængigt af koncept. Se nærmere fordeling mellem de forskellige lyskoncepter i Figur 17. Tilfredshedsvurderingen viser generel tilfredshed med lysniveauerne i rummet for alle koncepter på

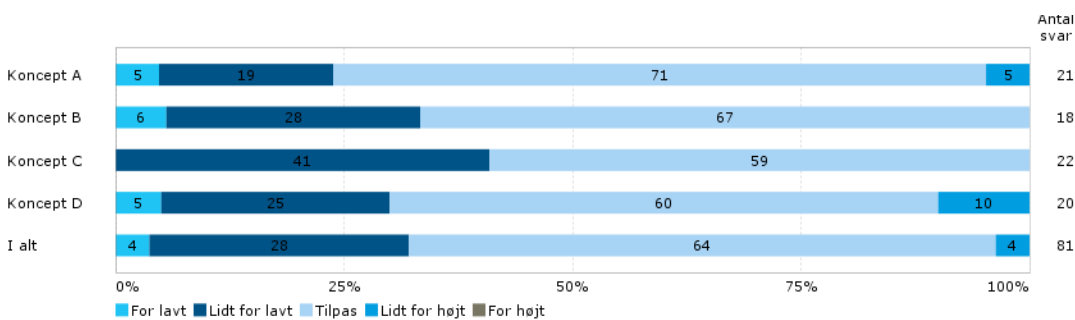
trods af at koncept A bidrager med en middelværdi for belysningsstyrke på 351 lux i lokalet og de øvrige koncepter kun med 177 lux.



Figur 17 Forsøgspersonernes tilfredshed med lysniveauet i rummet.

Forsøgspersonerne blev yderligere bedt om at vurdere lysniveauet i rummet på en skala fra 'for lavt' til 'for højt' og resultatet for de forskellige koncepter og det samlede resultat vises i Figur 18. Det viser sig heller ikke at være signifikant forskel mellem opfattelsen af lysniveauerne i rummet og i fleste tilfælde vurderes lysniveauet som værende tilpas.

Det at lysniveauerne i rummet ved de forskellige koncepter vurderes tilpas og tilfredsstillende af de fleste forsøgspersoner uanset om almenbelysningen bidrager med middelværdi af 351 eller 177 lux i lokalet viser at energiforbruget kan reduceres uden at gå på kompromis med disse brugeres oplevelse og vurdering af lysniveauet i rummet. Den korrelerede farvetemperatur var den samme for rumbelysningen i alle koncepter og blev også vurderet på samme måde for alle koncepter.



Figur 18 Forsøgspersonernes vurdering af lysniveauer i rummet.

Arbejdsbelysningen

Forsøgspersoner blev bedt om at tage stilling til hvor tilfredsstillende arbejdsbelysningen var ved de forskellige lyskoncepter og her var der signifikant forskel mellem lyskoncepterne både for lysniveauer samt korreleret farvetemperatur. Tilfredsheden var størst for lysniveauer og lysfarve på arbejdsområdet ved brug af koncept B og C som fremgår af Tabel 3. Koncept A var der mindst tilfredshed med og koncept D var gennemgående på tredjeplads hvad angår tilfredshed med lysniveauer og lysfarve. Det kan derfor konkluderes at muligheden for manuel styring af lyset medfører større tilfredshed med arbejdsbelysningen.

Tabel 3 Tilfredshed med lysniveauet (E) og lysfarven (CCT) på arbejdsområdet (1- 'meget utilfredsstillende', 2- 'utilfredsstillende', 3- 'delvist utilfredsstillende', 4- 'delvist tilfredsstillende', 5- 'tilfredsstillende', 6- 'meget tilfredsstillende')

		A	B	C	D
E [lux]	Middel	3,81	4,94	4,59	4,15
	STD	1,44	0,94	0,91	0,99
CCT [K]	Middel	3,76	4,78	5,09	4,00
	STD	1,38	0,65	0,87	1,12

Sammenligning af koncepter

Sidst på dagen blev alle 81 forsøgspersoner bedt om at sammenligne de fire forskellige lyskoncepter de havde oplevet i løbet af dagen. De blev bedt om at stille deres præference for lyskoncept op i en rækkefølge fra et til fire, hvor et er det mest foretrukne lyskoncept. Lyskoncept C kom på første plads (M= 1,77, STD=0,86), koncept B på anden plads (M= 2,1, STD= 0,85), koncept D på tredje plads (M= 3,02, STD=0,99) og koncept A på sidste plads (M= 3,11, STD=1,13). Analysen viser ikke en forskel på de to sidste pladser (koncept A og D) men ellers er der forskel mellem lyskoncepterne.

Konklusion af brugertest

Resultaterne er ikke omfattende for alle de forskellige muligheder man har for dynamisk belysning men kan medvirke til at give en indikation for den grad af dynamisk belysning, der ønskes i kontoromgivelser. Overordnet viser resultaterne at brugertilfredsheden øges ved brug af de dynamiske belysningskoncepter der er afprøvet i denne undersøgelse.

Til at optimere brugertilfredshed i kontoromgivelser anbefales at give brugerne mulighed for selv at have indflydelse på sine lysomgivelser, uanset om det er tale om justering af lysintensitet eller lysfarver.

Resultaterne bekræfter tidligere resultater om at brugerne er mere tilfredse, når de selv får indflydelse på sine lysomgivelser. Denne undersøgelse har vist at det gælder uanset om man sammenligner med en standard jævn belysning i hele rummet eller automatisk styret dynamisk arbejdsbelysning. Denne undersøgelse viser at af de forskellige dynamiske lyskoncepter som afprøves er det de koncepter med manuel styring som foretrækkes af brugerne og giver mest tilfredse brugere.

Det at lyskoncept C blev vurderet som det mest foretrukne lyskoncept samt at det medfører størst tilfredshed hos brugerne vurderes at være farvet af at muligheden for justering af korreleret farvetemperatur er ny for de fleste forsøgspersoner og bør derfor betragtes som en bias. Koncept D som ligger på niveau med koncept A kan også være influeret af den fejl som der opstod ved måling af dagslyset CCT forklaret i afsnit Lysstyring på side 18-19. Der var dog kun 18,5 % procent forsøgspersoner som opdagede ændringer ved lyskoncept D og derfor er det kun den del af forsøgspersonerne som muligvis er blevet generet af de store spring i farvetemperatur.

Til at optimere energiforbruget i kontoromgivelser anbefales der på baggrund af disse brugerundersøgelser at placere lyset på arbejdsområdet, og reducere i stedet belysningen i resten af rummet.

Resultaterne opnået i denne undersøgelse viser nemlig at vurdering og tilfredshed med rumbelysningen er den samme for de forskellige lyskoncepter uanset de forskellige belysningsstyrker på henholdsvis 351 lux og 177 lux i rummet.

Formidling

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

Videnskabelig publikation

De forskningsmæssige resultater af projektet bliver præsenteret ved et foredrag og en videnskabelig artikel (Logadottir, et al., 2013) på den, inden for belysning vigtige, konferencen "Towards a new century of Light" der markerer 100 året for *International Commission on Illumination* (CIE).

Ásta Logadóttir, Anne Iversen, Jakob Markvart, Dennis Dan Corell, Anders Thorseth, and Carsten Dam-Hansen, "Comparison Of User Satisfaction With Four Different Lighting Concepts", To be published, April (2013).

Præsentationer

Projektet og dets formål og indhold er blevet præsenteret ved en række forskellige sammenhænge, kurser, foredrag for samarbejdspartnere, og ved større møder

- Carsten Dam- Hansen, *LED til belysning*, forelæsning på Dansk Center for Lys kursus, 28-2-13.
- Anders Thorseth, Dennis Dan Corell, *LED and photovoltaic research and innovation at DTU Fotonik*, Foredrag ved DTU Afdelingen for Erhverv- og Myndighedsbetjenings månedsmøde, Risø campus 30-1-2013.
- Anders Thorseth, Dennis Dan Corell, *Projects and reacearch at DTU Fotonik LED Team*, Roskilde Håndværkerforenings, Foredrag og rundvisning til Gå-hjem møde, Risø campus, 7-11-12.
- Carsten Dam-Hansen, *LED til belysning*, forelæsning på Dansk Center for Lys kursus, 6-9-12.
- Anders Thorseth, Dennis Dan Corell, *Projects and research at DTU Fotonik LED Team*, MECINE Network møde på Risø campus, 7-6-2012.
- Carsten Dam-Hansen, *LED forskning og test laboratorier*, Dansk Lys arrangementet "Danmark Kina", 18-1-12.
- Carsten Dam-Hansen, *LED ved DTU Fotonik*, Medtech møde, 12-9-11
- Carsten Dam-Hansen, *LED activities at DTU Fotonik*, Møde med professor Liisa Halonen fra Alto Universitet, Finland, Risø campus, 10-1-12.
- Carsten Dam-Hansen, *LED – fremtidens lyskilde*, OpticsCamp 11, Sommerskoleundervisning af interesserede gymnasieelever, Risø campus, 4-7-11.
- Carsten Dam-Hansen, *LED teknologi; Test og karakterisering*, Efteruddannelse af Elfaglærere, Odense, 1-7-11.
- Carsten Dam-Hansen, *LED Research at DTU Fotonik*, Build Your Dreams, præsentation, Risø, 29-4-11.
- Carsten Dam-Hansen, *LED belysning – nu og i fremtiden i sundhedssektoren*, seminarpræsentation Risø, 29-3-11.

Referencer

ANSI, 2008. {ANSI NEMA ANSLG C78.377-2008}: Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting Products. I: s.l.:s.n.

Arthur, K., 2004. *Too Hot to Handle? An Investigation into Safe Touch Temperatures*, s.l.: s.n.

Bieske, K. & Schierz, C., 2010. *Dynamic Lighting - Perception of luminous colour variation*. s.l., CIE, pp. 290-297.

Bosua, P., 2012. *LIFX: The Light Bulb Reinvented*. [Online]

Available at: <http://www.kickstarter.com/projects/limemouse/lifx-the-light-bulb-reinvented>

Boyce, P., Hunter, C. & Howlett, O., 2003. *The Benefits of Daylight through Windows*, Troy: s.n.

Dam-Hansen, C., 2012. *Private communication*. s.l.:s.n.

Dam-Hansen, C. et al., 2007. Slutrapport for PSO 337-068 Udvikling af LED lyskilder og lamper, Risø-R-1606(DA).

Giménez, M. et al., 2011. Light and sleep within hospital settings. *Sleep-Wake Research In The Netherlands, Annual Proceedings of the Dutch Society for Sleep-Wake Research (NSWO)*, Årgang 22, pp. 56-59.

iGuzzini, u.d. *Sivra compact*. [Online]

Available at: <http://catalog.iguzzini.com/product.aspx?id=IGZ3948>

[Senest hentet eller vist den 10 12 2012].

Logadóttir, A. & Christoffersen, J., 2007. Elbesparelser gennem dynamisk lysstyring.. *Lys*, 19(3), pp. 18-20.

Logadóttir, A. et al., 2013. *Comparison of user satisfaction with four different lighting concepts*. s.l.:s.n.

Miller, C. et al., 2009. *NIST Spectrally Tunable Lighting Facility for Colour Rendering and Lighting Experiments*. s.l., s.n.

Ohno, Y., 2012. *Private communication*. s.l.:s.n.

OSRAM, 2012. [Online]

Available at: http://www.osram.com/osram_com/trends-and-knowledge/light-management-systems/product-knowledge/easy-color-control/index.jsp

Osram, 2012. *LINEARlight FLEX ShortPitch*. [Online]

Available at: http://www.osram.com/osram_com/products/led-technology/modules/flexible-led-modules/linearlight-flex-shortpitch/index.jsp

Panasonic Corporation, 2012. *EVERLEDS*. [Online]

Available at: <http://panasonic.jp/everleds/light/>

Panasonic Corporation, 2012. *LED CEILING LIGHT, Spring 2012*. s.l.:s.n.

Parans, 2012. [Online]

Available at:

http://www.parans.com/swe/customerservice/documents/20121004_Parans_Product_Specifications.pdf

Philips, 2010. *Philips Education Lighting Solutions*. [Online]

Available at: www.lighting.philips.com/me_en/solutions/education_lighting_solutions.wpd

[Senest hentet eller vist den 11 2012].

Philips, 2011. *HealWell - A new lighting solution*. [Online]

Available at:

http://www.lighting.philips.com/pwc_li/me_en/solutions/assets/solutions/HealWell_Brochure.pdf

[Senest hentet eller vist den 11 2012].

Philips, 2012. [Online]

Available at: <http://www.ecat.lighting.philips.com/l/indoor-luminaires/suspended/daywave/21759/cat/>

Riegens lighting, 2012. *Concido 150 LED*. [Online]

Available at: <http://riegens-lighting.dk/concido-150-led>

Wessolowski, N., Barkmann, C. & Schulte-Markwort, M., 2009. *Wirksamkeit von dynamischem Licht im Schulunterricht*, s.l.: Ergebnisbericht--Kurzform.

Wright, M., 2012. *Philips launches color-tunable ZigBee-based LED retrofit lamp*. [Online]

Available at: <http://ledsmagazine.com/news/9/10/25>