

Energioptimering med adaptivt lys i folkeskolen

Forskningsprojekt 2019-2021, støttet af ELFORSK.

Projekt nr: 351-008



Energioptimering med adaptivt lys i folkeskolen

Forskningsprojekt 2019-2021, støttet af ELFORSK.

Projekt nr: 351-008

PROJEKT DATA:

Titel:

Energioptimering med adaptivt lys i folkeskolen.
Forskningsprojekt 2019-2021, støttet af ELFORSK.
Projekt nr: 351-008

Projektleddelse:

Atelier KHR Architecture, forskningsleder Kjell Yngve Petersen, KHR Architecture A/S

Partnere:

Thisted Kommune, Erhverv og Teknik
Tilsted og Hanstholm Skoler
Station Inter Views, forsker, Karin Søndergaard
Roskilde Universitet, lektor Mikkel Bille
Lysteknik, Glamox A/S
Dansk Center for Lys

Bygninger:

Tilsted Skole, bygning 7, opført 1970. Arkitekt Jørgen Råby
Hanstholm Skole, bygning 2, opført 1967. Arkitekt: Henning Jørgensen & Arne Christensen.

Forfattere af rapporten:

Kjell Yngve Petersen
Karin Søndergaard
Mikkel Bille, afsnittet: 'Antroplogens Reflektioner'

Fotos:

Fotos generelt i publikationen er taget af Kjell Yngve Petersen & Karin Søndergaard
Elev fotos er taget af elever på Tilsted og Hanstholm skoler
Fotos i afsnittet: 'Antroplogens Reflektioner' er taget af Mikkel Bille

INDHOLDSFORTEGNELSE

ABSTRACT

- 6 Abstract - DK
- 7 Forskningsresultater
- 8 Abstract - UK
- 9 Research findings

RESUMÉ

- 11 ENERGIOPTIMERING MED ADAPTIV BELYSNING I FOLKESKOLEN
- 11 Adaptivt lys – tilpasning af lysmiljøer, brugerpraksis og energioptimering
- 12 Samskabende brugerintegrering, re-design og Living-Labs
- 12 Workshops og dukseordninger
- 13 Kvalitative parametre i lysdesign
- 13 Brugerstyret lysmiljø
- 13 Optimering af lys til undervisning
- 14 Energioptimering gennem adaptivt lys

Kapitel 1

- 16 SAMSKABELSE, INTERESSETER OG AKTIVITETER
- 16 Brugere som bygningens primære driftere
- 16 Primær-brugere, brugere og interessenter
- 17 Energioptimering og udvikling af bevidst brugerkultur
- 18 Citizen Scientists in the Classroom

- 19 SAMSKABELSENS KOMPONENTER OG ORGANISERING
- 19 Workshops
- 20 Dukseordninger
- 21 Living-Labs og re-design

- 22 WORKSHOPS – EKSEMPLER PÅ REALISERINGER
- 23 Foto-registreringer som metode til iagttagelse og forståelse af lysfænomener og lyssituationer
- 24 Lysdesign i modelkasser
- 25 Eleverne bygger og efterprøver selv model med styring og LED lysgiver
- 26 Camera Obscura observationer
- 27 Lys og skygge registrering med kegler, papir og blyant
- 28 Forskellige slags skygger
- 29 Lysmålinger

- 30 ANTROPOLOGENS REFLEKSIONER
- 30 Afrunding på Energioptimering med adaptivt lys i folkeskolen
- 31 1: Forindstillinger kan være gode anvisninger, men variationer ændrer energien
- 32 2: Lyset understøtter, men skaber ikke af sig selv, bedre læringsrum
- 32 3: At iscenesætte lys kan skabe forståelse for hinandens behov
- 32 4: Viden om lys forbedrer brugen af lys
- 33 5: Lærere ser aktiviteter, hvor elever søger stemninger

Kapitel 2

- 36 ETABLERING AF LIVING-LAB PÅ TO FOLKESKOLER 2019-21
 - 36 Hav, fjord og åben himmel
 - 36 Tilsted Skole
 - 39 Hanstholm Skole
- 41 LYSET UDE OG LYSET INDE
 - 44 Målte lysmiljøer på Tilsted Skole 16. okt. 2020
 - 45 Beregnede og målte lysforhold
 - 46 Målte lysforhold
 - 46 Dagslysforhold i testlokaler på Tilsted Skole
 - 47 Lysforhold i test- og referencelokaler med kunstlys tændt og slukket
- 48 LED LYSTEKNOLOGI – REED ARMATURER FRA GLAMOX
- 50 STANDARDEN DS/EN 12464-1
- 51 NYE KVALITETER I LED LYSKILDER
 - 51 Lysspektre, farvegengivelse, Kelvin og lyskilde teknologier
 - 52 Oplevelse af lys
 - 53 At leve med lys - spektralfordelingens biologiske og perceptive indflydelse
- 55 BETYDNINGEN AF SPEKTRALFORDELINGEN I LYSMILJØET FOR UNDERVISNINGSMILJØET
- 56 DAGSLYSKVALITETER I NYERE LED
 - 56 SunLike LED'er fra Seoul Semiconductor
 - 56 DAY og NITE LED'er fra Samsung
 - 57 Mere dagslys og dagslys LED som del af et dagslys-baseret lysmiljø
 - 57 CREE spektralfordeling J-series 2835 LED

Kapitel 3

- 60 INTERFACEDESIGN OG ENERGIOPTIMERING
 - 60 Interfacedesign og brugeradgang
 - 61 Lysmiljøer som service for undervisningsmiljøer
 - 62 Store krav til tekniske detaljer i interfacedesign med adaptivt lys
 - 63 De tekniske installationer: LED armaturer, styringsinfrastruktur og brugerinterface
 - 64 Lysscenarier i klasselokaler
 - 67 Touch-panel interface til adaptivt lys
 - 67 Styring og sensor
 - 67 Adaptivt kunstlys som pædagogisk værktøj og didaktisk markør
 - 68 Generel dataindsamling i testlokaler og omgivelser
 - 70 Specifik dataindsamling i testlokaler og omgivelser
 - 70 Samskabelse og Citizen Scientists in the Classroom
 - 71 Data og energioptimering

Kapitel 4

74 ENERGIOPTIMERING MED ADAPTIVT LYS

- 74 Folkeskolen
- 74 Elbesparelser med brugerkultur snarere end bygningsstyring
- 74 Det adaptive system – koordinering af dynamiske systemer
- 75 Elbesparelser ved dynamisk brugerstyret tilpasning af kunstlyset
- 75 Elbesparelser ved øget variation i forbrugsmønstret
- 76 Grafer fra Neogrid med datavisning
- 77 Elforbrug til kunstlys med adaptivt lys

78 ENERGIBESPARELSER VED JUSTERING AF KUNSTLYSET

- 78 Elbesparelser ved valg af 4000-5500 Kelvin farvetemperatur i normalbelysning
- 78 Elbesparelse ved øget dagslyskvalitet i kunstlyset og integrering med dagslys
- 78 Photopic Light farvefordeling i kunstlyset
- 79 Melanopic Light farvefordeling i kunstlyset
- 79 Elbesparelser ved tilpasset lysfordeling mellem indirekte og direkte belysning

80 ENERGIBESPARELSER VED INTEGRERING MED DAGSLYSET

- 80 Elbesparelse ved mere fleksibel solafskærmning
- 81 Elbesparelse ved re-design og re-allokering af Smartboards
- 81 Elbesparelse ved varieret brug af rummet

82 ENERGIOPTIMERING MED TEKNISK INNOVATION

- 82 Påvirkning af energiforbruget af lyskildernes lyskvalitet
- 83 Sammenhænge mellem energiforbruget og pris på LED lysgivere
- 83 Påvirkning af energiforbruget af produktets levetid
- 84 En cyklus af udskiftning som grundbetingelse for bæredygtig optimering
- 84 Energioptimering med klarere brugerkrav ved renovering og nybyggeri

BILAG

88 FORMIDLING – PUBLIKATIONER, PRÆSENTATIONER OG EVENTS

- 90 Fagbladsartikel, Energioptimering med adaptivt lys i folkeskolen
- 93 Fagbladsartikel, Udstilling af lysinstrumentet Digital Weather på Thisted Bibliotek
- 94 Fagbladsartikel, Erfaringer med adaptivt lys i folkeskolen
- 96 Forskningsartikel, Energy optimisation with adaptive light in primary schools
- 97 Forskningsartikel, Re-appreciation of people's engagement with Nordic Light

98 Udstillinger på Bibliotek

- 99 Værk og værktekst til udstilling af Digital Weather, Thisted Bibliotek
- 100 Projekt præsentation, udstilling Thisted Bibliotek
- 101 Vægplakater, udstilling Thisted Bibliotek
- 102 Liggende plakat, udstilling Thisted Bibliotek

ABSTRACT**ENERGIOPTIMERING MED ADAPTIV BELYSNING I FOLKESKOLEN**

Kan man skabe bedre belysning gennem brugerinddragelse og samtidig opnå betydelige energibesparelser? Kan man energi-optimere ved at engagere elever og lærere i eksperimenter med LED-lys? Hvordan kan et fokus på klimatisk og social bæredygtighed understøtte et fremadrettet, pædagogisk læringsmiljø? Projektet har undersøgt disse spørgsmål i praksis.

Projektet har installeret adaptiv belysning i klasselokaler på Tilsted og Hanstholm folkeskoler. Gennem en 18 måneders lang samskabelsesproces designs og re-designs lokalerne med justerbare LED-lysgivere, tætte sensor netværk, og adaptive kontrolsystemer. På tværs af årstider, undervisningsforløb og sociale situationer gennemtestes lysinstallationerne, med detaljerede vurderinger af energiforbrug, bygningsøkonomi og kvaliteten af lysmiljøerne oplevet fra brugerperspektivet.

Forskningen sker i et tæt samarbejde mellem designere, arkitekter, bygningsdrift, producenter og – ikke mindst: slutbrugerne. Ved at involvere lærere og elever, kan vi kvalificere driften af lyset. Ved at deltage i deres dagligdag med læringsaktiviteter, informere via workshops og give dem en stemme i designudviklingen, bliver de selv i stand til at udtrykke, hvornår en belysning virker understøttende i deres hverdag – og hvorfor.

Folkeskolen danner rammen om hverdagen for børn det meste af de aktive dagtimer. Skolen er samtidig en arbejdsplads, et læringsmiljø og et socialt fællesskab med mange og varierede aktiviteter. Hver aktivitet stiller sine krav til lysmiljøet, og hver person har sine behov for kvaliteten af omgivelserne. Det meste af dagen er dagslyset en vigtig kilde til lys, og helt essentiel for velvære og sundhed.

Hypotesen er at energiforbruget til kunstigt lys kan mindskes ved øget tilpasning til de konkrete brugeres behov og deres varierede brug af lokaler og fællesarealer. At der kan spares energi ved design af adaptivt lys, som gennem bruger-styret dynamisk tilpasning frembringer det relevante lys på rette sted og til rette tid, og derved bedst mulig befordrer læring og trivsel i folkeskolens daglige praksis.

FORSKNINGSRESULTATER

ENERGIOPTIMERING MED ADAPTIVT LYS

– POTENTIALER VED SKOLERNES INDRETNING, DRIFT OG RENOVERING

Gennem den pågående udvikling af lysteknologier kan der, de næste 5-10 år, opnås besparelser på elforbrug på op mod 30%. Den afgørende tilpasning til de aktuelle 70% klimamål kræver en forandret brugeradfærd og fleksibilitet i elforbruget. For at opnå de manglende 40-50% besparelser bør slutbrugerne således engageres i den daglige drift.

Projektet viser, at der opnås energioptimerende adfærd i skolen, når elever og lærere, gennem medbestemmelse, udvikler kompetencer og ansvar for den daglige indstilling af lysmiljøer. Det viser at kunstlys benyttes mere energibesparende, når der etableres lysmiljøer, der tager afsæt i skolernes undervisningsaktiviteter og derved, med trivsel i fokus, understøtter nutidens læringsmetoder. Man kan således sige, at adaptivt lys koordinerer brugerengagement med energioptimering og at bæredygtige løsninger forankres gennem kompetente brugere.

Projektet viser, at der er energioptimeringspotentialer ved en helhedsorienteret tilgang, hvor følgende fokus kan medføre besparelser i elforbruget:

Adaptivt lys koordinerer brugerengagement med energioptimering

1. at adaptivt lys engagerer slutbrugerne – elever, lærere og driftspersonale – i energioptimerende adfærd
2. at adaptivt lys kan udvikle nye fleksible løsninger ved at koordinere mellem dynamikkerne i: dagslyset, brugerbehov, brugerstyring og dynamisk kunstlys
3. at adaptivt lys understøtter undervisningsmiljøet, som en service for de didaktiske metoder, med fleksible lysmiljøer

Bæredygtige løsninger forankres gennem kompetente brugere

4. at bæredygtige løsninger er afhængige af at slutbrugerne gives kompetencer til at navigere energioptimering, – og styrkes ved forankring i både brugerengagement og bygningsforvaltning
5. at adgang til informationer om bygningsdriften og indeklimaet er afgørende for uddannelse af slutbrugere, der kompetent kan styre deres daglige lysmiljø og udvikle energioptimerende adfærd
6. at energioptimering kan accelereres med engageret brugerkultur, understøttet af intelligent bygningsstyring, hvis der holdes fokus på at opnå optimale løsninger for slutbrugerne

Mere dagslys influx mindsker energiforbruget til kunstlys

7. at arkitektoniske forbedringer, der giver mere dagslys i bygningen, medfører mere varieret brug af lokalerne og mindsker energiforbruget til kunstlys
8. at varieret indstilling af kunstlyset – og varieret lysfordeling mellem indirekte og direkte belysning – indretter bedre tilpassede lysmiljøer
9. at øget dagslyskvalitet og dagslysspekter i kunstlyset mindsker brug af kunstlys

Adaptivt lys optimerer bæredygtigheden af elforbruget til kunstlys

10. at implementering af et mere bæredygtigt energiforbrug til kunstlys kan skaleres bredt og hurtigt
11. at energioptimeringen øges med klarere formulerede brugerkrav ved renovering og nybyggeri
12. at teknologiudvikling de næste år vil bidrage væsentligt til optimering af elforbruget til kunstlys, og man derfor skal arbejde med installationer, der jævnligt kan opdateres, for at understøtte en vedvarende bæredygtig udvikling

ABSTRACT**ENERGY OPTIMIZATION WITH ADAPTIVE LIGHTING IN PRIMARY SCHOOLS**

Can better lighting be created through user involvement and achieve significant energy savings at the same time? Can energy optimization be achieved by engaging students and teachers in experiments with LED lighting? How can a focus on climate and social sustainability support a forward-looking pedagogical learning environment? The project has explored these questions in practice.

The project has installed adaptive lighting in classrooms at Tilsted and Hanstholm primary schools. Through an 18-month co-creation process, the rooms are designed and re-designed with adjustable LED light sources, dense sensor networks, and adaptive control systems. Across seasons, curricula and social situations, the lighting installations are tested, with detailed assessments of energy consumption, building economics and the quality of the lighting environments experienced from the user perspective.

The research is carried out in close collaboration between designers, architects, building operators, manufacturers and - not least: end-users. By involving teachers and students, we can qualify the operation of light. By participating in their daily lives with learning activities, informing through workshops and giving them a voice in design development, they themselves are able to express when lighting is supportive in their daily lives - and why.

Primary schools are the setting for children's everyday lives for most of the active day. It is also a workplace, a learning environment and a social community with many and varied activities. Each activity has its requirements for the lighting environment and each person has his or her needs for the quality of the environment. For most of the day, daylight is an important source of light and essential for well-being and health.

The hypothesis is that energy consumption for artificial lighting can be reduced by increased adaptation to the needs of the specific users and their varied use of premises and common areas. That energy can be saved by designing adaptive lighting which, through user-controlled dynamic adjustment, produces the appropriate light in the right place at the right time, thereby best promoting learning and well-being in the daily practice of primary schools.

RESEARCH RESULTS

ENERGY OPTIMISATION WITH ADAPTIVE LIGHT

- POTENTIALS IN SCHOOL DESIGN, OPERATION AND RENOVATION

Through the ongoing development of lighting technologies, electricity savings of up to 30% can be achieved in the next 5-10 years. The crucial adaptation to the current 70% climate targets requires a change in user behaviour and flexibility in electricity consumption. To achieve the missing 40-50% savings, end-users should thus be engaged in daily operations.

The project shows that energy-optimising behaviour in schools is achieved when students and teachers, through participation, develop skills and responsibility for the daily setting of lighting environments. It shows that artificial lighting is used more energy efficiently when lighting environments are created that are based on the educational activities in schools and thereby, with well-being in focus, support today's learning methods. It can thus be said that adaptive lighting coordinates user engagement with energy optimisation and that sustainable solutions are anchored through competent users.

The project shows that there is energy optimisation potential in a holistic approach, where the following focus can lead to savings in electricity consumption:

Adaptive lighting coordinates user engagement with energy optimisation

1. adaptive lighting engages end users - students, teachers, and operational staff - in energy optimising behaviour
2. adaptive lighting can develop new flexible solutions by coordinating between the dynamics of: daylighting, user needs, user management and dynamic artificial lighting
3. adaptive lighting supports the learning environment, as a service to the didactic methods, with flexible lighting environments

Sustainable solutions are anchored through competent users

4. sustainable solutions rely on end users being empowered to navigate energy optimisation, - and are strengthened by anchoring in both user engagement and building management
5. access to information on building operations and indoor climate is essential for training end-users to competently manage their daily lighting environment and develop energy optimising behaviours
6. energy optimisation can be accelerated with an engaged user culture, supported by intelligent building management, if the focus is maintained on achieving optimal solutions for end-users

More daylight influx reduces energy consumption for artificial lighting

7. architectural improvements that provide more daylight in the building lead to more varied use of the premises and reduce energy consumption for artificial lighting
8. varied artificial lighting settings - and varied light distribution between indirect and direct lighting - create better adapted lighting environments
9. increased daylight quality and daylight spectrum of artificial lighting reduces the use of artificial lighting

Adaptive lighting optimises the sustainability of electricity consumption for artificial lighting

10. implementation of more sustainable energy use for artificial lighting can be scaled widely and quickly
11. energy optimisation is increased with more clearly formulated user requirements for renovation and new buildings

12. technological developments in the coming years will contribute significantly to the optimisation of electricity consumption for artificial lighting, and therefore demands light installations that can be regularly updated to support sustainable development

RESUMÉ

ENERGIOPTIMERING MED ADAPTIV BELYSNING I FOLKESKOLEN

Mange folkeskoler står overfor bæredygtige opgraderinger af deres kunstlys. Det indebærer implementering af LED-belysninger med andre og nye lyskvaliteter og styringsmuligheder end tidligere. Hvilke nye potentialer for lysmiljøet udfolder LED-teknologierne, for den daglige undervisning og kvaliteterne af skolens lysmiljøer? Og hvad omfatter disse nye potentialer af bæredygtige muligheder for ressourceforbrug og energioptimering?

Dette projekt er udviklet i et samarbejde mellem KHR Architects forskningsafdeling og Thisted Kommune og foregår i to eksisterende skolebygninger beliggende i Tilsted og Hanstholm i Thy.

Projektet undersøger om installationen af nye belysningsteknologier – der med fokus på klimatisk og social bæredygtighed skal understøtte et fremadrettet, pædagogisk læringsmiljø – også kan føre til bæredygtig energioptimering.

Projektets hypotese er, at hvis lysdesignet giver muligheder for høj lyskvalitet og kvalitative lysmiljøer, og man samtidig giver brugeren adgang til kontrol af de adaptive styringer, så vil man i højere grad kunne energioptimere bæredygtigt. Kan brugernes egenkontrol med styring af kunstlyset generere et andet forbrugsmønster, der potentielt vil kunne udnytte energien bedre?

Samtidig undersøges hvordan undervisningen benytter de nye muligheder for variation i lysmiljøet, og hvad det stiller af krav til producenter og designere af fremtidens lysdesign i skoler. Projektet arbejder derfor med samskabende brugerintegrering, og interesserer sig særligt for, hvordan adaptiv belysning, som en faktor for indeklimaet samtidig kan stimulere undervisningsmiljøet. Derfor har det været essentielt at indgå i samskabende udvekslinger med lærere, elever og teknisk personale på skolerne og i kommunen, for at undersøge hvordan belysningsteknologierne kunne tænkes som en kontekst, der understøtter pædagogiske metoder, og som kan integreres i den daglige undervisningspraksis.

Adaptivt lys - tilpasning af lysmiljøer, brugerpraksis og energioptimering

Det adaptive betyder "tilpasning". Med de nye belysningsteknologier følger nye potentialer med temporært flydende lysdesigns og provisoriske rumdannelser. De nye belysningsteknologier arbejder, ligesom dagslyset, med både vekslende lysfarver og omskiftelige intensiteter. Lysdesignere og forskere må således søge stadig nye forståelser i potentialet af belysningssituationer og af lysets iscenesættende kvaliteter. Tænd/sluk-lyset er ved at være fortid. Kunstlyset kan integreres i intelligente systemer med sensorer og datainput og således spille sammen med brugerne og omgivelserne i dynamiske udvekslinger.

Dog, med alle disse tekniske muligheder, lurer den fare, at brugerens belysning i en fremtid styres af rigide og ufleksible, forudbestemte lysscenerier. Det kan være dagslysstyring sat ud fra idéer om døgn- rytmer hos brugerne. Eller bevægestyring fra sensorer sat ud fra ideer om brugernes handlinger. Andre muligheder er faste sæt af scenarier, som tænkes passende for brugerens behov i dagligdagen eller management bestemte optimeringer af medarbejderperformance. Dette kan alt sammen være spekulationer, som brugerne hverken er ordentlig bevidstgjorte om, har givet tilsagn til, eller har mulighed for at undslippe.

I denne fagre, nye verden må vi derfor til stadighed stille kritiske spørgsmål til, i hvor høj grad vi vil styres af dataopsamlinger og for-programmeringer, og hvorvidt det er vigtigt, at brugeren selv kan styre basale behov – som at kunne styre lyset og åbne vinduer. I dette projekt lægges der vægt på, at brugeren, som den kompetente borger, tildeles råderum til kontrol med sit miljø. Således tager undersøgelserne udgangspunkt i en pragmatisk tilgang, hvor brugerens handlinger og egne perceptioner tænkes som de primære parametre i styringen af det indendørs klima.

Samskabende brugerintegrering, re-design og Living-Labs

Projektet udfører konkret transformation af lysmiljøet i afgrænsede arealer på de to folkeskoler. Undersøgelsen er sat op som komparative forsøg, hvor der på hver skole er to klasseværelser, som er ombygget med ny belysning, og to der fremstår, som da projektet startede. På begge skoler er desuden flere fællesarealer medtaget i undersøgelserne om belysningstransformation, da væsentlige dele af den daglige undervisning foregår udenfor klasseværelserne i de fælles arealer.

Den samskabende brugerintegrering er gennemført dels i form af workshops med elever og lærere, hvor vi – med fokus på både dagslys og kunstlys – har undersøgt lyset som arkitektonisk materiale, og udforsket hvordan lyset iscenesætter rumlige situationer. Da der er tale om et forskningsprojekt, har vi kunnet afsætte tid til en analytisk og transformativ proces med re-design, hvor alle deltagende parter lærer af hinanden.

Det adaptive lys installeres således i klasselokaler og fællesarealer gennem en 18 måneder lang proces af samskabelse, re-design og gensidig læring. Lokalerne fungerer som aktive living-labs, der involverer lærere og elever, forskere, pedeller og kommunens tekniske forvaltning, samt skoleledere og skoleforvaltning. Sammen med kommunens tekniske servicefolk og lokale elektrikere, gennemført længere processer af re-designs og tests, hvor installering af lysdesign og styringssystem i en periode afprøves og tilpasses forskellige undervisningssituationer.

En væsentlig del af det adaptive lysdesign og ambitionen om bæredygtighed er baseret på idéen om velinformerede, indsigtfulde slutbrugere til at varetage den daglige drift. Folkeskolerne i Tilsted og Hanstholm har fungeret som et laboratorium, hvor man har bidraget aktivt med et udforskende brugerperspektiv.

Lokalerne om-designes med justerbare lyskilder og armaturer, adaptive styringssystemer, sensor netværk og målere af strømforbrug. Desuden opsamles data vedrørende øvrige indeklima-parametre herunder luftkvalitet, lydniveau, temperatur og fugtighed. Dette for i sidste ende at kunne vurdere det samlede indeklima.

Workshops og dukseordninger

I samskabelsesprocessen omkring det nye kunstlys udvikler alle involverede et fagligt sprog om lys og indføres i kompetencerne til at kunne bestemme lysmiljøet. I en serie workshops involveres lærere og 5. - 6. klasses elever i grundlæggende forståelser af dagslys og kunstlys, lysfænomener, rumlige lysituationer og lysteknologi. De introduceres til, hvordan lyset fordeles og reflekteres til rumlige kvaliteter. Gennem observation og analyse foretager de visuelle studier af lyssteder, lysforekomster og lysscenerier. For at kunne give sprog til lysmiljøets kvaliteter, effekter og funktioner, indføres de i metoder til at observere og notere lyskvaliteter og lyskvantiteter. Således stilles der opgaver i workshopsene. Lysværdier undersøges gennem lysmålingsopgaver, hvor eleverne håndterer lux-målere og spektralfordelings-målere og analyserer, hvordan lysets karakteristisk opstår fra lyskilder og dagslys.

Gennem klassens almindelige dukseordning har de to ugentlige dukse ansvar for dagens lysdesign i klasserummet. Dukse laver notater om det daglige lysmiljø, og leverer rapporter omkring lysindstillinger og lyskvaliteter til forskerne. Børnene lærer relativt hurtigt at styre lysdesignet, og de er generøse i deres videndeling med teknisk service og lærere.

Kvalitative parametre i lysdesign

De nye lysinstallationer skal understøtte det nutidige læringsmiljø og den pædagogiske indsats, som skolerne i dag forpligter sig på. Designet tager afsæt i diskussionen om læringsmiljøet som sociale situationer, hvor et spekter af helt praktiske forhold bliver væsentlige for lysmiljøet. For eksempel skal lysmiljøet understøtte sociale situationer og gruppearbejder, etablere visuelt samvær mellem elever og lærer, og befordre at man bevæger sig og har kalibreret udsigt. Det nye lysdesign er en arkitektonisk afvejning af lyskilder og lysindfald. Kunstlyset indstilles i dynamiske variationer i samspil med dagslyset. Der etableres balancer mellem uplight og downlight hvorved der skabes kompositioner af diffust og rettet lys. Der formes vandrette og lodrette flow med refleksioner af lys, som skaber mere rumlige lysvolumener – eller cylindrisk lys – hvorved skyggefordelingen dog varieres med mere diffuserede skygetegninger.

Brugerstyret lysmiljø

Det nye design af lyssystemet giver brugerne adgang til at styre de kvalitative parametre af lysmiljøet. Lyset styres med enkle kryds-knapper, der er monteret, så alle kan være med - inklusive elever. Gennem det daglige design af lyset opbygger elever og lærere en nuanceret forståelse af lysmiljøer, som de er i stand til at beskrive, ønske, iscenesætte og diskutere, og altså tage indsigtsfuldt ansvar for i designet af sit eget lysmiljø.

Optimering af lys til undervisning

I et bæredygtigt perspektiv er der store potentialer med adaptivt lysdesign. Spørgsmålet er, om man ikke kan opnå lige så gode optimeringer af økonomi og energi med den bedste kvalitet og det rette lys, som ved løsninger, hvor kun det lovmæssigt krævede minimum i lysmiljøet overholdes? Kan brugerkulturer omkring lys optimere bedre end tekniske løsninger med automation? Hvis lyset er der for at understøtte undervisningens aktiviteter, hvilke krav og muligheder skal der så stilles til lysmiljøet og dets tilpasningsmuligheder?

Fleksibilitet og brugerengagement er forudsætningen for yderligere bæredygtighed i fremtiden. Det adaptive lysdesign befordre, at lyset hele tiden justeres til det niveau, som der er behov for. Mulighederne for at justere balancen mellem diffust og rettet lys, variere lysfordelingen opad og nedad, og forandre lysfarven til koldere og varmere, gør at der benyttes meget mere tilpassede lysforhold til undervisningens aktiviteter. Med de nye lysinstallationer er rullegardiner, som tidligere næsten altid var rullet ned, nu næsten altid oppe. Dagslyset er blevet en ressource snarere end et problem, og det adaptive lys sikrer meget mere dagslys i dagligdagen.

Energioptimering gennem adaptivt lys

Inddragelse af kompetente brugere er en vigtig forudsætning for en bæredygtig brugerkultur omkring lys, hvor ressourcer og behov balanceres i den daglige undervisning. Brugernes engagement udvikler en øget viden omkring lys og beforder kompetent indflydelse på lysmiljøet. Det adaptive lysdesign opnår energioptimering ved fleksibilitet i lysmiljøet, konkret styret af brugerne, og gennem udvikling af en bæredygtig brugerkultur.

KAPITEL 1

SAMSKABELSE, INTERESSETER OG AKTIVITETER

Brugerne som bygningens primære driftere

Med et overordnet fokus på energioptimering, interesserer projektet sig for, hvordan adaptiv belysning, som en faktor for indeklimaet, samtidig kan stimulere læringsmiljøet. Opdateringen af belysningen i klasseværelser og fællesrum tager således afsæt i undersøgelser af belysningssituationer, der understøtter nutidens læringsmetoder.¹

Som det ofte indikeres, har implementering af ellers tilsigtede klimavenlige teknologier kun begrænset effekt, hvis ikke brugerne samtidig opnår nye indsigter og forståelser for, hvordan man anvender og driver teknologierne bæredygtigt. Og ofte er LED-belysning installeret med for-programmeringer og tilkoblet sensor-data, der ikke nødvendigvis fungerer optimalt i hensynet til den daglige praksis.²

En væsentlig del af det adaptive lysdesign og ambitionen om bæredygtighed er her baseret på ideen om velinformerede, indsigtfulde og kompetente slutbrugere til at varetage den daglige drift. Med dette projekt tager vi således udgangspunkt i en forståelse af brugeren – eller nærmere en brugerkultur som driver af skolens indeklima.

Som kalibrerende omdrejningspunkter i løbet af processen har vi opretholdt spørgsmålene:

- Hvad/hvem bør servicere hvad/hvem i teknologi/bruger forholdet?
- Hvordan sætter teknologien rammer for menneskers adfærd?
- Hvornår tvinges brugeren ind i et rigtigt teknologisk styret adfærdssystem?
- Hvordan skal teknologien danne en fleksibel ramme for brugeren?

Primær-brugere, brugere og interessenter

Som konsekvens har det været essentielt at etablere samskabende processer, hovedsagligt med fokus på primærbrugerne – altså elever og lærere. På skoleledelsernes foranledning, blev det besluttet at invitere skolernes natur- og teknologilærere til at deltage sammen med deres elever i 5. - 6. klasse.

Det har været et væsentligt aspekt for os, at brugerne tildeles råderum til kontrol med egen lysmiljø. Derfor har vi vægtet anskuelsen om primær-brugerne som kompetente og ansvarsfulde borgere i deres kvalitative undersøgelser og analyser i løbet af processen. Undersøgelserne tager således udgangspunkt i en pragmatisk tilgang, hvor brugerens handlinger og egne perceptioner tænkes som de primære parametre i styringen af det indendørs lysmiljø, som er deres hverdag.

Udover elever og lærere, medvirker skoleledelser og Teknisk Service på skolerne som brugere i projektet. Teknisk Service på skolerne har en position, hvor de refererer til skoleledelsen. Men samtidig er deres arbejde med skolernes vedligehold økonomisk styret af en kommunal afdeling, som gennem overordnede prioriteringer sætter de økonomiske rammer.

¹ Ricken, Winnie (2011) *Samspil mellem læringsaktiviteter og fysiske rum*. <https://www.blivklog.dk/laeringsaktiviteter-og-de-fysiske-rum>.

² Slot, Babette Peulicke (2021) *Undervurderer du også brugeradfærd?* <https://pro.ing.dk/facilitytech/article/undervurderer-du-ogsaa-brugeradfærd-12100>.

Gennem deres dagligdag på skolerne blandt elever og lærere, besidder skolernes Teknisk Service medarbejdere en indsigt og erfaring med indeklimateknologier, der opstår for skolens brugere. I deres position kan de observere, hvordan forandringer – f.eks. nye skolereformer, nye bygningsreglementer eller ny teknologi – løbende skaber nye forudsætninger for brugerne af skolebygningerne. Hvordan sikrer man, at denne viden kommunikeres til de kommunale ansvarshavende afdelinger – her Teknik og Erhverv, og at Teknik og Erhverv tager denne viden i anvendelse?

I dette projekt har kommunens afdeling for Teknik og Erhverv været aktive interessenter. De har været initiativtagende til projektet og de har deltaget i realiseringen. Det har været helt essentielt at Teknik og Erhverv også i praksis har deltaget i et tæt samarbejde med skolernes Teknisk Service medarbejdere, forskere og designere, hvor løsninger er blevet diskuteret ud fra projektets målsætninger. På denne måde har projektets videns-generering forankret sig i alle led. Man har allerede på nuværende tidspunkt (sommer 2021) installeret identiske adaptive lyssystemer i flere klasselokaler og fællesrum på skolerne, som en del af de løbende renoveringer i kommunen.

Teknik og Erhverv har deltaget med en projektvejleder og en fast tilknyttet energimedarbejder. Teknik og Erhvervs engagement i projektet har betydet, at der kunne træffes beslutninger i relation til projektundersøgelserne og at beslutninger blev effektueret. F.eks. har det været betydende for den fremadskridende proces, at energimedarbejderen fra Teknik og Erhverv havde mandat til at indkalde eksterne installatører og elektrikere, således tingene blev gjort, også de opgaver man hverken hos Teknik og Erhverv eller skolernes teknisk service, selv havde faglighed til at løse.

I de afsluttende interviews med brugere og interessenter (her skoleledelse, skolers tekniske service og lærere) ønskede vi at afklare et tvivlsspørgsmål om, hvorvidt det ville være mere effektivt, mere videns-opbyggende og mere forankrende, hvis vi havde haft mindre fokus på elever som primær-brugere og evt. i stedet havde etableret en bredere kontaktflade med flere lærere. Vi fik det entydige svar, at det var det helt rigtige at tage udgangspunkt i eleverne. Dette er bedst forklaret af en lærer i det evaluerende interview: "[Workshopsene] med børnene har været det helt rigtige, fordi jeg [som lærer og observant i workshoppene] har skullet sætte mig på deres niveau [i deres situation] og forstå [dem]. [...] Jeg kunne have ønsket mig en kollega med [som permanent observant] for at have nogen at vurdere det sammen med [og diskutere et overordnet perspektiv]".

Energioptimering og udvikling af bevidst brugerkultur

I samskabelse lærer man begge veje. Gennem workshops har lærere, elever og teknisk service fået indblik i, hvad der indgår i begrebet arkitektonisk belysning og det at skabe lyssituationer. Og forskere, lysdesignere og Teknik og Erhverv har fået et dybere indblik i skolens brug af de eksisterende bygninger, herunder den pædagogiske praksis, nutidige læringsmetoder og de sociale situationer, som et lysdesign på en skole bør servicere.

Gennem samskabelsens forskellige komponenter (workshops, dukseordninger, Living-Labs, re-design og udstilling), har vi søgt at etablere en videns-opbyggende relation til lyset som redskab, i et forbedret indeklima. I denne proces, hvor vi medtænker indflydelse, ansvar, bevidsthed og bruger-handlekraft som kernebegreber i et energioptimerende perspektiv, opbygger vi reelt en fornyet kultur med en fornyet bevidsthed om oplevelsesparametre for, hvad belysning bevirker og hvornår belysningen er god til hvad.

Man kan sige at selve projektets operation med de mange deltagere skaber en kulturelig-gørende effekt med re-defineringer af et lysmiljø, der benytter sig af de potentialer, som led-teknologien har medført.

Kompetente brugere er en vigtig forudsætning for en bæredygtig brugerkultur omkring lys, hvor brugernes engagement udvikler en øget viden omkring lys og beforder kompetent/optimerende indflydelse på lysmiljøet.

Citizen Scientist in the Classroom

Man møder ofte en holdning om at yngre elevers adgang til lysstyring er uønsket, at børn ikke kan betragtes som kompetente brugere, og at styringssystemer, hvad enten der er tale om kontakt-paneler eller touch-screens, gerne skal placeres udenfor børnenes rækkevide.

Dertil eksisterer der en tilgang indenfor belysnings-erhvervet, hvor der i spørgsmålet om lyskvalitet er en udbredt konsensus om, at brugere alligevel ikke kan se forskel i de forskellige grader af farvegengivelse (RA-værdier) og heller opleve det kvalificerende spektrale indhold i lysmiljøet. Der er altså tale om en bevidst underkendelse af menneskets biologiske og perceptive kapaciteter, som vel ellers netop burde udgøre et mål for belysningskvaliteter.

Således hersker der – ifølge de elektrikere, installatører og designere, som har deltaget i dette projekt – en generel strategi i belysningsbranchen om at nedgradere kvaliteten i belysningskvaliteter til fordel for relativt små økonomiske besparelser.

Derfor beder vores kolleger i belysnings-erhvervet os om, højt og tydeligt, at fremføre overfor (de kommunale) bygherrer, at de bør stille krav til belysningskvaliteter frem for at tælle små tal i bundlinjer, når de uddelegerer opgaver. Det er ikke længere teknologiudviklingen, der begrænser, men derimod viden om teknologiens anvendelse der afgør, om bygherrer kan tage det kvalitative valg og gennemføre det. Problemet er blot, at ikke ret mange bygherrer kender til kvalitetsparametre som lys og rumforhold, RA-værdier og spektralt indhold, eller belysning i relation til undervisningspraksis.

Så – hvordan kommer vi væk fra en fokus på korttids-perspektiverende bundlinjer og hen til fremtidsperspektiverende løsninger med fokus på de omsiggribende aktuelle klimatiske problemer? Hvordan understøtter vi løsninger, der modner og giver mod til den kompetente bruger, som gennem udvikling/selvudvikling tager ansvar for helhedsperspektiver?

I dette projekt har konceptet 'Citizen Scientist in The Classroom'³ – hvor unge borgere indgår i innovative lærings-projekter, som vedrører deres egne livsvilkår – styrket vores vedholdenhed til at tænke brugeren som den ansvarsfulde og kompetente borger. Og læsninger af artikler, der beskriver konceptet og forskellige realiseringer på skoler rundt omkring i verden, har skabt inspiration i forhold til metodeudviklinger i workshops og hvordan vi integrerer de forskellige brugere og interessenter på tværs af et projekt som dette – med f.eks. dukseordninger og Living-Labs.

³ Mueller, M. P. , Tippins, D. , Bryan, L. A. (2011). The Future of Citizen Science. *Democracy and Education*, 20 (1), Article 2. Available at: <https://democracyeducationjournal.org/home/vol20/iss1/2>

SAMSKABELSENS KOMPONENTER OG ORGANISERING

Samskabelsens komponenter består af workshops, dukseordninger, Living-Labs og re-design

Workshops

Samskabelses-processen blev organiseret i et integrerende samspil med skolernes undervisnings-strukturer og udvikledes ud fra konkrete forslag fra lærere og skoleledelse og teknisk service. Sammen med lærerne arrangerede forskerne en serie af workshops som blev afviklet af forskerne i løbet af projektets første år. Samtidig benyttede lærere og forskerne sig af skolernes dukse-systemer til, hen over det meste af et skoleår, at uddelegere et ansvar for indstilling af lysdesignet i det daglige – til eleverne.

Der blev planlagt fire workshops á 5-6 undervisningstimer på hver af de respektive skoler i Tilsted og Hanstholm. Grundet Covid-19 restriktioner blev kun de tre første gennemført. På begge skoler deltog to klasser i workshopsene sammen med deres lærere. På Tilsted skole var det to 5. klasser og i Hanstholm 5. og 6. klasse.

Workshopsene fungerede som tema-undervisning. Lærerne havde ansvar for den pædagogiske situation og forskerne for den faglige introduktion og udvikling af elev-opgaver. Workshopsene var fordelt over hele året med to workshops i efteråret og en i foråret. Temaerne handlede om lyset som fænomen, oplevelse og virkning.

Gennem disse workshops involveres lærere og elever i grundlæggende forståelser af dagslys og kunstlys, rumlige lyssituationer og lysteknologi. De introduceres til hvordan lyset er dynamisk og bevæger sig i lige linjer. Hvornår man bedst anvender direkte belysning og hvordan lyset, i den indirekte belysning, fordeler sig og reflekteres som rumlige kvaliteter.

Gennem opgaver, der indeholder observation og analyse, foretager eleverne visuelle studier af lysforekomster ligesom de introduceres til den lysfaglige begrebsverden herunder belysningsparametre og håndtering og aflæsning af måleinstrumenter som luxmetre.

Eleverne arbejder med lysdesign og introduceres til hvordan belysning kan bestemmes som funktions-belysning, hvor noget lys passer bedre til nogen undervisningssituationer end andre. Eller hvordan man kan stille på lyset for at skabe atmosfære, hvor belysningen kan betragtes som stemnings-givende.

Det at kunne skabe sine egne lyssituationer gør, at eleverne kan bruge lyset både som understøttende funktion i de forskellige undervisningssituationer, og i forhold til at skabe situationer og atmosfære i klasserummet, såvel som i de fællesomgivelser, der anvendes til gruppe- og projektarbejde.

For at give eleverne sprog til at beskrive deres undersøgelser omkring lysmiljøets kvaliteter, effekter og funktioner, indføres eleverne i metoder til at observere og analysere både lyskvaliteter og lyskvantiteter. Metoderne anvendes i de opgaver der stilles i workshopsene (se uddybning af workshopopgaver side 22-29).

Dukseordninger

Projektet benytter sig af skolernes dukse-systemer, hvor alle elever i de involverede klasser, igennem det første år, i grupper, havde 2-ugers dukse-perioder. I dukse-perioden får eleverne, ud over de sædvanlige opgaver, også ansvar for indstillingen af kunstlyset. I forberedte skemaer får eleverne til opgave rapportere til forskerne om deres iagttagelser af dagslyssituationen i klassen. De laver notater om det daglige lysmiljø, og leverer rapporter omkring lysindstillinger og lyskvaliteter til forskerne. I skemaerne begrundes duksene deres kunstlys-indstillinger i relation til det aktuelle dagslys udenfor og i relation til de opgaver og læringsmetoder, de er i gang med i klassen.

Med dukse-ordningen skabes rammerne for, at alle elever helt praktisk bliver fortrolige med de nye lysinstallationer, og at de lærer belysningspotentialerne i de nye installationer. Klasselærerne opmuntrer eleverne at stille på lyset, så de føler, det er godt for dem. Ligeledes er der et ønske om at eleverne selv tager stilling til deres egen situation, at de forholder sig kritisk til, om en aktuell belysning er godt for dem.

Børnene lærer ret hurtigt at styre lysdesignet, og de er generøse i deres vidensdeling med andre brugere, som f.eks. de forskellige andre lærere, der også underviser i projekt-klasserummene.

Læreren opmuntrer til at eleverne gerne må have 'pilfingre' – og synes ikke, der udfolder sig kampe om at styre lyset. Derimod blev det at forholde sig til lyset hurtigt en bevidst og integreret del af det at være i klasserummet – at forholde sig til de nye lysinstallationers muligheder, at designe scenarier eller situationer med lyset.

Lærerne fortæller at eleverne er blevet meget mere opmærksomme på den givne lyssituation. Således kan eleverne finde på at vælge, at der slet ikke skal være kunstigt lys men f.eks. foretrække at opholde sig i klasserummet med et gryende eller skumrende dagslys. Dette skete aldrig før. Dagslyset - det naturlige lys - er på denne måde blevet et kvalificerende fænomen eleverne kan forholde sig til.

Gennem dukse-perioden gøres primær-brugerne opmærksomme på, hvordan f.eks. brugen af Uplight og kold lysfarve (høje kelvin-grader) kan befordre en belysning, der egner sig specielt godt til de læringssituationer, hvor der arbejdes med Chrome-books. Ligesom eleverne sammen med læreren finder ud af, at hvis de vil lave et lysscenario for en hyggetime, så designer de indirekte (Uplight) belysning i en varm tone (lave kelvin grader). De tester således forskellige settings og hvilke situationer de forskellige settings bedst befordre.

Hen ad vejen opstår der fra elever og læreres side et ønske om et begrænset antal af faste lysscenerier, som er nemme at finde. For klasselæreren blev det løbende mere tydeligt, at ønsket var fire grundindstillinger, der understøtter fire grundlæggende didaktiske metoder i undervisningen. Derudover var det for læreren et væsentligt argument, at hendes kolleger relativt nemt skulle kunne orientere sig med den nye lysinstallation, ellers, forklarede hun, ville de bare opgive at bruge det. Resultatet blev således fire lysscenerier /grundindstillinger, som man efterfølgende kan justere på, hvis man vil.

De fire lysscenerier benævnes i relation til deres funktion: Fælles, Chrome, Elevarbejde og Hygge (se uddybning af lysscenerier side 62-64).

Living-Labs og re-design

De klasseværelser og de fællesrum, som indgik i projektet, blev betragtet som Living-Labs, hvor forskere sammen med elever, lærere, lysdesignere og teknisk servicefolk fra skolerne og fra Thisted Kommune havde til opgave at undersøge, hvilke kvaliteter og begrænsninger, der ligger i et åbent brugerstyret lysdesign. Dukseordningen, med i sit langstrakte forløb, har fungeret som en del af Living-Lab, hvor elever med lærerne som kvalificerende observatører, gennem to semestre har testet og afprøvet de nye kunstlys-installationer og styringssystemer.

Med projektets status som forskningsprojekt, har vi kunnet afsætte tid til denne analytiske og transformative proces med re-design og samskabelse, hvor alle deltagende parter lærer af hinanden. De nye installationer med led-armaturer og styring blev installeret i fire test-klasseværelser under en sommerferie og stod klar som Living-Labs til udforskning og test da eleverne startede efter ferien.

Gennem en 18-måneders lang proces af samskabelse, re-design og gensidig læring har folkeskolerne i Tilsted og Hanstholm således fungeret som laboratorier, hvor brugerne har bidraget aktivt med et udforskende brugerperspektiv. De fire udvalgte klasseværelser fungerer i denne periode som aktive Living-Labs, der involverer alle brugere og interessenter herunder altså lærere og elever, skoleledere, forskere, designere, skolernes teknisk service, kommunens afdeling for Teknik og Erhverv – men også lokale installatører og elektrikere, som hyres ind af kommunen. I samskabelses-processerne, der udfolder sig i projektets Living-Labs udvikler alle involverede nye indsigter og et fornyet fagligt sprog om lys. Derved indføres de i kompetencer til at kunne bestemme lysmiljøet.

Den samskabende brugerintegrering er gennemført med et fokus på både dagslys og kunstlys. Med udgangspunkt i dagslyset kvaliteter, har vi undersøgt lyset som arkitektonisk materiale, og udforsket hvordan lyset iscenesætter rumlige situationer.

Sammen med primær-brugerne har vi analyseret og efterprøvet styringer og ophæng, og sammen med teknisk service på skolerne, kommunens tekniske servicefolk og lokale elektrikere, har vi gennemført gentagne processer af re-designs og tests af re-designs, hvor installering af lysdesign og styringssystem i perioder afprøves og tilpasses forskellige undervisningssituationer.

Armaturerne blev før installationerne udvalgt af projektets forskere, designere fra Glamox, Teknisk Service på skolen og Teknik og Erhverv fra kommunen. Armaturerne blev ophængt i den samme klassiske stil – i tre rækker i klasserummets længde, som også klasserummets tidligere lamper var ophængt. Dog er de ophængt med den forskel, at de hænger lidt lavere, således vi også kan arbejde med Up-light, dvs. indirekte belysning og refleksion fra loftet.

Det installerede kunstlys og styring etablerer en transformation af lysmiljøet i klasselokalerne, hvor man flydende kan vælge kombinationer af Uplight og Downlight og bestemme lysstyrker og lysfarver. I disse valg kan man relatere til dagslyset udenfor, relatere til hvilken undervisningsform man skal i gang med, eller hvilken stemning man gerne vil understøtte i klassen.

Som en af skolens Teknisk Service medarbejdere udtrykker, har denne gradvise udvikling af lys og energi-forståelse med muligheder for at selv at sætte fokus i undersøgelser – forklare og involvere andre (kommunens folk, fagfolk og forskere), etableret drift-forståelser og metoder for, hvordan man kan forbedre bruger-kulturer i dagligdagen. (Konceptet Living-Labs uddybes endvidere i kapitel 3).

WORKSHOPS - EKSEMPLER PÅ REALISERINGER

Dette afsnit skal anskueliggøre, hvad workshopsene mere konkret har beskæftiget sig med, hvilke metoder vi har taget i brug, udviklet og sat i scene sammen med lærere og elever.

De anvendte metoder og indholdet i elevopgaver har haft til hensigt at gøre alle brugere og interessenter mere opmærksomme på hvad lys er og hvordan man kan bruge det.

- At dagslyset er sundt, energibesparende og gratis. På alt for mange skoler finder man elever siddende for nedrullede gardiner med kunstlyet tændt – og dét er dårlig kultur.
- At rette opmærksomhed mod mulige potentialer, der ligger i en bedre udnyttelse af en ny belysningsteknologi, og som tager udgangspunkt i brugeren som drifter.
- Hvordan belysning i folkeskolen, i en sammenhæng med de energioptimerende aspekter, bør ansues som et værktøj, der innovativt understøtter de nuværende læringssituationer og skaber æstetiske miljøer.

Som det blev mere end antydnet i de afviklende interviews med skolelederne, så savner man perspektiveringer, der inkluderer og tilgodeser æstetiske rumlige forhold, der relaterer sig til aktuelle skolereformer og læringsmetoder, og som sætter sociale aspekter og velbefindende blandt elever og lærere i højsædet.

Med konceptet Citizen Scientists in the Classroom anerkendes brugerne som kompetente driftere af deres egen omgivelse. Gennem workshops og dukseordninger har vi inkorporeret Citizen Scientists in the Classroom konceptet. Projektet har derved søgt at give især primærbrugerne, elever og lærere, en vidensunderbygget og værdisættende stemme gennem workshops og dukseordninger.

Energioptimering bør i et fremadrettet sigte handle om innovation, der tænker brugeren som drifter (brugeren = den kompetente borger). Med hensyn til dynamisk interfacing må vi fastholde, at det bør være teknologien, der skal servicere brugerne og deres daglige undervisningspraksis og ikke teknologien der skal adfærdsstyre brugeren.

Workshopindhold er på følgende sider eksemplificeret gennem tekst og billeder af syv forskellige øvelser:

1. Foto-registreringer som metode til iagttagelse og forståelse af lysfænomener og lyssituationer
2. Lysdesign i modelkasser
3. Eleverne bygger og efterprøver selv model med styring og LED lysgiver
4. Camera Obscura observationer
5. Lys og skygge registrering med kegler, papir og blyant
6. Forskellige slags skygger
7. Lysmålinger

Foto-registreringer som metode til iagttagelse og forståelse af lysfænomener og lyssituationer

En af de helt klassiske og grundlæggende metoder til forståelse af lyset og belysningsdesign er iagttagelse af lyset virkninger i landskaber og rum, på genstande, kroppe og ansigter.

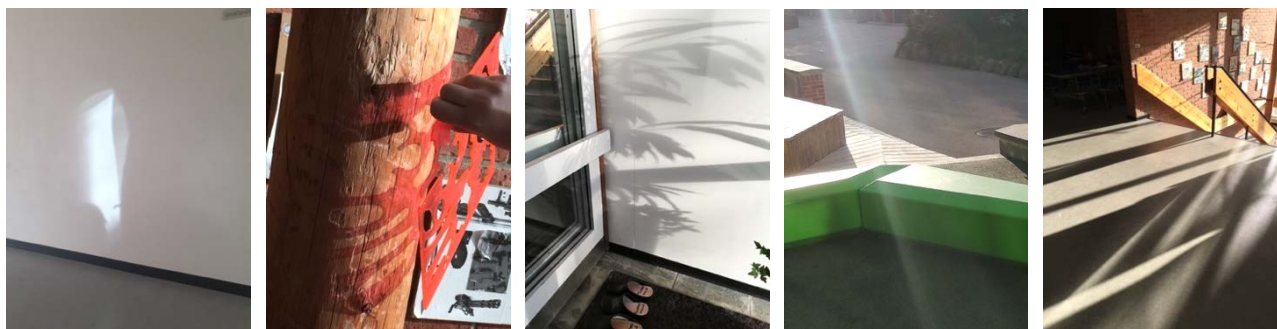
Iagttagelse og observation af lyset er en forudsætning for forståelse og analyse. Ofte er iagttagelse foregået gennem gengivelse af det man ser eller oplever. I tidligere tider har man opnået forståelse af lys gennem maleriet hvor f.eks. maleren tydeliggjorde sin iagttagelser for beskueren gennem sine farver og penselsstrøg. Historisk har maleriet således været et vigtigt værktøj for forståelse af lyset og dets kvaliteter. Blandt danske malere, der især har lyset som tema, kan nævnes Vilhelm Hammershøi og Anna Ancher.

Kameraet er også et godt værktøj til at studere lyset. Med kameraet kan vi skabe fokus på vores genstandsfelt, fange lyssituationer på fotos, som man efterfølgende kan analysere. En god ting ved kameraet er at næsten alle har én i mobiltelefonen. Den er nem at håndtere og man kan studere resultatet umiddelbart.

Nedenfor ses en række ubeskårede fotos taget af elever i 5. klasse. Det er fotos fra den første workshop, i projektet, hvor opgaven for eleverne var at iagttage lyset på skolen og tage et foto af en særlig funden lyssituation.

Opgaven:

- Opgave udføres i grupper på 2-3 elever og lyder:
- Find et lysfænomen på skolen og tag et foto af det. Det kan være et mærkeligt lys, smukt, lysrefleksioner i vand, lys der genskinner fra en ting og kaster skarpe stråler fra sig f.eks. fra vinduer, spejle eller andet. Det kan være bittesmå lysfænomener som dråber i græsset, eller det kan være store fænomener som himmel og skyer.
- Analysér lyssituationen på fotoet og lav en kort beskrivelse af det, man ser.
- Præsenter fotoet for de andre.



Lysfænomen på hvid væg. Lysmediering i orange plast. Lys og skygge i kompliceret hjørne. Lysstråle og lysglans på bænke. Direkte sol og refleksioner på gulv.

Lysdesign i modelkasser



Papkasse med låg som udgangspunkt for undersøgelsen



Et elev-eksperiment i workshopen handler om lysdesign med dagslys i små modeller. En papkasse med låg giver rum for elevernes undersøgelse. Her opnås dels en forståelse af dagslyset som arkitektonisk element, der kan formes, og der opbygges en viden om, hvordan lysdesign virker i et rum.

Opgaven:

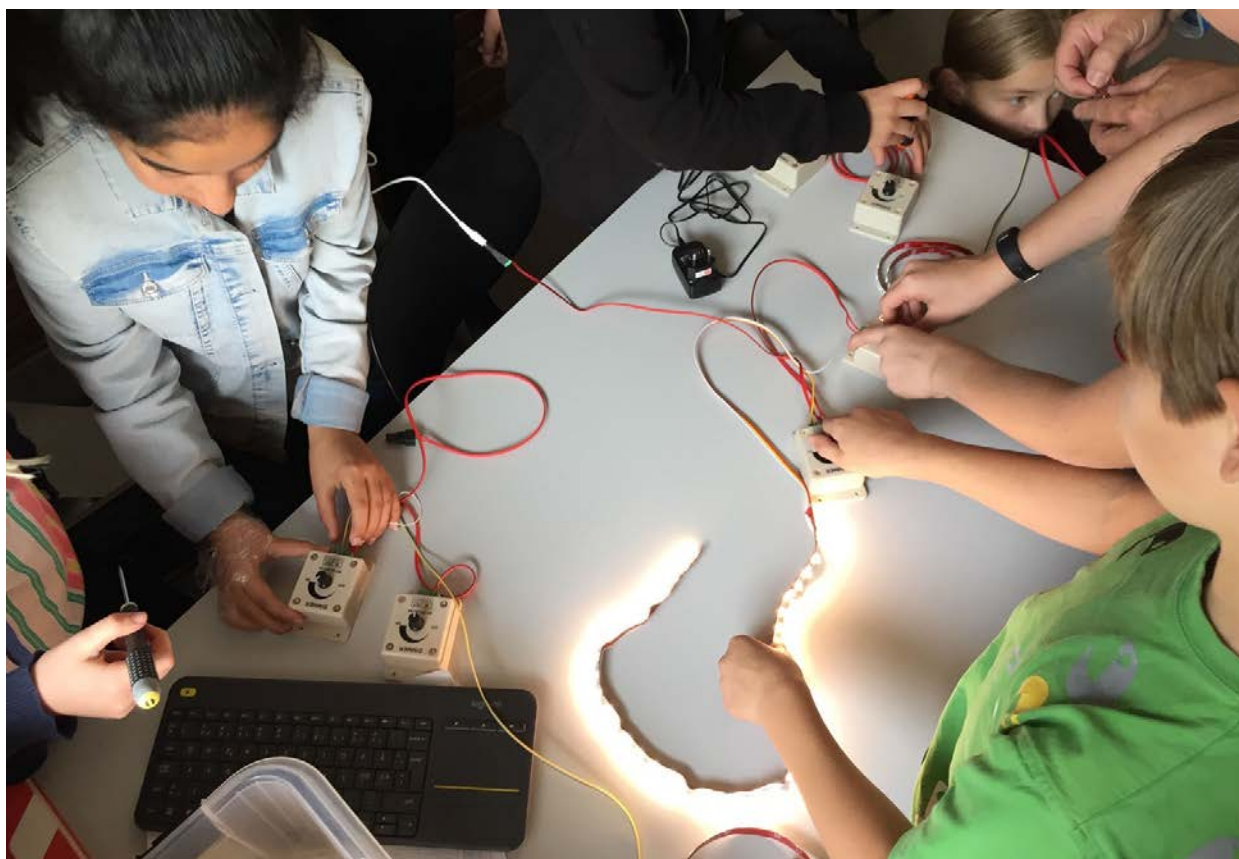
- Introduktion:
 - Hvad er dagslys, og hvor kommer det fra
 - At designe lyssituationer med dagslys
- Bygge modeller med lysåbninger
 - 10 grupper med tre i hver, - således tre elever pr modelkasse
 - Variationer i opgaven, kan være hvor åbninger placeres i modellen.
- Der arbejdes kun med ovenlys, altså med hul-skæringer i kassens låg
- Analysér dagslyssituationen i jeres model ved at tage kassen med udenfor i dagslyset
- Se hinandens modeller og læg mærke til hvor forskellige lyssituationerne i de forskellige kasser er
- Analysér hvordan den lyssituation, der er skabt i modellen, virker
- Tag 2-3 fotos ind i jeres model og vælg ét af dem
- Præsenter fotoet og forklar for de andre, hvordan jeres lysdesign virker



Eleverne bygger og efterprøver selv model med styring og LED lysgiver

Med udgangspunkt i en værktøjskasse udstyret med:

1 rulle LED-bånd, loddekolber, tænger, skruetrækkere, strømforsyninger, lysdæmpere og ledninger, får eleverne til opgave at sammenbygge de elementer, der udgør en belysnings-installation.



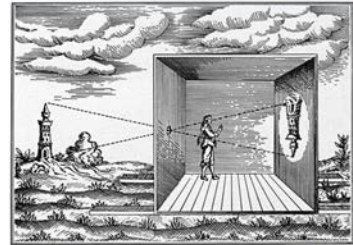
Lyskæden med LED-dioder og den tilkoblede elektroniske styrings-boks, som ses på fotoet, diskuteres som en model for den lysteknologi, der er implementeret i klasseværelserne. På fotoet har elever netop tilsluttet lyskæden til lysboksen, og eksperimenterer efterfølgende med, hvordan de kan indstille lyset.

Opgaven:

- 10 grupper med 3 elever i hver gruppe
- Intro til forståelse af alle enkelt elementer
- Grupperne følger en given procedure for sammensætning af del-elementerne
- At få lys-installationen til at virke – herunder analysér hvor den er gal, hvis den ikke virker
- Når installationen virker, afprøv den da forskellige steder med forskellig dagslyssituation
- Finde på andre måder hvorpå man kan bruge LED-belysning

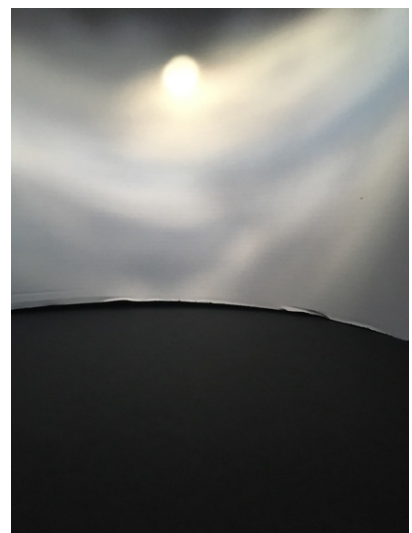
Camera Obscura observationer

Camera Obscura history



Opgaven:

- Dan grupper á tre elever
- Intro til Camera Obscura som begreb
- Intro til den forberedte Camera Obscura-kasse
- Udendørs. På skolens område – undersøg verden gennem Camera Obscura
- Find et godt motiv, der gør sig tydelig som billede i kassen
- Tag følgende tre fotos
 - Foto af det motiv Camera Obscura hullet 'ser' imod
 - Foto af hinanden der står med kassen og kigger ind i kassen
 - Foto af hvordan der ser ud inde i kassen
- Tegn og beskriv hvorfor det du ser i kassen, er som det er?
 - Dvs. en tegning af hvordan Camera Obscura virker – altså man indtegner lysstrålernes bevægelse i lige linjer – hvor de kommer fra, rammer og sendes videre (refleksioner)
 - Indtegnes på forberedt print, hvor man tegner og beskriver lysstrålernes retning.
- Alle grupper præsenterer og diskuterer deres observationer med Camera Obscura



Tidlig morgen. Elever går rundt med en kasse og et tæppe sat fast til kassen. De stikker hovedet under tæppet og kigger ind i kassen gennem et kik hul. Eleverne studerer fænomenet Camera Obscura. Gennem et ganske lille hul i kassens ene side, siver lysstrålerne ind i kassen. På det sidste foto ses kassens inderside, hvor der viser sig en projektion – som en film der vender på hovedet. Gennem Camera Obscura fænomenet studerer eleverne lysets bevægelse gennem rum. Fotos er taget af elever.

Lys og skygge registrering med kegler, papir og blyant



En hvid kegle er et udmærket instrument til at iagttage lys og skyggeforhold.

Keglen fanger lyset og tydeliggør hvor skyggen eller skyggerne falder.

Når vi står udenfor i solskin, er der kun én skygge, men med kunstlyset tændt, vil der være flere lyskilder og derfor flere og mere utydelige skygger.

Opgaven:

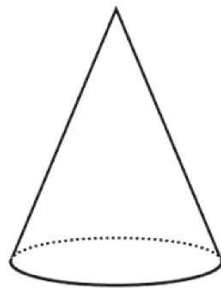
- Dan grupper á to og to
- Brug skumkegle, papir og blyant i undersøgelsen af lys og skygger mindst to-tre forskellige steder på skolen
- Sæt keglen på papiret og tegn de evt forskellige grader af skygger du kan se på papiret
- Tag foto af keglen på papiret med din skygge-tegning
- Tag også et foto af den rumlig omgivelse i laver kegle-registreringen i
- Tag også et foto af den belysning der afgør hvordan skyggerne falder.
- Grupperne præsenterer deres registreringer for hinanden.

Forskellige slags skygger

De store rumskygger
De store genstandsskygger
De små genstandsskygger
De små detalje- og
teksturskygger

De store er dem, der er
knyttet til lyset i
rummet. Det er dem, vi
bevæger os igennem,
henholdsvis træder på
eller sidder i.

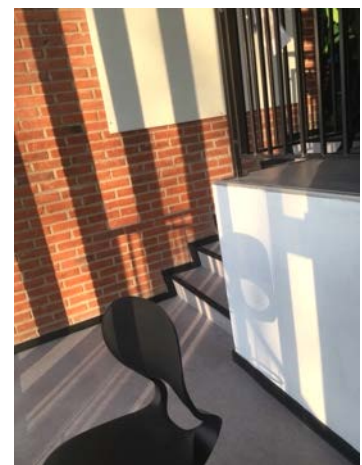
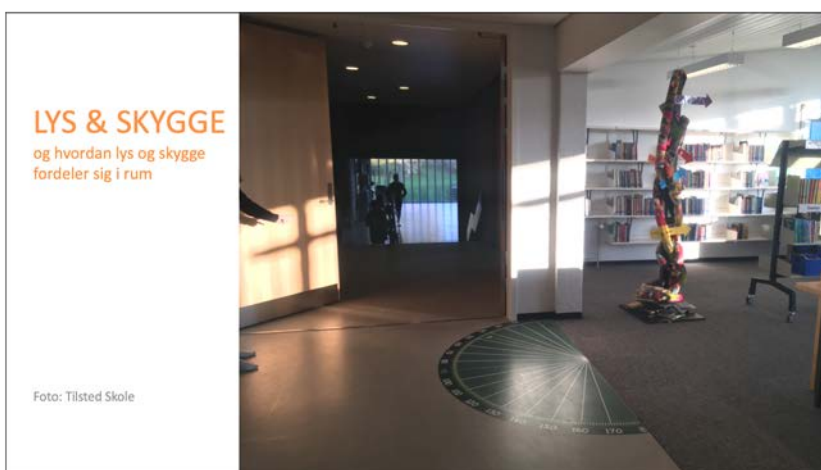
De små er dem, der er
knyttet til tingene. Vi har
dem mellem hænderne, og
rører ved dem med
fingerspidserne.



Sophus Frandsen (1984) Lyset i rummet og lyset
på tingene. Kbh. Lampetten

Opgaven:

- Grupper med to eller tre elever
- Find et sted med store rumskygger – tag et foto
- Find et sted med store genstandsskygger – tag et foto
- Find et sted med små genstandsskygger – tag et foto
- Analysér de tre fotos og præsenter i samlet forum



Lysmålinger

Hvordan måles det lys vi ser?



På foto ses eleverne i samlet diskussion om deres målinger af lyset, forskellige steder på skolen.

Opgaven.

- Introduktion om
 - Det adaptive øje
 - De nye lysdesign med up og downlight
 - Lys-volumen og lysfarve,
 - Genskin, blænding, refleksionslys
 - Det oplevede lys og det målte lys
 - Lys ifølge bygningsreglement
- Elever foretager målinger i grupper af 4 elever
 - i klasseværelset ved borde i alle tre rækker fra vinduet og ind i rummet. Resultater noteres i skema – til diskussion.
 - på gangen og i aula
 - andre særligt fundne steder på skolen
- Efterfølgende diskussion af målingernes resultater



Til brug i workshops og i forbindelse med dukse-programmet, havde vi anskaffet et sæt af 10 luxmetre til hver skole.

Luxmetrene er tilgængelige i det daglige og gør det muligt for elever og lærere at undersøge lysmiljøet på skolerne kvantitativt.

ATROPOLOGENS REFLEKSIONER

Afrunding på Energioptimering med adaptivt lys i folkeskolen

Ved Lektor Mikkel Bille, RUC

Formål

Formålet med feltarbejdet er at undersøge modtagelsen af den adaptive belysning, og den daglige praksis over tid. Forskningens udgangspunkt er, at naturligt lys og kunstig belysning påvirker kroppen fysisk og kan have indflydelse på kognitive og biologiske processer, som vist i anden forskning på området. Formålet var at vise hvordan dette forhold så udfolder sig i hverdagen når mulighederne for at iscenesætte lyset øges. Som del af hverdagspraksis, er lysets rolle også at skabe stemninger i rummet, og er del af brugernes vaner og normer.

Forbehold

Det etnografiske feltarbejde skulle have forløbet over fire gange i løbet af projektforsløbet, ca. to dage per gang på hver af de to skoler. Grundet COVID19 blev det dog kun til i alt fire dage på Tilsted og tre på Hanstholm (november 2019 og August 2020). Disse besøg lå før installation af fire faste indstillinger med mulighed for variation, og før ombygning af bibliotek på Tilsted. Ligeledes er afrundingen af projektet grundet COVID19 baseret på interview, og ikke observationer.



Indsigter

I det følgende vil fem indsigter fra feltarbejdet blive fremhævet. Hvert punkt kan underbygges af eksempler fra feltarbejdet, her dog præsenteret i kort opsummerende form.

1. Forindstillinger kan være gode anvisninger, men variationer ændrer "energien"
2. Lyset understøtter, men skaber ikke af sig selv, bedre læringsrum.
3. At iscenesætte lys kan skabe forståelse for hinandens behov
4. Viden om lys forbedrer brugen af lys
5. Lærere ser aktiviteter, hvor elever søger stemninger

1: Forindstillinger kan være gode anvisninger, men variationer ændrer "energien"

Lærerne taler om "energien" i rummet – det der også i forskningslitteraturen omtales som enten stemning eller atmosfære. Dette begreb betegner intensiteten i læringen, og altså ikke et spørgsmål om der er stille eller larm, men om hvorvidt selve læringssituationen opleves produktiv fra lærerens perspektiv. Der kan være en god "energi", hvor eleverne læser og er stille, eller når de laver gruppearbejde og taler meget sammen. Men der kan også være en følelse af, at den er helt fraværende ved samme aktiviteter, eksempelvis vurderet ud fra om eleverne ser trætte ud, eller sidder uroligt. Lyset blev hurtigt i projektforsløbet brugt til at ændre denne "energi" af flere, men ikke alle, lærere. Den nye lysteknologi indgik således i en allerede etableret læringspraksis for at ændre "energien", eksempelvis, åbne vinduer for udluftning, at bede eleverne gå ud og løbe en tur, eller sætte noget Let's dance på YouTube på.

Frit variabelt lys muliggør altså ændringer af "energien" i rummet, og indgår som endnu et redskab til dette formål, om end mindre indgribende en at bede eleverne stoppe deres læringsaktivitet for at løbe en tur. Det peger på, at det ikke som sådan er lyset i sig selv, men ændringen, der giver "løftet i energien". Denne "energi" er ikke noget lærerne nødvendigvis taler om, men den mærkes, som flere lærere sagde. Et eksempel fra en læringssituation hvor en lærer ville ændre "energien" der også for undertegnede var mærkbart fraværende, er følgende: "Vent lige, jeg prøver lige noget", siger læreren, og skruer en smule op for lyset. "Ah", sukker en af eleverne og retter sig op i stolen, "det var faktisk meget rart". Læreren afslutter "Ja, nu kan I rent faktisk se noget". Lyset, der var relativt dunkelt, var ikke som sådan for lidt til at kunne læse, men forøgelse gjorde noget ved "energien", udover at muliggøre nemmere tekstlæsning.

Frit variabelt lys tager dog tid at indstille for de såkaldte lysdukse på Tilsted skole, og for læreren på Hanstholm. Det kræver både viden og visuel opmærksomhed, såsom at eleverne ofte tog en bog ned på et skrivebord for at tjekke, at man kunne se noget på den rette måde ved en lysindstilling. Ved introduktionen af fire forindstillinger, blev disse til udgangspunktet for lyssætning, og derfra kunne læreren aktivt ændre "energien", når det passede.

Således er en central pointe ved feltarbejdet i hverdagen med den adaptive belysning, at den ikke blot tillader at lyssætte på fire forskellige måder, eller at de fire indstillinger er brugerdefinerede, men at muligheden for ændringer i lyset gør det muligt for læreren at "føle energien" i læringssituationen og agere på mindre indgribende måder. En ændring på linje med den allerede etablerede praksis med at lufte ud.



2: Lyset understøtter, men skaber ikke af sig selv, bedre læringsrum

I indkøringsfasen er der opstået forskellige lokale forestillinger om forhold mellem lys og aktivitet "Chromebook lys", "læselys" osv. De har ført til fire faste indstillinger med mulighed for ændring. Altså en forindstilling der tager udgangspunkt i lokal hverdagspraksis. Lyset understøtter her læringsaktiviteter, såsom arbejde med chromebook, tavleskærm, koncentration, hygge. Et klasseværelse er i meget "bevægelse" med borde og elever der bevæger sig rundt og ud og ind, og lyset kan understøtte denne læringspraksis.

Men der var ingen entydig relation mellem succes i afviklingen af en bestemt læringsaktivitet i forhold til en bestemt lyssætning. Lyset kan understøtte, men determinerer ikke læringssituationen. Det er relationen mellem elever og lærer der skaber den situation. Således var der engageret læring med lys der kan anses for at være mindre optimal (f.eks. dunkel til læsning), ligesom der også var uengageret og ineffektiv læring i lyssætninger, der ellers var tiltænkt til aktiviteten. I sidste ende er det læreren og eleverne, der afgør udbyttet af læringsrummene. En episode imellem elever i frikvarter kan forme udbyttet af en efterfølgende læringsaktivitet, uagtet belysning.



3: At iscenesætte lys kan skabe forståelse for hinandens behov

Praksis med at sætte lyset, såvel de fire forindstillinger, som den mere variable i opstartsfasen, var kendetegnet ved at personen(/erne), der indstillede lyset, ikke blot var opmærksom på egen oplevelse, men ligeledes andres. Således var der "lysdukse" på Tilsted, der indstillede lyset i opstartsfasen, der efter at blive gjort opmærksom på den kommende undervisnings karakter, indstillede lyset som de mente. I en kollektiv forhandling forhørte de sig derefter rundt om de andre elever accepterede det. I øvrigt, som under punkt 1, var nogle lærere opmærksomme på anvendeligheden af ændringer i lyset til at "skifte energien" i rummet, og dermed drage omsorg for elevernes behov. Dog var der også tidspunkter hvor der blev mulighed for at sætte sig andre steder til en læringsaktivitet, at elever forlod lokalet da de ikke brød sig om lyset.

4: Viden om lys forbedrer brugen af lys

Det bemærkedes, at de lærere der havde fulgt arkitekternes læringsforløb, var meget opmærksomme på lyset, såvel dagslys som kunstigt lys, i læringsrummet. Nogle lærere, der ikke havde taget del i forløbet, trådte således blot ind i rummet, tændte lyset på startindstilling (før forindstillinger blev installeret), og igangsatte undervisning. Andre, der havde været del af forløbet, indstillede enten aktivt eller bad eleverne indstille til en specifik aktivitet. En lærer udtalte selv at den øgede forståelse af lys havde betydet, at læreren

mere aktivt både i arbejdsøjemed og privat indstillede lyset til formålet, med opmærksomhed på samspillet mellem naturlig og kunstig belysning.

5: Lærere ser aktiviteter, hvor elever søger stemninger

En observation relateret til lyset, men også som understregning af hvad lyset gør og hvad eleverne søger, er den rolle stemninger spiller for læringsaktiviteter. Som nævnt under punkt 1, er stemningen en central del af lyssætningen af såvel kunstigt og naturligt lys. Når lærerne sender eleverne ud i læringsaktiviteter, ser man nogle elever blive i rummet, nogle bevæge sig ud på gangen, nogle sætte sig på gulvet, i hjørner, eller langt væk fra lokalet. Dette er dels for at få mere ro til opgaven – hvad end den er alene eller i grupper – men afspejler også et ønske om at aktiviteten føles på en særlig måde. Når lærere sætter elever til at lave noget, går eleverne altså et sted hen for at den aktivitet føles på en måde. Der er elever der søger et sted hvor de er alene – eller alene, men alligevel tæt på en anden – så de ikke føler sig ensomme. Og der er gruppearbejde hvor eleverne sætter sig to sammen på afstand fra andre, for eksempel et sted der føles mere "huleagtigt". På Tilsted kunne dette være ved en brandtrappe, hvor man er lidt skjult, eller på Hanstholm, på en tilstødende gang, eller i et nyt fælleslokale. Afstanden fra lokalet – særligt på Tilsted – var ofte udtryk for faglig sikkerhed. Jo mindre man havde brug for læreren, jo længere væk gik eleverne også. Der kan naturligvis være tilfælde hvor denne mulighed for at komme væk fra lokalet bruges til ikke at lave noget, lege, snakke eller være alene. Men i de fleste tilfælde er eleverne i gang med opgaven.

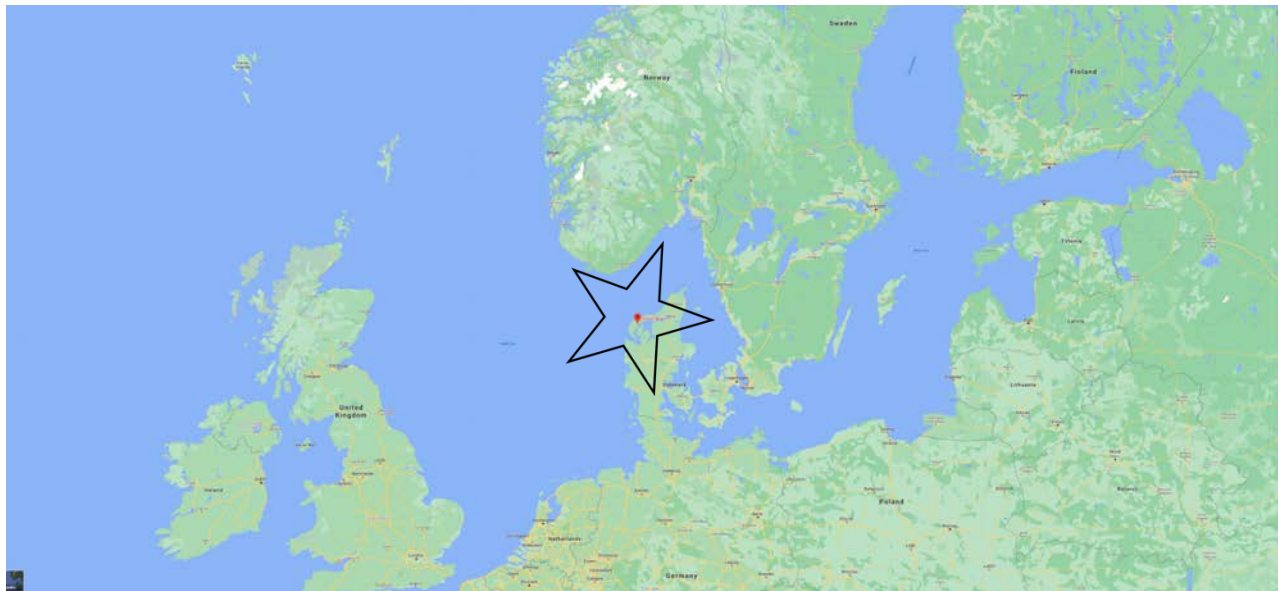


I forhold til lyset, er den reelle kvalitet af lyset, hvor eleverne sidder, mindre vigtig end hvordan det føles. Der var derfor elever i ergonomisk mindre fordelagtige læsepositioner i små hjørner, elever der læste ved borde uden belysning, elever med computer på steder på skarpt dagslys, eller i sækkestole hvor de var nødt til at holde computeren i svære positioner, eller elever der lå på gulvet og læste. Eleverne søger altså forskellige måder at være alene eller sammen på afhængig af aktivitet, og person. Hellere sidde i dårligt læselys til alene-arbejde i nærheden af, men ikke helt tæt på, en ven, end i godt lys, hvor der er mange andre eller man er alene. Et eksempel fra Tilsted er et bord ved kopimaskine og trappe, hvor lyset er mindre godt til læsning, men som er foretrukket på grund af sin hulelignende karakter.

KAPITEL 2

ETABLERING AF LIVING-LAB PÅ TO FOLKESKOLER 2019-21

TILSTED OG HANSTHOLM SKOLER, THISTED KOMMUNE



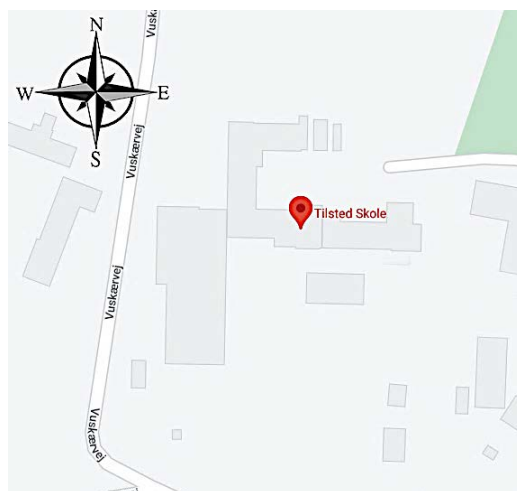
Tilsted og Hanstholm skoler. Omgivet af hav og fjord, med sine særlige vejrforhold og dagslys kvaliteter.

Hav, fjord og åben himmel

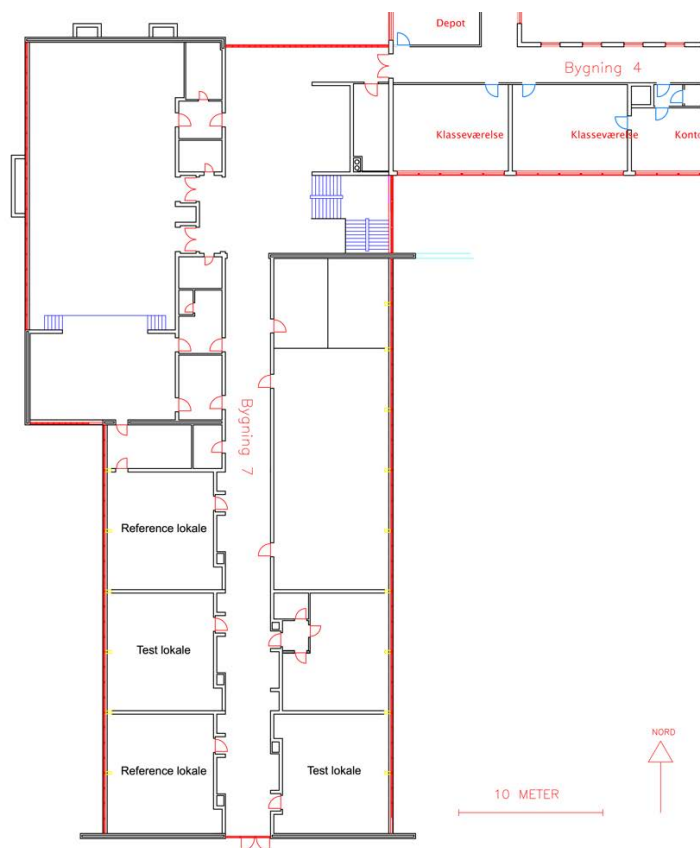
Tilsted og Hanstholm skoler er placeret tæt på hav og fjord, som giver særlige dagslysforhold i omgivelserne, genereret af lokale vejrforhold med dynamiske skyformationer og lys-refleksioner fra vandspejling. Placeringen indvirker på dagslysmængde, orientering og retninger af dagslysindfald, dynamik og variation i dagslyset, samt den spektrale sammensætning af dagslyset.

Tilsted Skole

Skolen er beliggende i Tilsted, en forstad til Thisted, på et højere liggende terræn. Bygningerne er omkranset af fuldt udvoksede træer, som specielt i sommermånederne afgrænser solindfaldet i bygningerne formiddag og eftermiddag. Projektet arbejder med fire klasselokaler, placeret med vinduer henholdsvis mod øst og vest i den sydvendte fløj med klasselokaler. Lokalerne ligger på første sal. De fire klasselokaler er næsten ens indrettet, og fungerer som living-lab for test og udvikling af den nye adaptive belysning. To lokaler indgår i den længerevarende proces af samskabelse, mens de to andre lokaler forbliver uforandret med den eksisterende lysdesign og lysteknologi.



Tilsted Skole i sin helhed, vist på kort i bygningsmæssig kontekst.

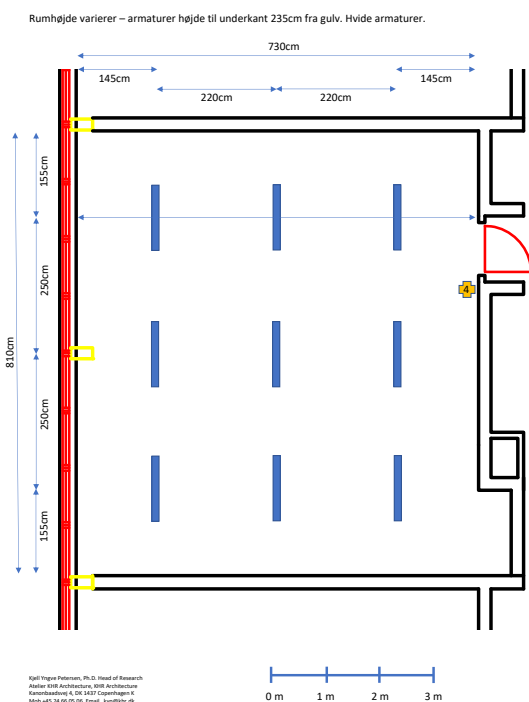


Plantegning af skolebygningen mod syd, med angivelse af de fire klasselokaler, som indgår i projektet.



Tilsted Skole, september 2019.

Bygningen set fra vest, med de involverede klasselokaler på første sal, længst væk mod syd



Tilsted Skole.

Plantegning af ophæng af LED armaturer i klasselokaler på Tilsted Skole. Lysdesignet giver belysning i henhold til gældende regler, og lever desuden op til de kommende regler i henhold til den seneste opdatering i 2021 af EN 12464-1:2011.



Tilsted Skole, september 2019.

Klasselokale med eksisterende armaturer og lysdesign. Der er 12 armaturer med lysstofrør, nedhængt, kun med lys nedad. Som reference-lokaler i testperioden bibeholdes to lokaler uforandrede med dette lysdesign og denne lysteknologi,



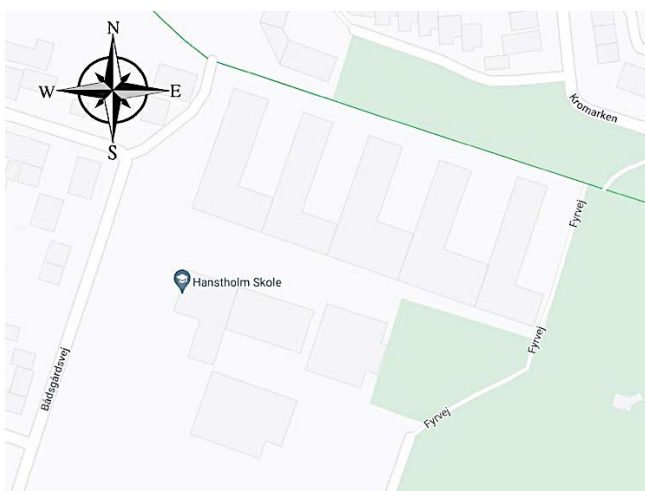
Tilsted Skole, september 2019.

To klasselokaler, et østvendt og et vestvendt, ombygges med nye LED armaturer og nyt design. Det første billede viser et lokale med indstilling af 4000K og 100% lysintensitet i både uplight og downlight. Det andet billede viser dagslysets influx i det østvendte lokale om formiddagen.

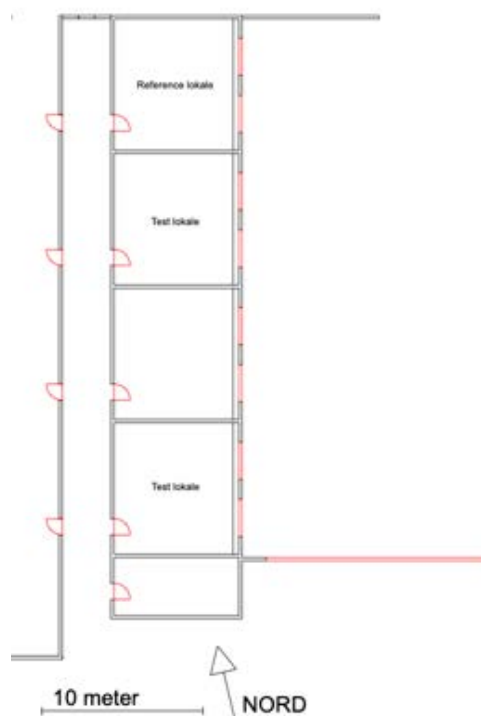


Hanstholm Skole

Skolen er beliggende midt i Hanstholm by, på fladt terræn med åben himmel hele vejen rundt, og ingen nævneværdig bevoksning eller andet, der har indflydelse på dagslysforholdene. Projektet arbejder med tre klasselokaler, placeret med vinduer mod øst i den midterste af fem fløje med klasselokaler. Lokalerne ligger i plan med udearealerne. De tre klasselokaler er næsten ens indrettet, og fungerer som living-lab for test og udvikling af den nye adaptive belysning. To lokaler indgår i den længerevarende proces af samskabelse, mens det sidste lokale forbliver uforandret med den eksisterende lysdesign og lysteknologi.



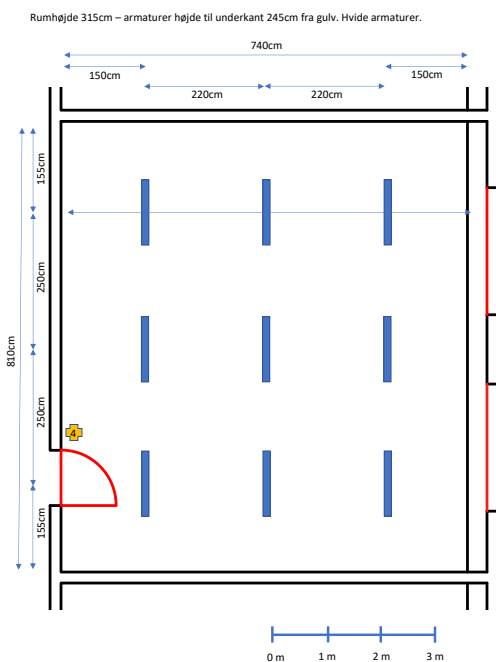
Hanstholm Skole i sin helhed, vist på kort i bygningsmæssig kontekst.



Plantegning af del af skolebygningerne, med angivelse af de tre klasselokaler, som indgår i projektet.



Hanstholm Skole, september 2019.
Den midterste fløj set fra øst, med vinduerne til de involverede klasselokaler.



Hanstholm Skole.
Plantegning af ophæng af LED armaturer i klasselokaler på Hanstholm Skole. Lysdesignet giver belysning i henhold til gældende regler, og lever desuden op til de kommende regler i henhold til den seneste opdatering i 2021 af EN 12464-1:2011.



Hanstholm Skole, september 2019.

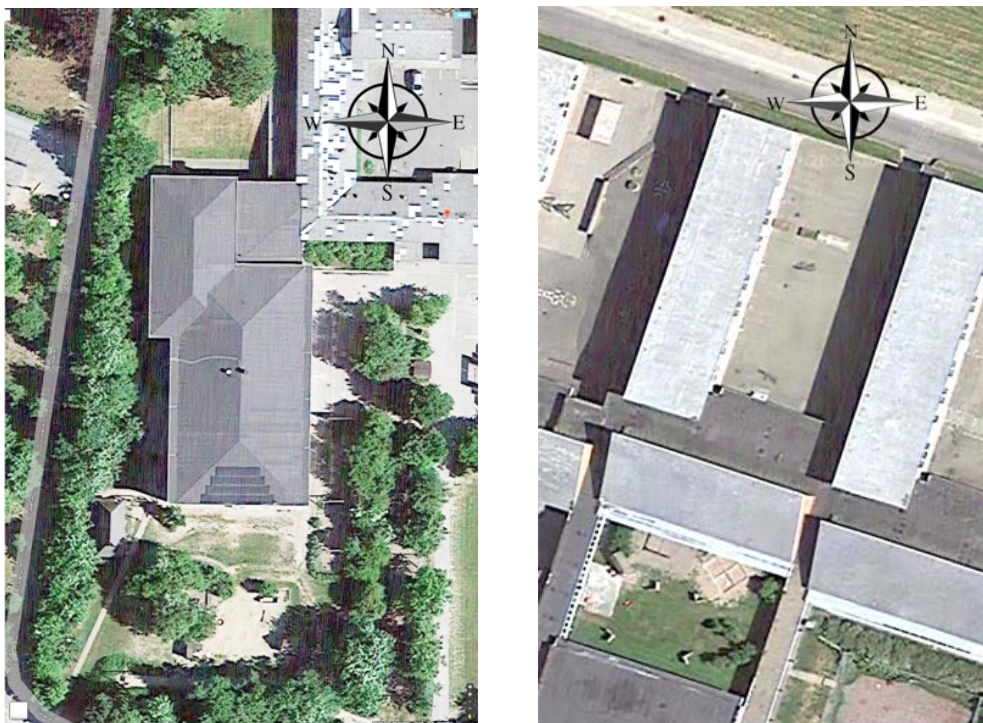
To klasselokaler med eksisterende armaturer og lysdesign. Der er 9 armaturer med lysstofrør, kun med lys nedad. Lokalet med nedhængte armaturer fortsatte som referencelokal i testperioden. I de andre lokaler var armaturerne monteret på loftet, og blev nye installeret med nedhængte LED armaturer.



Hanstholm Skole, september 2019.

To klasselokaler ombygges med nye LED armaturer og nyt design. Det første billede viser et lokale med indstilling af 2700K og 100% lysintensitet i både uplight og downlight. Det andet billede viser indstilling af 6500K og 100% lysintensitet i både uplight og downlight.

LYSET UDE OG LYSET INDE



Tilsted og Hanstholm skoler.
Skolebygningerne set i luftfoto med angivelse af orientering.

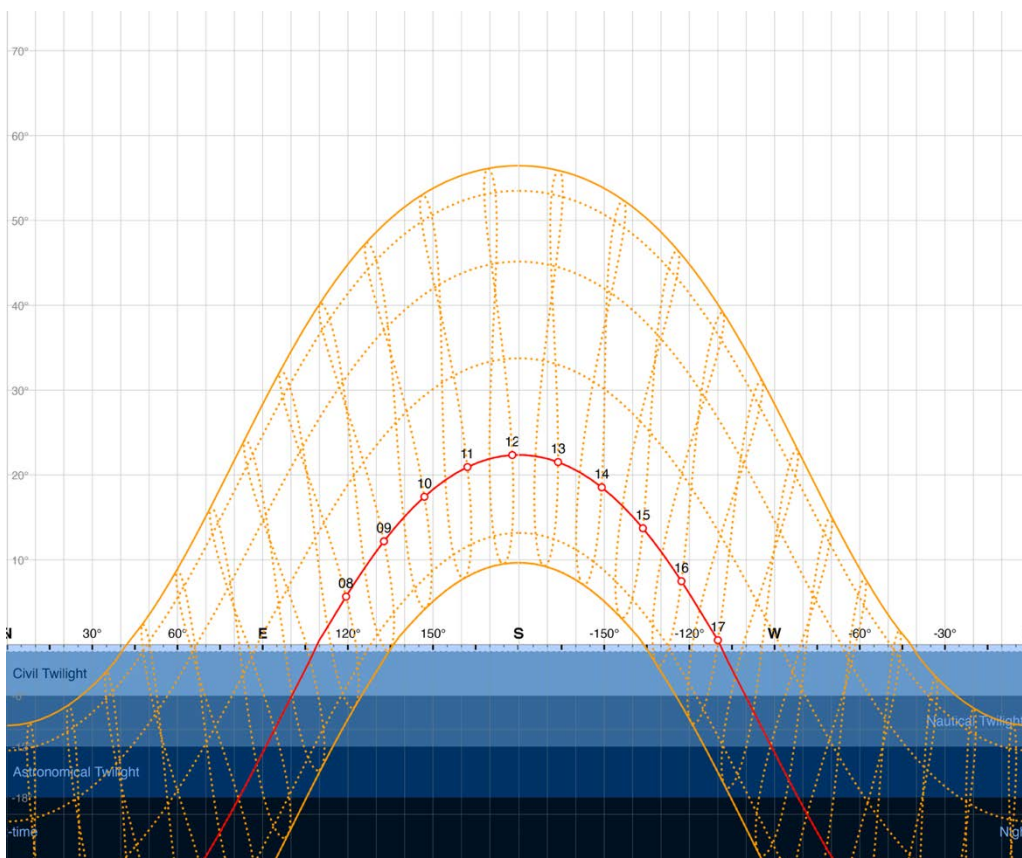
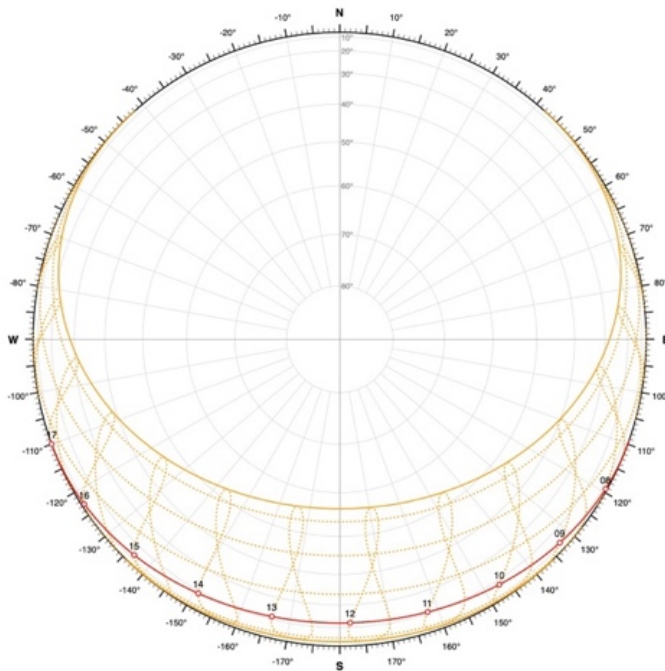
Året inddeles i fire dele, der er afgrænset af de fire solhverv:

1. Forårsjævndøgn (20. eller 21. marts).
2. Sommersolhverv (20. eller 21. juni).
3. Efterårsjævndøgn (22. eller 23. september).
4. Vintersolhverv (21. eller 22. december).

Astronomisk set. Men da dagslyset fra solen i skumringen, i overgangen mellem nat og dag, og dag og nat, strækker sig ud over en tid, vil dagslyset begynde lidt tidligere og slutte lidt senere på dagen. Der er forskel på dynamikken i forandringen dag-for-dag, hvor der er relativt lidt forandring i månederne omkring vintersolhverv og sommersolhverv, og relativt stor forandring omkring forårsjævndøgn og efterårsjævndøgn.

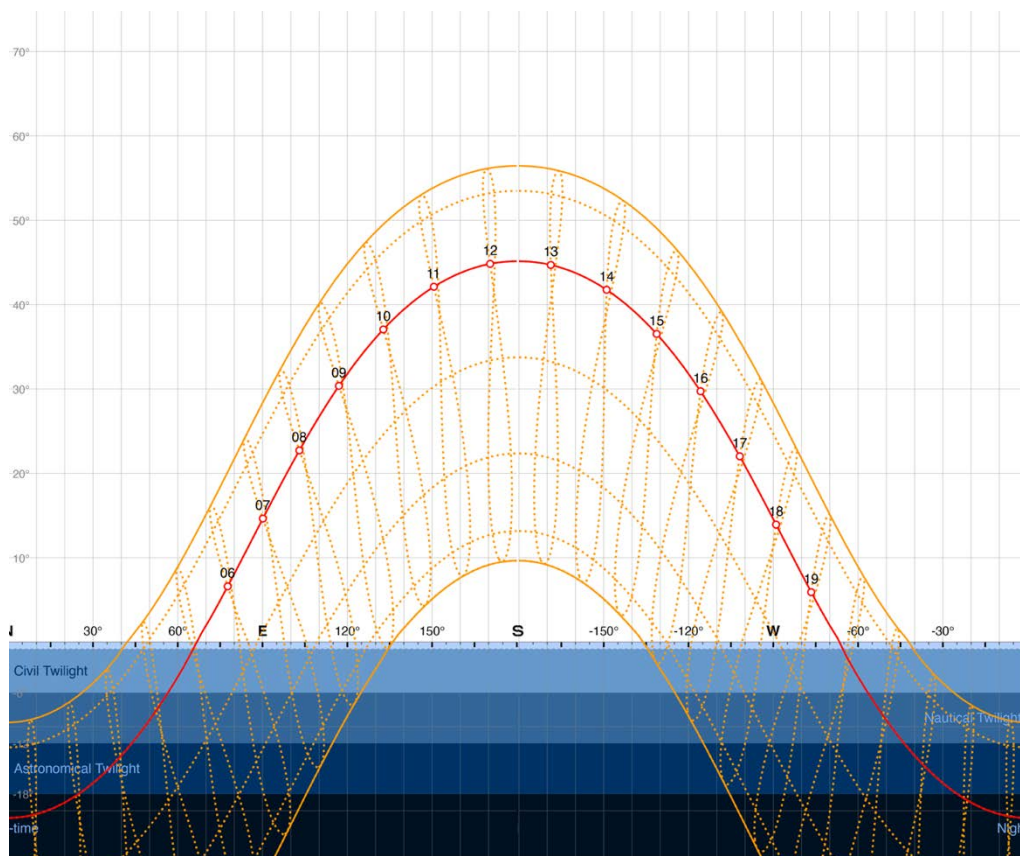
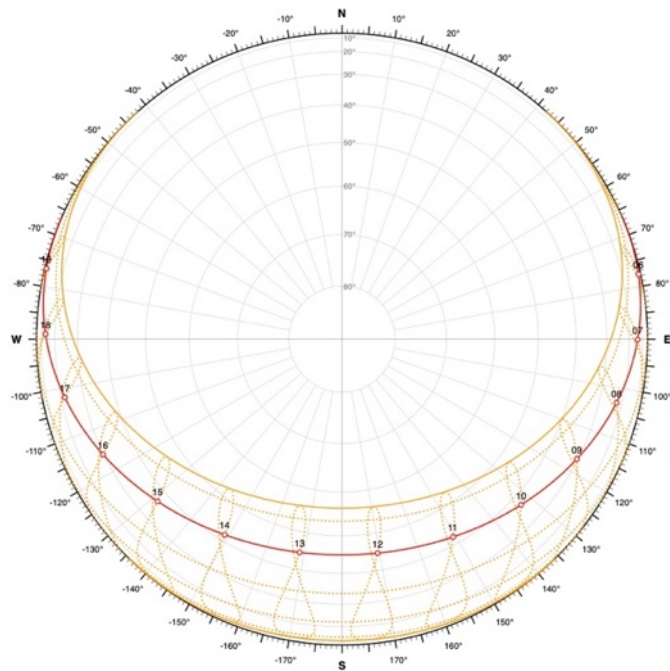
Bygningernes geografiske placering og orientering har stor betydning for hvilke dagslysvilkår der skal designes kunstlys i forhold til. I Danmark er der oftest dagslys i skoletiden, bortset fra nogle få morgentimer midt-vinter i december/januar med skumringslys. Undervisning foregår typisk mellem kl. 8 og 16, med hovedparten af undervisningen fra 8:00 til 14:30. Morgen og eftermiddag er solen altid relativt lavt på himmelen og vil ofte skinne direkte ind ad øst og vest vendte vinduer, ofte indtil 10:30 og igen fra 13:30.

Soldiagrammerne viser solhøjde og dagslængde for henholdsvis 21 februar (21 oktober) og 21 april (21 august). Her ses det tydeligt, hvor stor forskel der er på solhøjden og dagslængden i den lysere og mørkere tid af skoleåret. Sidst på forårssemestret og hen over sommeren står solen højt og dagene er betydeligt længere end skoledagen, med rigeligt med dagslys selv på overskyede dage. Sidst på efterårssemestret og hen over vinteren er der generelt lav solhøjde og dagene er oftest kun lige lange nok til at dække skoledagen, men stadig med rimeligt dagslys, bortset fra overskyede dage.



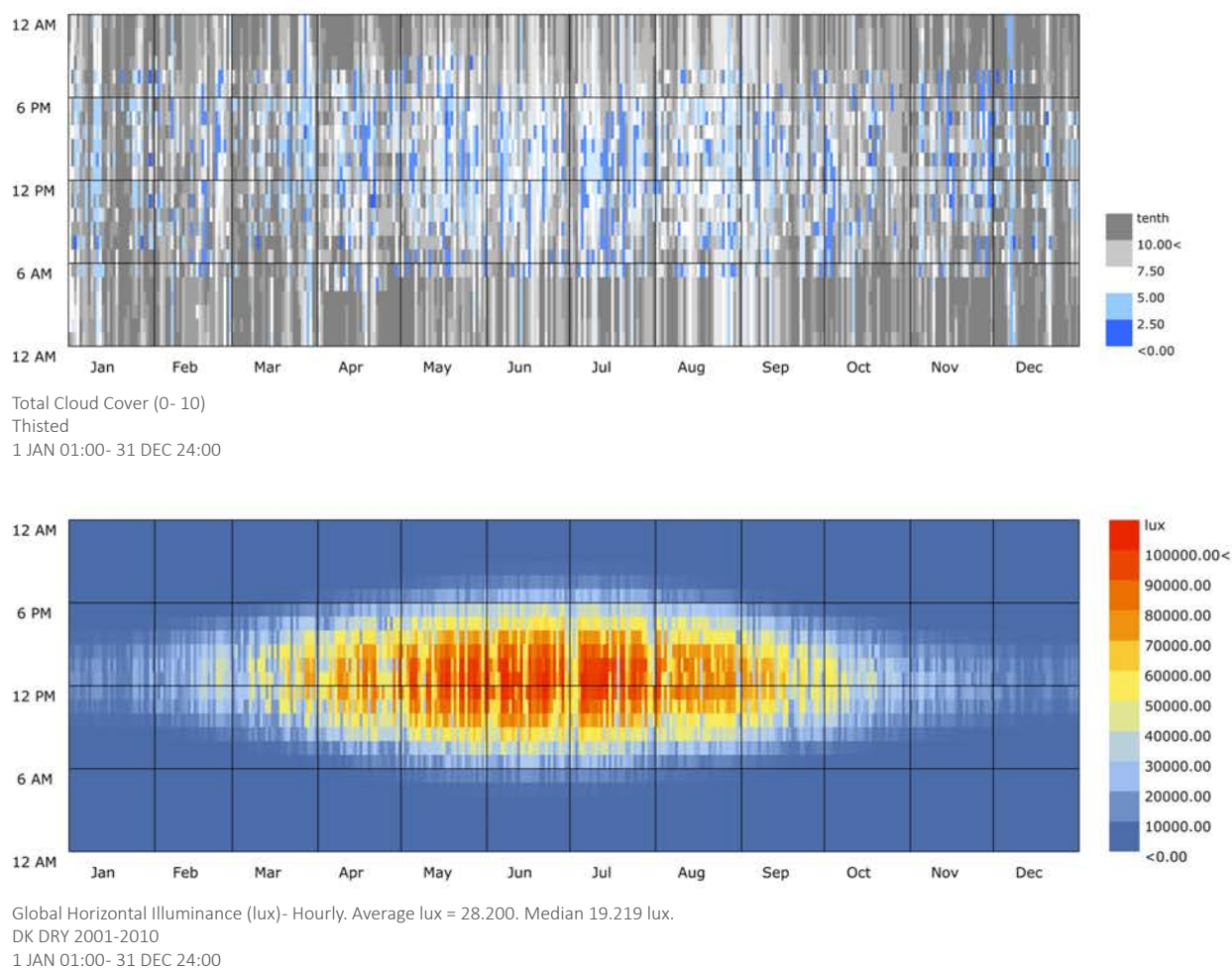
Soldiagram for Tilsted og Hanstholm Skoler på overgangen mellem vinter og forår 21 februar (og mellem efterår og vinter 21 oktober), altså godt inde i forårs-semestret (som er identisk med sol-forholdene i hen mod slutningen af efterårs-semestret).

ref: <http://andrewmarsh.com/apps/releases/sunpath2d.html>, cartesian sun-path + spherical sun-path



Soldiagram for Tilsted og Hanstholm Skoler på overgangen mellem forår og sommer 21 april, altså hen mod slutningen af forårs-semesteret (som er identisk med sol-forholdene 21 august i starten af efterårs-semesteret).

ref: <http://andrewmarsh.com/apps/releases/sunpath2d.html>, cartesian sun-path + spherical sun-path



Set i forhold til skoledagen og skoleåret, er der tre perioder, med forskellige dagslys vilkår. Som det ses af grafen: 'Global Horizontal Illuminance' er mængden af dagslys svingende i gennemsnit fra 100lux til 10.000lux alt efter om det er omkring vintersolhverv eller sommersolhverv. Fælles for hele året er en relativt lav solhøjde det meste af formiddagen og eftermiddagen, som medfører direkte sol ind af øst og vest vendte vinduer fra september til april. Grafen med: 'Total Cloud Cover' viser at variationer i skydække fordeler sig relativt jævnt hen over året.

Målte lysmiljøer på Tilsted Skole 16 oktober 2020

En fremstilling af lysmiljøerne i lokalerne er et samspil mellem årstid, tid på dagen, vejrforhold og rummets orientering. Det installerede adaptive LED lysdesign i Tilsted Skoles klasselokaler benyttes som afsæt for at diskutere lysdesign og lysmiljø generelt i projektet. Observationer, fotografier og målinger vist efterfølgende er foretaget 16 oktober 2020 i tidsrummet 14 - 14:30 på Tilsted Skole. Dette tidspunkt på året og dagen repræsenterer et tilnærmet gennemsnitligt dagslysforhold i klasseværelserne i det normale skoleår.



Østvendt facade . Facaden i skygge.

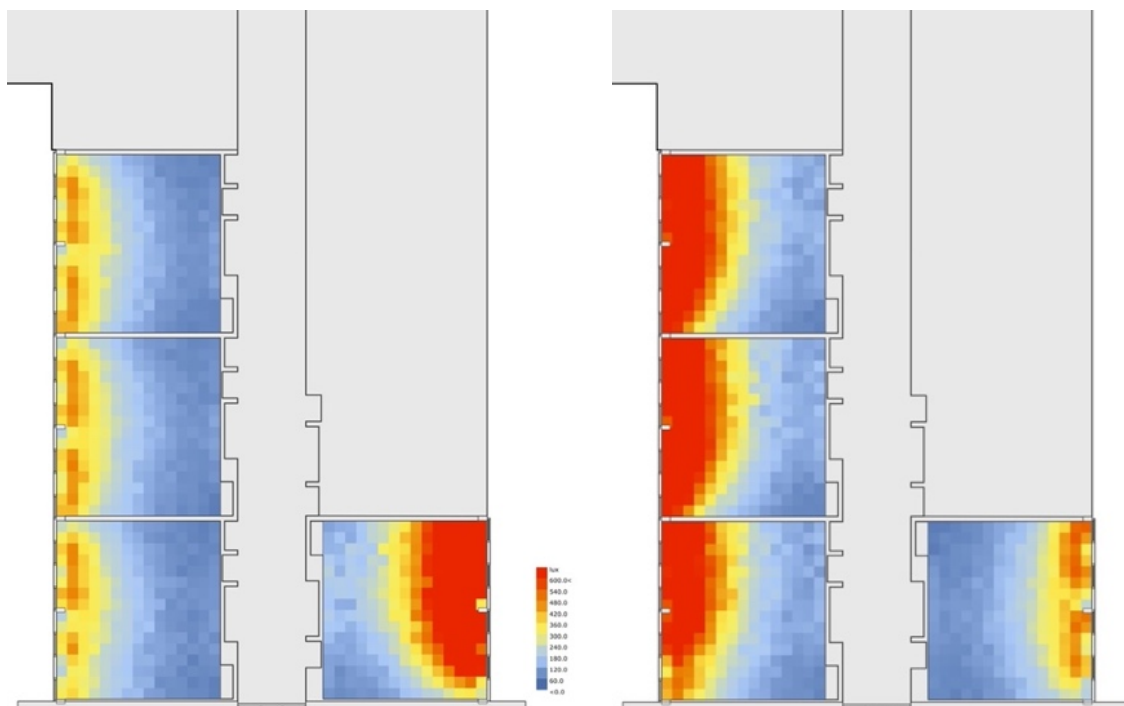


Vest- og sydvendt facade. Facaden får direkte sol.

Tilsted Skole, 16 oktober 2020, cirka kl: 14-14:30. Klar solrig dag med let eller ingen skydække.

Beregnete og målte lysforhold

Ved dagslysberegning er der lokale forhold, som er svære at medtage korrekt, for eksempel træernes indflydelse på forskellige tider af året. Herunder er dagslyset beregnet og derefter målt. Som det ses af beregningerne, er der stort lysindfald på solsiden, med store kontraster i lokalene til følge. Den eksisterende solafskærmning dækker kun opad, og derfor ikke for den lave formiddag/eftermiddags sol, men leverer samtidig en effektiv afskærmning af himmellys på alle tider af dagen. Glas i vinduerne er standard fra 1970 uden solfilter og bedrager med 10-15% reduktion i dagslyset.



Tilsted Skole, 16 oktober

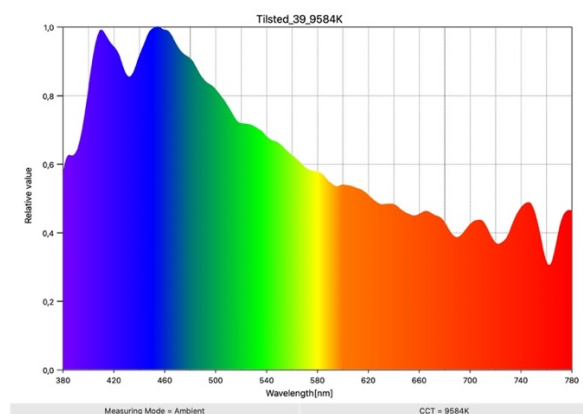
Solinflux beregnet i marts med direkte sol kl 10:00 formiddag og kl 14:00 eftermiddag.

Målte lysforhold

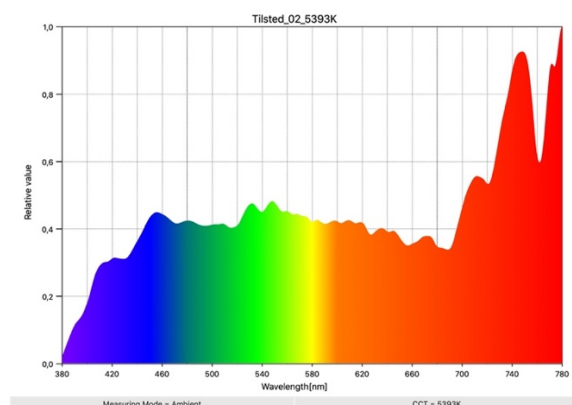
Som det fremgår af de to målinger, så er det meget begrænset hvor meget dagslys der slippes ind i klasseværelserne (cirka 1-2%), en bevidst design-beslutning i arkitektur- og facadedesign. Denne effekt er planlagt da bygningen blev bygget, hvor det forventedes at alt arbejdslys skal komme fra konstant tændt kunstlys. Den almindelige praksis på skolen er således at tænde lyset ved første klassesstime og lade det være tændt hele dagen. Det er muligt at orientere sig i lokalet, men kontrasten mellem de 60 lux indenfor og de 6000 lux udenfor er tydelig og generende.

De fleste lokaler har både et sæt mørklægnings rullegardiner, og et sæt translucente og diffuserende, hvide gardiner. Det er almindeligt, at plissegardinerne altid er for vinduerne, og i Hanstholm Skole er mørklægningsgardinerne næsten altid trukket halvt eller helt ned. I Tilsted Skole er mørklægningsgardinerne kun trukket for en del af vinduerne, men ofte helt ned. Det er således normal praksis at have diffuse gardiner, eller mørklægnings rullegardiner, for alle vinduer det meste af tiden.

Dagslysforhold i testlokaler på Tilsted Skole



Tilsted Skole, dagslys influx. 16 oktober 2020, cirka kl: 14-14:30. Klar solrig dag med let eller ingen skydække. Vest-vendt lokale. Cirka 6000 lux målt lodret op udenfor, uden direkte sol, med farvetemperatur på cirka 10.000K.



Tilsted Skole, dagslys influx. 16 oktober 2020, cirka kl: 14-14:30. Klar solrig dag med let eller ingen skydække. Vest-vendt lokale. Cirka 60-120 lux målt midt i rummet på bordflade (med en variation på 40-240 lux hen over lokalet), med farvetemperatur på cirka 5.000K. Der sker således en kraftig reduktion af lysindfaldet (fra 6000lux udenfor til 60-120 lux indenfor), en høj variation af lysniveau og kontrast.

Indførelsen af Smartboards har medført yderligere begrænsning på lysmiljøet. Smartboards er oftest stadig baseret på videoprojektorer, der har meget lav lysstyrke og meget lav kontrast i billedet. Ofte projiceres der på hvide blanke skærme, man kan skrive på, som giver meget svag billeddannelse af det projicerede billede. De kan ikke fungere med dagslys i lokalerne, så en del af forklaringen på de afdækkede vinduer er at der ofte benyttes Smartboard, hvor der er brug for afskærmning. Det komplicerede arbejde med justering af gardiner medfører at der sjældnere åbnes for dagslys og udsigt resten af tiden. En del af løsningen i det nye LED lysdesign er således også at opfordre til at skifte de projektorbaserede Smartboards til LED baserede skærme, som ikke er følsomme overfor dagslys i lokalerne.



Tilsted Skole, dagslys influx. 16 oktober 2020, cirka kl: 14-14:30. Klar solrig dag med let eller ingen skydække. Vest-vendte lokaler.

På billederne til venstre ses testlokalet med det nye LED lys.

På billederne til højre ses referencelokalet med det eksisterende lys med lysstofrør.

Lysforhold i test- og referencelokaler med kunstlys tændt og slukket

På billederne til venstre ses testlokalet med det nye LED lys. Denne måling er fra lokalet med den adaptive LED belysning tændt, 9 armaturer, med 4.000K farvetemperatur, 40% uplight og 40% downlight. Her opnås en jævn lysfordeling i lokalet med cirka 500 lux på bordflade, med farvetemperatur på cirka 4.500K. Det var nødvendigt med minimum 9 armaturer for at opnå lysfordeling og skyggetegning i rummet, hvorved der samtidig opstod mulighed for brugerønsker til lysintensitet ud over minimumskrav. En manuel op-justering af lysintensiteten til 100% uplight og 100% downlight, 4000K, medfører lysintensiteter målt på bordflader på 800-1000 lux. Det nye LED lys har således rimelig med kapacitet.

På billederne til højre ses referencelokalet med det eksisterende lys med lysstofrør. Denne måling er fra reference-lokalerne med 12 lysstofrør-armaturer tændt. Her opnås en jævn lysfordeling i lokalet med cirka 6-700 lux målt på bordflade, med farvetemperatur på cirka 3.000K, som er lysstofrørens specificerede lysfarve. Som det kan ses af målingerne, er der valgt en høj kvalitet lysstofrør med relativt god farvegengivelse og spektralfordeling.

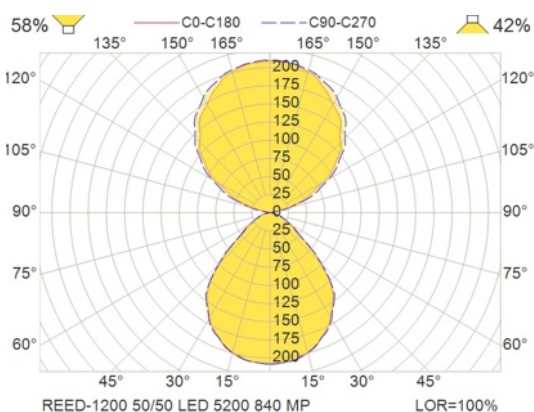
LED LYSTEKNOLOGI – REED ARMATURER FRA GLAMOX

De nye LED armaturer produceres til projektet i 2019 og installeres i klasselokalerne hen over sommeren 2019. Armaturernes specifikationer er:

LED armaturer, model REED-1200 50/50 WH LED 6500, Glamox.

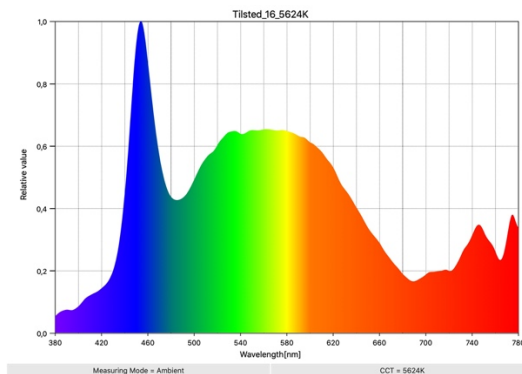
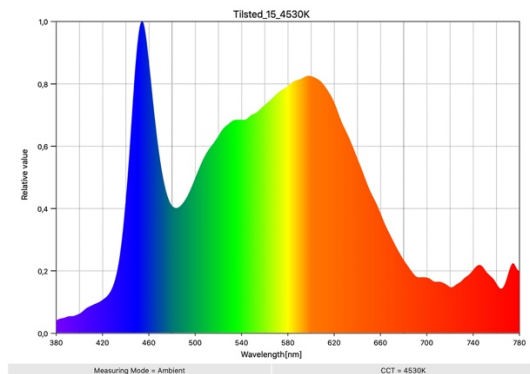
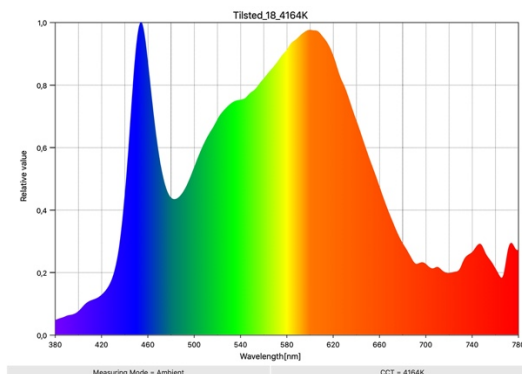
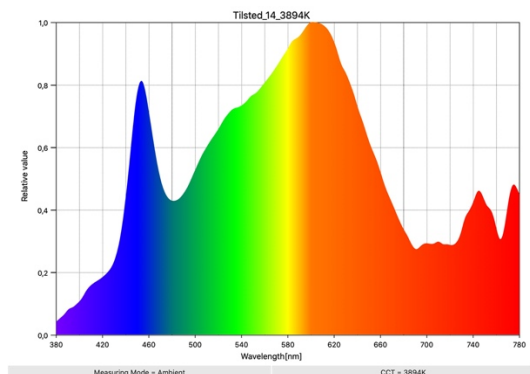
Elforbrug totalt: 37W. Lumen/Watt: 141.

CRI>80 (de ophængte armaturer er målt til CRI 85-92 alt efter indstilling hen over skalaen 2700-6500K)



Glamox REED-1200 armatur design.

Glamox REED-1200 lysfordeling i den benyttede version med fordeling 50% uplight og 50% downlight

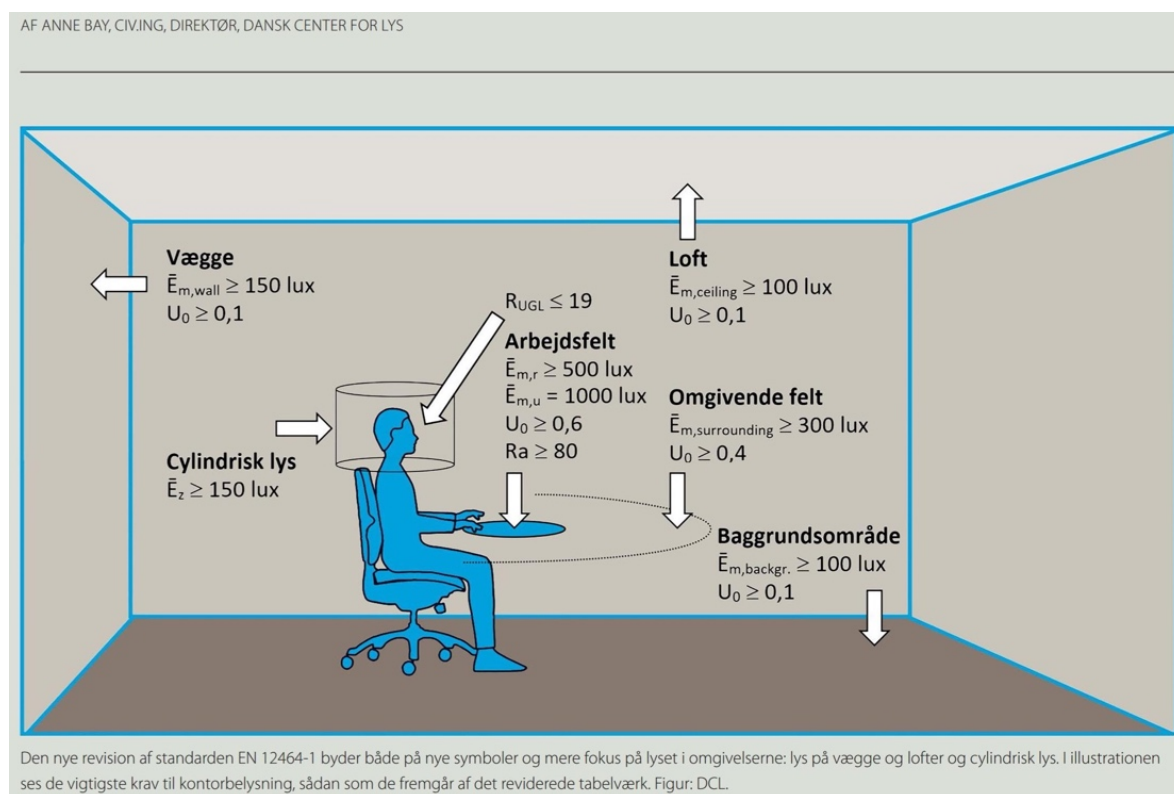


Glamox REED-1200. Spektralmåling ved indstilling på henholdsvis 3500K-4000K-4500K-6500K



Tilsted Skole, østvendt klasselokale, eftermiddag. GlamoX REED-1200 armatur med 2700K opad og 6500K nedad. Her ses LED lysets samspil med lysfarver og lys intensiteter i dagslyset udenfor. En væsentlig effekt ved det nye LEED lys er oplevelsen af at forskellen mellem lyset indenfor og lyset udenfor ophæves, og derfor helt forandrer rumoplevelsen af lokalet og indfører en tæt sammenhæng mellem inde og ude. Dagslysets variation og dynamik er ikke længere et problem, der skal skærmes imod, men en integreret del af lokalernes lysmiljøer, suppleret og varieret med kunstlysets intensiteter og hvidfarver.

STANDARDEN DS/EN 12464-1



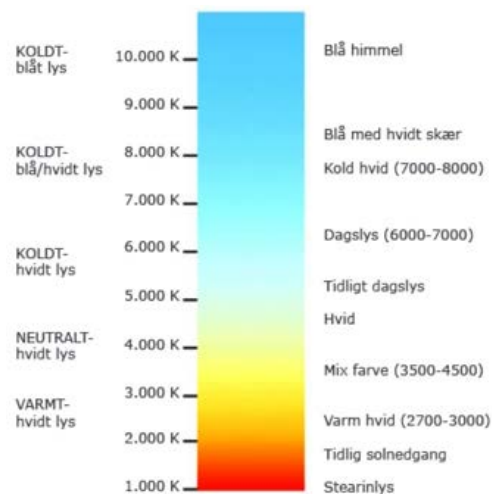
Lysdesignet i klasseværelserne er søgt udformet, så de lever op til den kommende standard DS/EN 12464-1. Her vist i visuel fremstilling i LYS 3 2019 af Anne Bay.

Standarden DS/EN 12464-1 omfatter krav til belysningen på arbejdsfladen, skærme og de nære omgivelser. Baseret på ny viden om omgivelseslyset er standarden revideret og stiller nu også krav til belysning i loft og på vægge, desuden er der krav til de ydre omgivelser. Samtidig stilles der krav om at belysningen skal være regulerbar i klasseværelser og aulaer samt opfylde energikravene i EN 15193:2007. Den cylindriske belysningsstyrke påvirker fremfor alt den visuelle kommunikation og fremmer muligheden for at tolke ansigtet, hændelser og genstand. Standarden angiver en cylindrisk belysningsstyrke i eksempelvis kontorer og skoler.

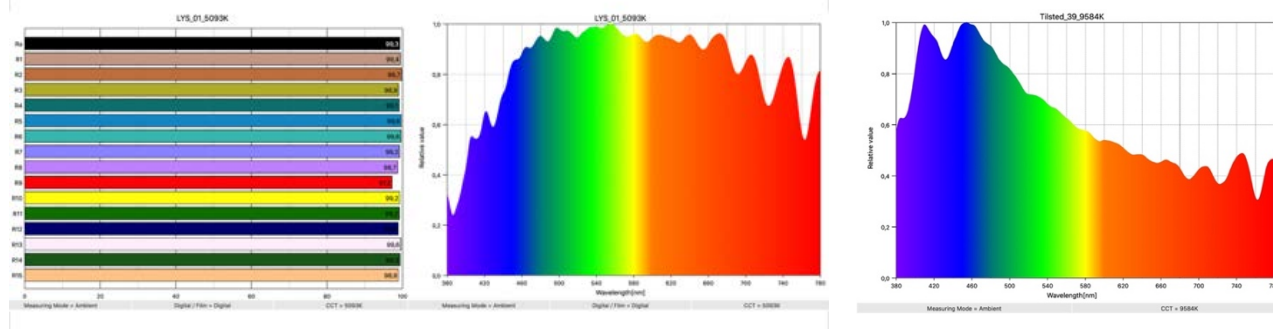
NYE KVALITETER I LED LYSKILDER

Lysspektre, farvegengivelse, Kelvin og lyskilde teknologier

Historisk har det el-drevne kunstlys en udvikling af lyskvaliteter formet af de lysgivende teknologier. Hvis man tager dagslyset som reference, vil en spektralmåling vise et relativt jævnt fordelt spekter. Her er vist målingerne af en let overskyet dag, hvor det kølige blå/lilla himmellys er let skærmet, såvel som det rødeste varme lys. På en solrig dag uden skydække ville der være høj lysintensitet i hele spektret.

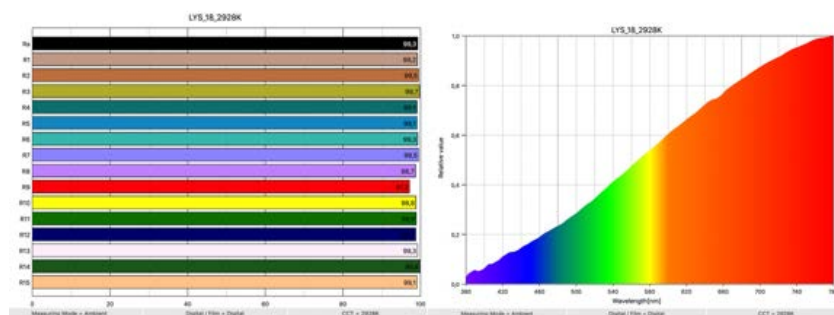


Direkte solindfald — RA 99.3 – 5093K



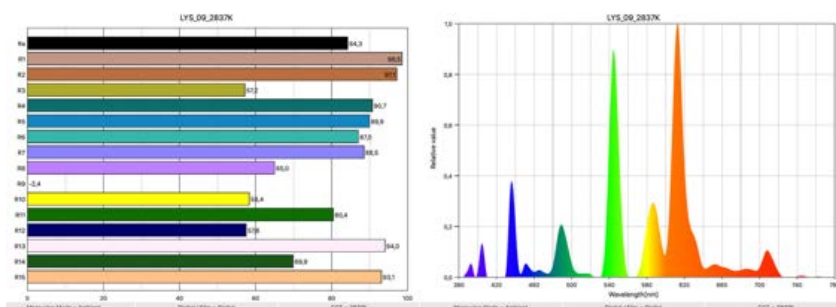
Med kunstlyset genereret af glødepærer, der lyser ved at varmes op, er der meget lidt af den koldere lys. Selv halogenpærer, som er konstrueret til at hæve farvetemperaturen, altså øge det blålige spekter, er lyset stadig dominerende gulligt/rødtligt.

Halogen glødepære — RA 99.3 – 2928K



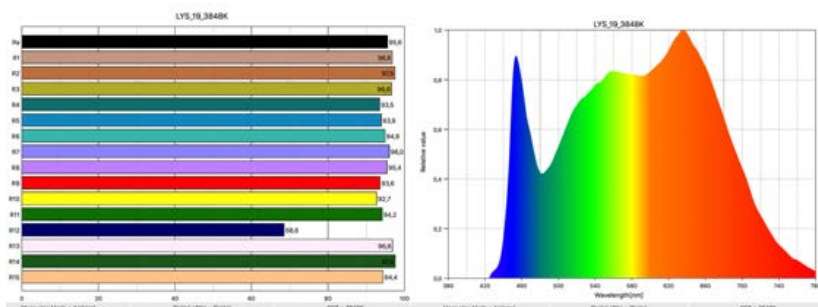
Lysstofrør indfører et dilemma med fordelingen af lys hen over spektret, hvor bestemte frekvenser er meget repræsenteret, og andre slet ikke. Det fragmenterede og ofte flimrende lys fra de floucerende rør, har ofte svært ved at gengive farver og mangler helt dele af spektret.

Lysstofrør – RA 84.3 – 2837K



LED lyskilder er konstrueret af en eller flere lysgivere med hver sit designede lysspekter, som er nået til en teknisk udvikling, hvor der kan formes lysspektrere, der er sammenlignelige med dagslys.

LED – RA 95.6 – 3848K

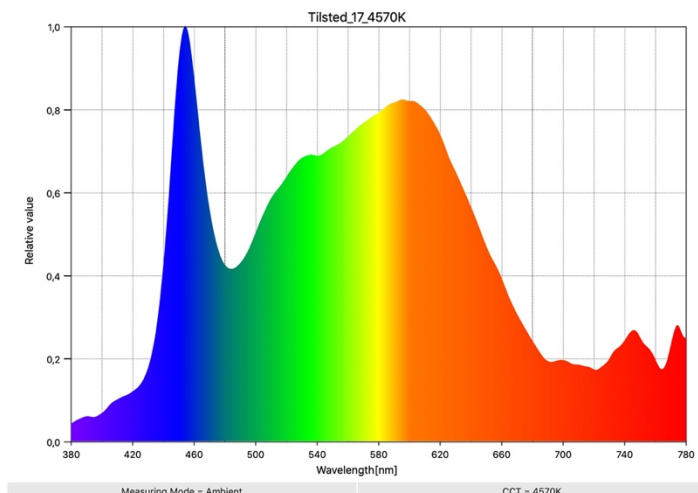
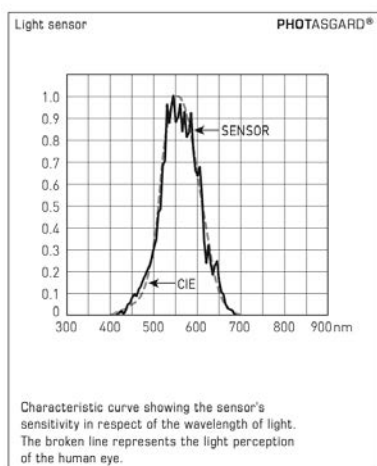


Oplevelse af lys

Lys er forbundet med vores evne til at se (perception). Synsansen ser i det lysspekter, som indeholder spektre af lysbølger centreret omkring 555nm (photopic range) med størst følsomhed i det grøn-gul-røde. Projektets lysmålere, som er ophængt i alle testlokaler på skolerne samt udenfor i dagslyset. Lyssensorerne er alle filtreret til at registrere det synlige lys og i forhold til synsansens følsomhed, alt efter bølgelængde.

For at vi som mennesker kan se de rødere farver, skal de således være relativt lysintensive, da vores lysfølsomhed er lavere i de rødere farver. Dette kan ses i LED lysgiveren i armaturerne fra Glamox, hvor det er forsøgt at hæve de rødere farver for at kompensere for den mindre følsomhed i synssansen. Energioptimering af LED lysgivere er et delikat kompromis med at opnå kvalitet i synligheden i de rødere områder uden derfor væsentligt at øge energiforbruget.

Et lignende forhold gør sig gældende i det blålige lys. For at vi som mennesker kan se de blålige farver, skal de således være relativt lys-intensive, da vores lysfølsomhed er lavere i de blålige farver. Dette kan ses i LED lysgiveren i armaturerne fra Glamox, hvor det er forsøgt at hæve de blålige farver for at kompensere for den mindre følsomhed i synssansen. Energioptimering af LED lysgivere er ikke så problematiske med at opnå kvalitet i synligheden i de blålige områder, da de er væsentligt mindre energiintensive end de rødlige, og derfor ikke bidrager væsentligt til at øge energiforbruget.



Glamox armaturer har således LED installeret som beforder et tilstrækkeligt melanopic lys ved mere end 4500K og lysintensiteter på over 400 lux. Det er således muligt at brugernes valg af scenarier, farvetemperaturer og lysintensiteter lige så meget er et biologisk valg ud fra oplevelser af indvirkningen af melanopic lys, som det er et valg ud fra synsoplevelser indenfor photopic lys.

At leve med lys - spektralfordelingens biologiske og perceptive indflydelse

Lys er også forbundet med vores biologi, biologiske ur, og derfor døgnrytmer mellem vågen og sovende tilstand. Det er bl.a. niveauet af blåligt/lilla lys omkring 490nm (Melanopic Light) der beforder om kroppen er i dagstilstand eller i nattetilstand. Det kan forstås som, om man er disponeret for at være vågen eller sove.

Søvnforskere forklarer at lysets påvirkning af melatonin-produktionen er en funktion, der trigges ved et vist niveau af blåligt lys (Melanopic Light).⁴ Den biologiske reaktion på det melanopiske lysniveau er altså ikke en kurve af følsomhed, men en mere robust enten/eller trigning ved et vist niveau af lysintensitet i det Melanopic spekter. Det er beskrevet og måles som: CIE Daylight Efficacy Ration (DER), hvor DER skal være mere end 0.80 for lys der skal stimulere vågentilstand (Melanopic Response), og mindre end 0.30 for at promovere søvntilstand. LED lysgiverens indhold af Melanopic lys og dets potentiale for biologisk indvirkning på vågen/søvn tilstand, måles og opgøres i Melanopic EDI.

Det nye LED lys, der installeres i den Internationale Rum Station⁵, kan fungere som et konkret eksempel på lysdesign, der forsøger at skabe et fungerende dagslys og natte lys med kunstigt lys fra LED. Viden om perceptive og biologiske behov for lys er benyttet i design af lysmiljøet.

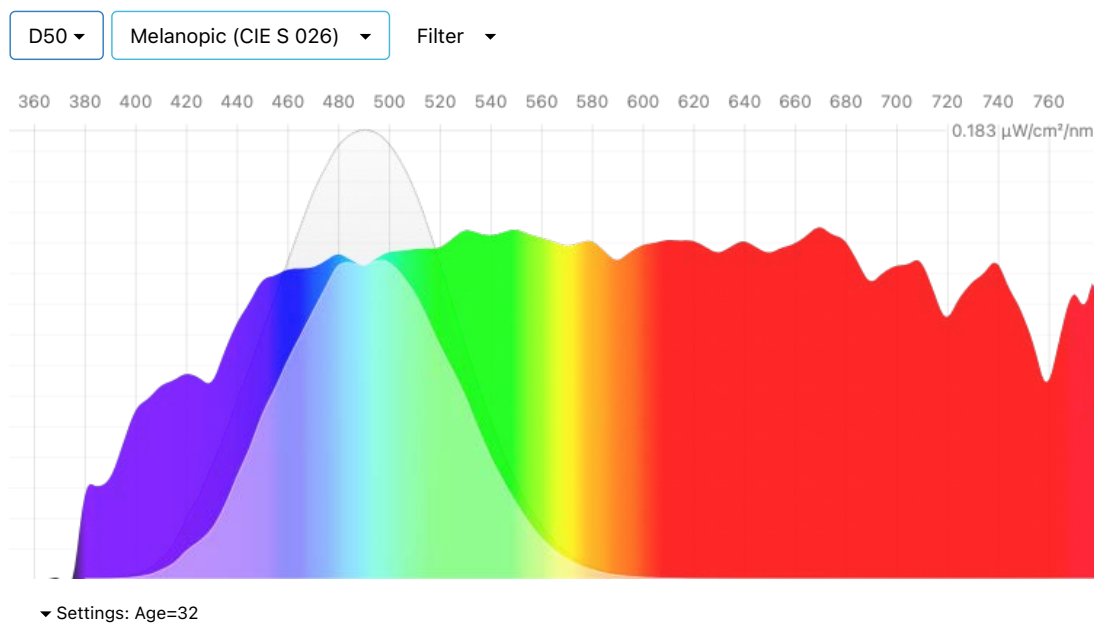
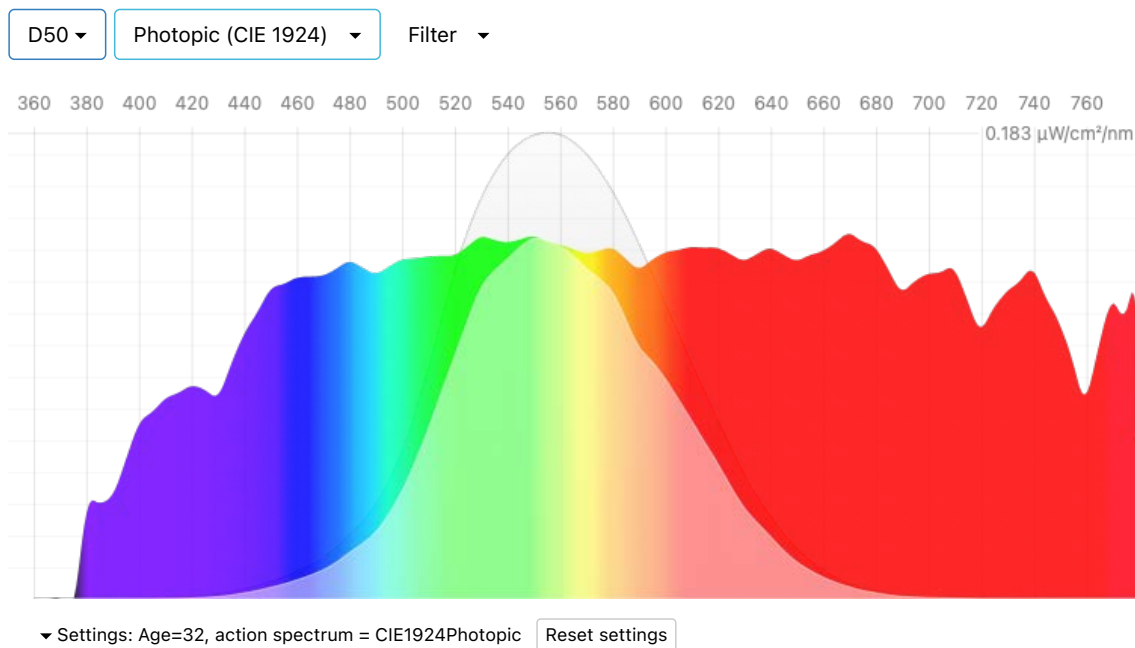
Der installeres følgende tre lysmiljøer:

1. High Visual Activity. Standart white light (4500K, 210 lux)
2. High Circadian / High Alertness: Blue-enriched white light (6500K, 420 lux)
3. Low Circadian / Low Alertness, Pre-sleep: Blue-depleted white light (2700K, 50 lux)

Det giver en indikation af, hvilke lysspektrere og hvilke hvid-farver (2700-4500-6500 Kelvin) der er valgt. Hvis dette koncept overføres direkte til klasselokalerne i folkeskolen, vil man skulle installere hvidt lys med minimum 4500K, 420lux og ekstra intensitet i det Melanopic spekter.

⁴ Steven W. Lockley (Professor, Harvard Medical School and Surrey University. *Redesigning light for alertness, sleep and health*) BLOXHUB event: Light impact on humans. Copenhagen. 11 maj 2021.

⁵ Hentet fra præsentation af Steven W. Lockley (Professor, Harvard Medical School and Surrey University. *Redesigning light for alertness, sleep and health*) BLOXHUB event: Light impact on humans. Copenhagen. 11 maj 2021.



De to grafer viser henholdsvis spektret og følsomheden for visuelt lys (photopic) og biologisk lysfølsomhed (melanopic).

Grafer hentet fra: fluxometer.com

Vejledninger og værktøj findes på <https://luox.app/about> og <https://fluxometer.com/rainbow/#lid=Outdoors/10AM%20LA%20sunny>

BETYDNINGEN AF SPEKTRALFORDELINGEN I LYSMILJØET FOR UNDERVISNINGSMILJØET

Lysmiljøets betydning for elever og lærere kan betragtes ud fra, hvordan det servicerer opgaveløsning og læring. Det er nødvendigt med tilstrækkelige visuelle kvaliteter, som de fremgår af DS/EN 12464-1 (beskrevet side 40). Men hvilke relationer er der imellem spektralfordeling i lysmiljøet og befordring af læringsaktivitet?

Et nyt studie undersøger, hvad betydning det har for læringsaktiviteter, om lysmiljøet indeholder tilstrækkeligt Melanopic Light:

Ekstrakt af abstract: 'We tested the effect of daytime indoor light exposure with varying melanopic strength on cognitive performance in college-aged students. Performance speed on the motor sequence learning task was 3.2 times faster ($p < 0.05$) during the daylight-like high-meLEDI condition compared to the conventional low-meLEDI. These results demonstrate that exposure to high-melanopic (short wavelength-enriched) white light improves processing speed, working memory, and procedural learning on a motor sequence task in modestly sleep restricted young adults, and have important implications for optimizing lighting conditions in schools, colleges, and other built environments.'⁶

En af konklusionerne er at: '*Performance speed on the motor sequence learning task was 3.2 times faster ($p < 0.05$) during the daylight-like high-meLEDI condition compared to the conventional low-meLEDI.*' som giver indikation af at koncentration og fokus ved læringsaktiviteter er væsentligt påvirket af, om der er tilstrækkeligt med lysintensitet i spektret for Melanopic Light i lysmiljøet.

Hvis man ser på den måde LED er konstrueret for at opnå de forskellige farvetemperaturer, betyder det at alle LED med under 4000-4500K vil have for lidt lys i spektret til at bruges i dagtimerne i en skole, hvor man forventer koncentration, fokus og andre forudsætninger for læringsaktiviteter er understøttet af lysmiljøets biologiske påvirkning til vågen tilstand.

Hovedparten af det lys der installeres og er blevet installeret de sidste mange år, er således ikke konstrueret til at levere det rette spekter af lys til at understøtte undervisning på skoler.

Projektets lysgivere kan levere det rette lys til at befordre 'vågen' tilstand i klasses timerne, og det er måske en del af forklaringen på at eleverne konsekvent vælger 4000K-4500K eller koldere lys, og at de ved koncentreret arbejde vælger lysintensiteter over 500 lux.

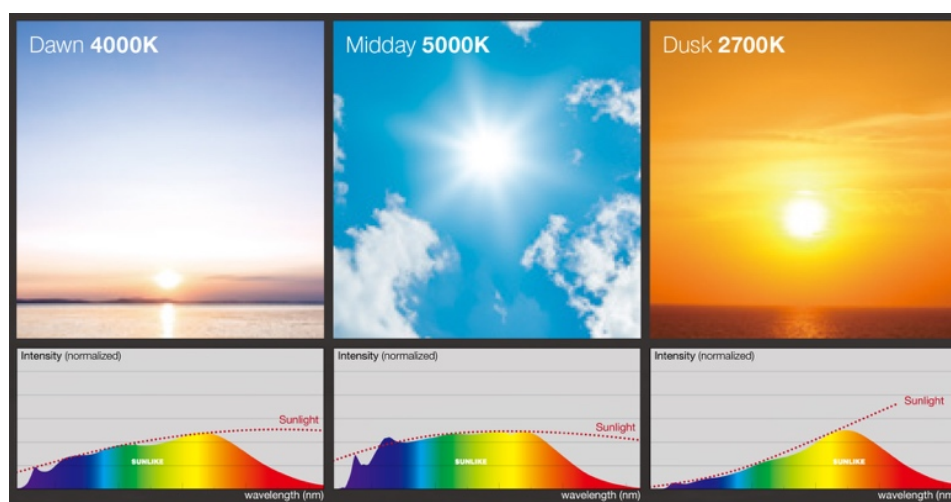
⁶ Grant Leilah K., et.al. *Daytime Exposure to Short Wavelength-Enriched Light Improves Cognitive Performance in Sleep-Restricted College-Aged Adults*. Journal paper: Frontiers in Neurology 2021/12 page 197

DAGSLYS KVALITETER I NYERE LED

Der arbejdes ihærdigt med at forbedre lyskvaliteterne fra LED, og nyere produkter viser hvad der er muligt at forvente af lyskvalitet i de nuværende og i de næste generationer af armaturer.

SunLike LED'er fra Seoul Semiconductor

Et eksempel på LED typer, der forsøger at benytte dagslys spektralfordeling som reference for LED, er SunLight LED fra Seoul Semiconductors. De produceres i en række Kelvin versioner, har meget høj farvegengivelse, og en effektivitetsgrad på 81-108 lumen/watt.



Versionerne har hver sin karakteristiske spektralfordeling, hvor kun lysgivere med højere Kelvin vil have tilstrækkeligt Melanopic Light og fungere som dagslys lyskilder, der beforder vågen tilstand. Skal man benytte lavere lysintensiteter, for eksempel 3-500 lux eller lavere, så er det nødvendigt bevidst at hæve indholdet af blåligt/lilla lys, for at bibeholde kunstlysets indflydelse på vågen tilstand.

DAY og NITE LED'er fra Samsung

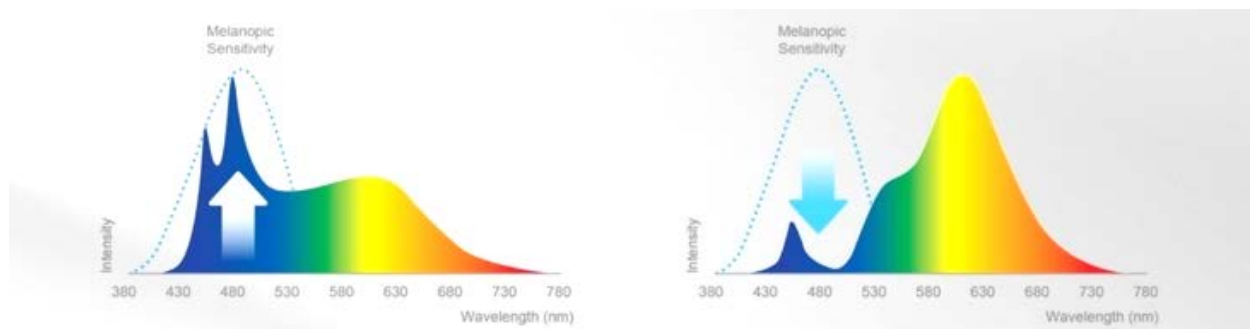
Et andet eksempel er DAY og NITE LED, som med udgangspunkt i en perceptiv og biologisk forståelse af lysbehov for henholdsvis Melanopic Light og Photopic Light, producerer LED med lys tilpasset det synlige spekter, men med ekstra hævet Melanopic Light niveau i DAY LED typen og undertrykt i NITE typen, således at der kan opnås fuldt synligt spekter, men tilpasset om der skal beforders vågen eller søvn tilstand. De produceres i en række Kelvin versioner, har meget høj farvegengivelse, og en effektivitetsgrad på DAY 110-130 lumen/watt; NITE 80-125 lumen/watt.⁷

⁷ Med reference til Samsungs egne oplysninger: [samsung.com/led/about-us/news-events/news/news-detail-55](https://www.samsung.com/led/about-us/news-events/news/news-detail-55), beskrives potentialet på følgende måde:

DAY can suppress the body's melatonin level more than 18 percent below that of conventional LED lighting. Available in a variety of color temperatures from 3000K to 6500K, the DAY package can be used in a diverse range of indoor applications, such as schools, offices, libraries and industrial sites, to enhance an individual's sense of awokeness and energy level.

NITE can provide a proper level of brightness without hindering the release of melatonin, helping people to maintain the hormone level as if they were in a calm natural atmosphere at night. The body releases about five percent more melatonin under lights.

The DAY and NITE packages can also be combined into a single luminaire to help people maintain their natural circadian rhythm 24 hours a day. This duo-lighting option is optimal for those who spend most of their time indoors and struggle with confused body clocks.



Mere dagslys og dagslys LED som del af et dagslys-baseret lysmiljø

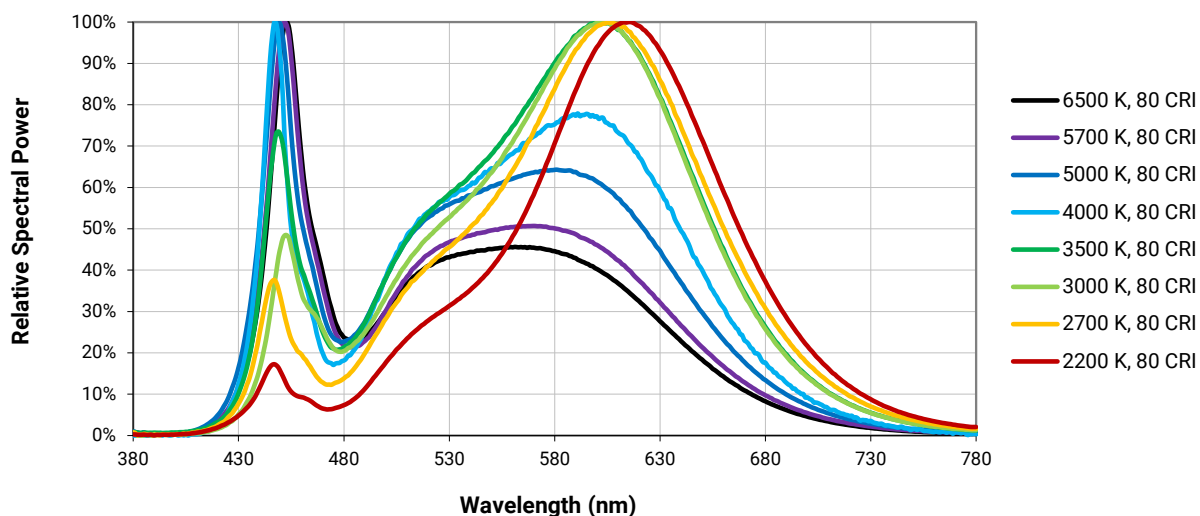
Man kan forvente at effektiviteten forbedres væsentligt, og derfor at LED med dagslys kvaliteter og indbyggede lyskvaliteter til at bidrage til døgnrytme og vågen/søvn tilstands påvirkning vil blive muligt at benytte i almindelige LED armaturer inden for en overskuelig årrække.

I perspektivet af energioptimering vil der være store energibesparelser ved at benytte naturligt dagslys til at give tilstrækkeligt Melanopic Light indendørs i dagtimerne (i Danmark for eksempel gennem nordvendte ovenlys i hvert lokale) og således hovedsagelig benytte kunstlyset til at supplere de visuelle lys spektre.

I perioder med utilstrækkeligt dagslys, og is specielt i perioder med utilstrækkeligt Melanopic Light i dagtimerne indendørs, vil disse nye LED typer kunne sikre at kunstlyset giver tilstrækkeligt Melanopic Light. Det kunne så ske ved at supplere dagslyset eller, hvis det justeres til tilstrækkelig lysintensitet, fungere som primær lyskilde, både med hensyn til Photopic og Melanopic Light.

CREE spektralfordeling J-series 2835 LED

Et LED produkt, som kan findes i de førende belysningsproducenters armaturer, viser den spektralfordeling som leveres i forskellige Kelvin, med tydelig fremstilling af hvordan der varieres på det energikrævende røde spekter i varmere Kelvin, og at det hovedsagelig er det blå spekter, der benyttes til at variere spektralsammensætningen i køligere Kelvin retning.



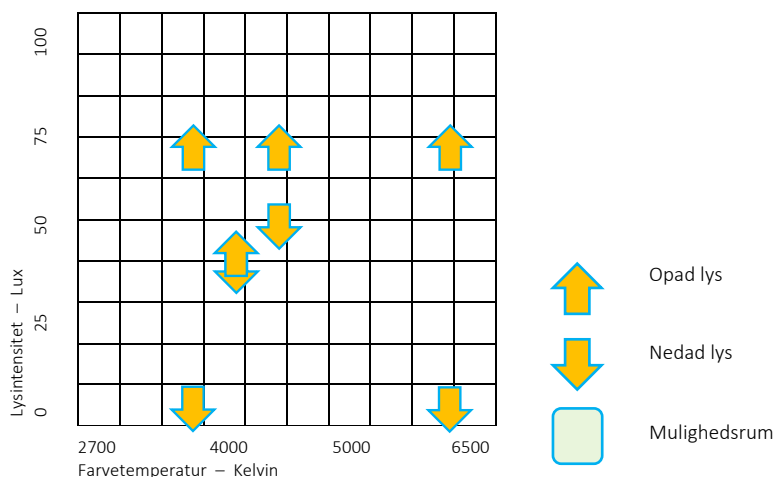
KAPITEL 3

INTERFACEDESIGN OG ENERGIOPTIMERING

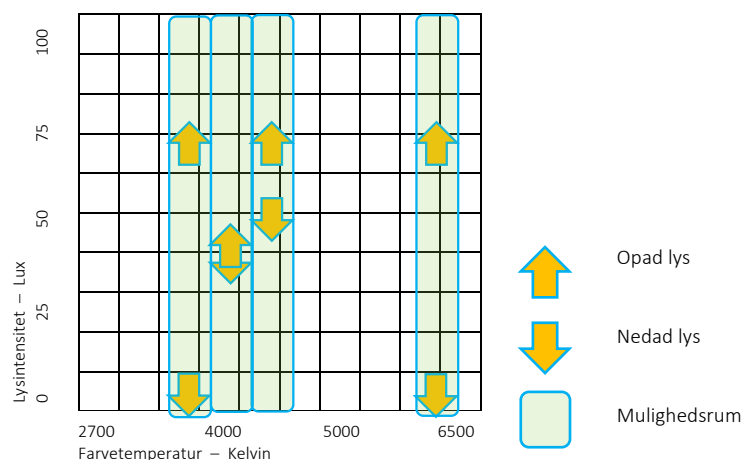
Interfacedesign og brugeradgang

I udformningen af det adaptive lys er designet af brugernes adgang til at justere det tekniske lyssystem essentiel. I interfaces designs interaktionen mellem brugerbehov og brugernes muligheder for at forme deres lysmiljø. Ofte designs interfacen med begrænset brugeradgang, typisk med et sæt forvalgte scenarier, og den bagvedliggende styrings automation sættes til at tænde/slukke, igangsæt af data fra bevægelsesmålere (PIR) og rumlys sensorer.

Projektet med adaptivt lys har brug for at tilgå designet af interfacen på en måde, således at det fulde potentiale af lysindstillinger er til rådighed for brugeren, og integreret med styringsautomatikken på måder, der snarere sikrer servicering af brugernes valg, end indfører begrænsning gennem forud bestemt og begrænset adgang til justeringsmulighederne.

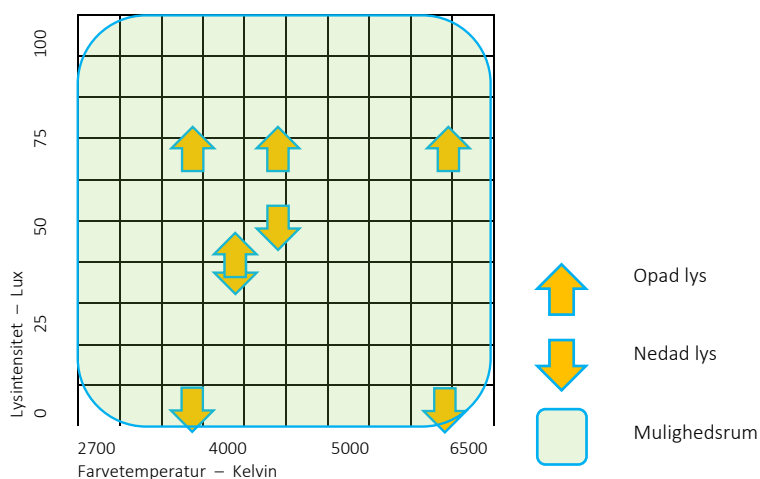


Interface kun med indstilling af scener. De mulige lysindstillinger er begrænset til de forvalgte positioner, og alle andre indstillinger er ikke mulige.



Interface med indstilling af scener og lysintensitet. Der kan justeres i lysintensiteten ud fra de forvalgte positioner, men ikke udenfor de forvalgte farvetemperaturer, og alle andre kombinationer af farvetemperaturer og lysintensiteter er ikke mulige.

Det er intentionen at gøre det fulde mulighedsrum tilgængelig for brugeren, og at beholde det fulde spekter af variationsmuligheder, således at interfacen bliver et redskab for brugerne til at afprøve og vælge sine egne lysmiljøer. Som det ses af første figur giver en interface, der udelukkende er scenarie-baseret, kun mulighed for at vælge de forud indstillede scenarier, og alle andre indstillinger er uden for rækkevidde af brugeren. Etableres der yderligere en adgang til at hæve og sænke lysintensiteten, så opstår mulighederne i anden figur, hvor der kan forandres indenfor de smalle bånd af valgte farvetemperaturer, men ikke udenfor/imellem båndene.



Interface med indstilling af scener, lysintensitet og farvetemperatur. Det er her muligt at indstille alle mulige kombinationer af lysintensitet og farvetemperatur, og de forvalgte positioner er nu et afsæt til at vælge type af lyssætning, som derefter finjusteres til den konkrete situation.

For at opnå den fulde adgang for brugerne til mulighedsrummet i indstillingerne af lysmiljøet, er det nødvendigt med direkte adgang til at justere alle de grundlæggende parametre, direkte og hver for sig. Interfacen skal give brugerne direkte adgang til at stille alle parametre i LED armaturerne gennem fire parametre: lysintensitet og farvetemperatur for både uplight og downlight belysning.

Lysmiljøer som service for undervisningsmiljøer

For at et adaptivt system skal fungere forståeligt for brugerne, og servicere deres behov for lysmiljøer, skal alle enkeldele i belysningen og styringen finjusteres til at fungere sammen med det daglige undervisningsmiljø. Lysmiljøet kan tænkes som en service, der har et formål for slutbrugerne, men det skal også involvere en række interessenter, for at kunne fungere tilfredsstillende. I en servicedesign tænkning betyder det, at lysinstallationen og lysmiljøet kun fungerer optimalt, hvis alle enkeltdeler og alle interessenter understøtter servicen, og at alle parthavere opnår tilfredsstillende resultater fra hver deres perspektiv. I dette projekt involverer 'lysmiljø som service', ud over slutbrugerne, også hensyn til energioptimering, undervisningsmiljøet, bygningens vedligeholdelse, og problematikker omkring installation og udstyrsleverandører.

Projektets samskabelsesproces tog udgangspunkt i at etablere et 'Living-Lab' hvor slutbrugerne fik afklaret et lysdesign og interfacedesign, som servicerede deres behov i undervisningen. Fra dette udgangspunkt af optimale lysmiljøer for undervisningen er de andre parthaveres/interessenters bidrag undersøgt og forhandlet.

Det betyder bl.a. at bevægelsesensorer kun benyttes til at slukke lyset, brugerne må selv tænde ved behov for kunstlys. Samtidig er bevægelsesensorens slukke-funktion sat til 60 minutter, for at sikre at den automatiske slukning ikke indgriber i undervisningen, for eksempel ved at slukke midt i en koncentreret stille øvelse. Den nye brugerkultur i klasselokalerne er, at man selv både tænder og slukker kunstlyset, som en integreret del af dagligdagens aktiviteter. Ligeledes er der ikke tilsluttet lysniveau-følere, hverken indenfor eller udenfor, da den adaptive tilgang til lysmiljøets justering er, at en udviklet brugerkultur, der er opmærksom på lysmiljøet i klasselokalet, løbende selv indstiller kunstlyset til brugerbehov, og derfor også justerer i forhold til forandringer i dagslysforhold.

Store krav til tekniske detaljer i interface design med adaptivt lys

Der opnås intuitiv brug ved at programmere interfacen til det adaptive kunstlys med kun kvalitative og brugbare indstillingsmuligheder, og tilpasse teknikken til at levere dynamikker, der er tilpasset en perceptiv oplevelse. Der justeres i detaljer med kurver, delays, vandringer og dynamikker i interfacens virkemåde, således at interaktionen opnår en fornemmelse af materialitet og forandres ud fra menneskelige skalaer. Der er en fysisk manifestation af justerings muligheder med knapper, som man kan dreje på med hånden mens man ser ud i lokalet og forhandler lyssætningen med de andre elever. Interfacen fungerer uden sensomotorisk forståelsesbarrierer og kan opøves til at fungere som en direkte kropslig handlingsforlængelse, hvor man ikke længere tænker over interfacen, men justerer på sin synsoplevelse.

Der er yderligere detaljer i opbygningen af interfacet mellem de daglige brugere af klasselokalerne, elever og lærere, og det tekniske system, som er helt essentielle for at opnå et fungerende adaptivt lys. Det drejer sig bl.a. om forsinkelsestider, styringskurver og koordinerede effekter, som giver en enklere og kvalitativt oplevelse for brugerne af at justere på tekniske parametre, samtidig med at understøttelse af energioptimering er indlejret i justeringernes dynamikker og niveauer.

Der skal trykkes en tid før knappen reagerer. Justeringen forandrer lyset i kurver og hastigheder, der er tilpasset lysperception og foregår på måder der passer til, at elever kan mærke hvad de justerer ved at opleve lysmiljøet i klasseværelset mens de indstiller det. Det er vigtigt, at der kan udvikles en brugerkultur, hvor lyset kan genkalde tidligere oplevelser af lysmiljøer, og hvor justeringerne af lysmiljøet ikke længere er en teknisk indstilling af lysintensitet og farvetemperatur, men et didaktisk redskab for at navigere undervisningens flow i dagligdagen.

En løsning er at kombinere scenarier med justering af parametre, hvor scenarierne er faste indstillinger, der kan få didaktisk vejledende kvalitet - at signalere didaktiske markører, hvor læreren kan skifte fokus og koncentration uden at skulle afbryde læringsflowet, og så igangsætte næste aktivitet, guidet af lysskift. Brugerne har adgang til alle de mulige indstillinger, og hele mulighedsrummet for design af lysmiljø, er kvalitativt justeret til at fungere, således at der kun er brugbare indstillinger. Inkluderet i lysmiljøets mulige indstillinger er således variationer af skumring, højlys eller tilpasninger til dagslys.

I den daglige undervisning er indstilling af kunstlyset blevet en etableret performance, med handlinger af lysjustering, som del af didaktiske valg, for at forhandle en social stemning, eller for at justere en dagslysfortolkning. Det er justeringer der afvejer funktionelle behov i forhold til, hvad der er socialt passende og æstetisk ønskeligt. Et kompleks af overvejelser indgår i vurderingen, med den vægt og de parametre, som brugernes lyskultur udvikler. Samtidig, og som en del af at etablere et brugerstyret lysmiljø, fungerer det som oplæring af brugere og interessenter om lysmiljø og energi, med udvikling af den kompetente borger, der velovervejet justerer bæredygtigt og velfungerende.

De tekniske installationer: LED armaturer, styringsinfrastruktur og brugerinterface

I klasselokaler er der et interface ved døren. I testrummene er interfacen formet af fysiske knapper, som giver brugerne direkte adgang til at stille alle parametre i LED armaturerne gennem fire parametre: lysintensitet og farvetemperatur for både uplight og downlight belysning.

Klasserummets lys styres af to sæt interface, opsat lige over hinanden:

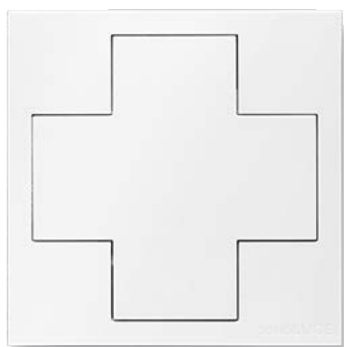


fig xxx. Kryds-tryk knap fra Lunatone/Glamox

Øverste sæt knapper har to kryds, der hver styrer henholdsvis uplight og downlight. De ni lamper i klasselokalet styres fælles. Kryds indstilles til at stille varm-kold i vandret plan og op/ned i lodret plan. Den øverste kryds-knap styrer uplight i alle armaturer og den nederste kryds-knap styrer downlight i alle armaturer. Hvert kryds giver adgang til at stille farvetemperatur (2700-6500K) og lysintensitet (0-100%).

I løbet af samskabelsesprocessen har brugerne udviklet et sæt af forindstillinger – fire scenarier som de gerne vil kunne vælge direkte. En kryds/tryk-knap etablerer valgmulighed for de fire scenarier, som derefter kan justeres i farvetemperatur og lysintensitet på de andre interfaces. Scenerne har fået navnene: Fælles, Chrome, Elevarbejde og Hygge (se detaljeret beskrivelse af scener side 62-64).



Tryk-dreje knap fra Lunatone/Glamox

Nederste sæt har 2 tryk/dreje-knapper. Den ene er til at tænde/slukke grundbelysning ved tryk, og skrue op/ned for intensiteten ved drej. Den starter ved 40% i både uplight og downlight, 4000K. Tavlerys styres helt



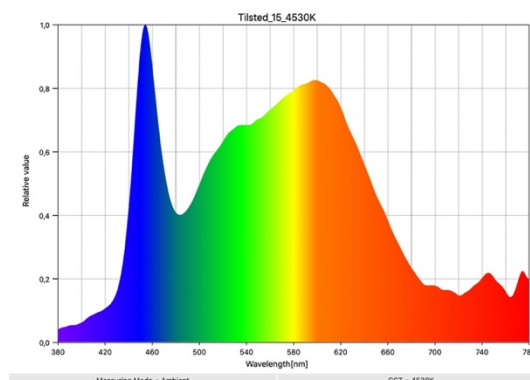
selvstændigt fra den anden tryk/dreje interface. som ligeledes starter ved 40% intensitet, og kan drejes op/ned i lysintensitet.

I referencelokalerne med lysstofrør er interfacen en enkelt afbryder, der kan tænde og slukke for lyset (0 eller 100%).

Lysscener i klasselokaler

Scene-oversigt klasserum – Adaptivt lys i folkeskolen – KHR					
Scener		Downlight %	Downlight Kelvin	Uplight %	Uplight Kelvin
Scene 0	Grundbelysning	40	4000	40	4000
Scene 1	Fælles	30	4500	70	4500
Scene 2	Chrome	0	6000	70	6000
Scene 3	Elevarbejde	50	4500	70	4500
Scene 4	Hygge	0	3500	70	3500

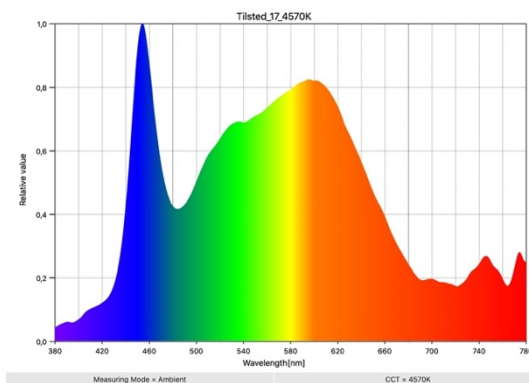
De fire scenarier, med forudindstillede intensiteter og farvetemperaturer, er udviklet og valgt gennem samarbejdsprocesserne.



Scene 0, Grundbelysning.

Grundbelysning indstillingen er med 4.000K farvetemperatur, 40% uplight og 40% downlight. Her opnås en jævn lysfordeling i lokalet med cirka 500 lux på bordflade, med farvetemperatur på cirka 4.500K.

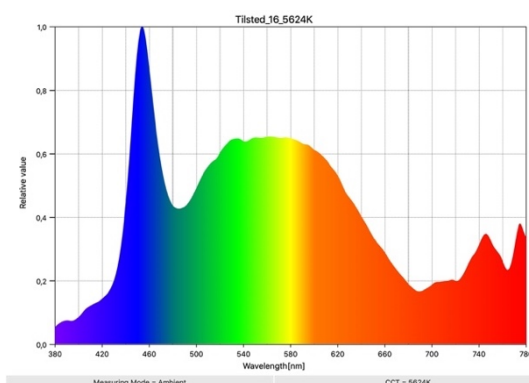
Scene 0 er den indstilling, som tænder hver gang man trykker på drejeknappen. Herfra kan man med drejeknappen skrue op og ned for intensiteten.



Scene 1, **Fælles**.

Fælles indstillingen er med 4500K og 70% uplight og 30% downlight. Denne indstilling leverer ca. 450-550 lux på bordene.

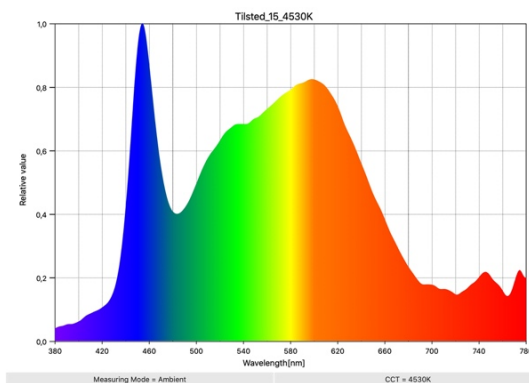
Scene 1 er den indstilling, der, som navnet antyder, fungerer til fælles diskussioner mellem alle og på tværs af lokalet. Her kan man se hinanden tydeligt og samarbejde om opgaver, hvis der etableres gruppearbejde rundt om bord-grupper.



Scene 2, **Chrome**.

Chrome indstillingen er med 6000K og 70% uplight og 0% downlight. Denne indstilling leverer ca. 270-320 lux på bordene.

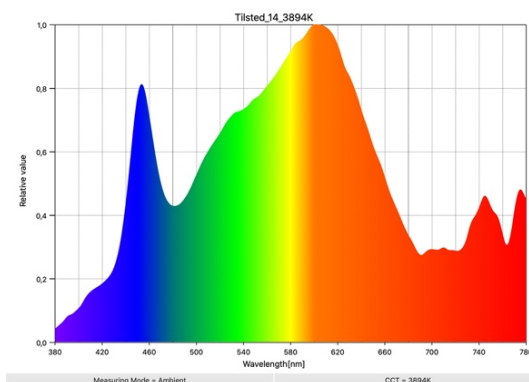
Scene 2 er indrettet til at give bedst mulige arbejdsbetingelser for individuelt arbejde med computer (chromebooks), hvor rummets lysmiljø og computerens Kelvin og intensitet er afstemt. Computere har typisk skærme med 5-8000K farvetemperatur. Alt downlight lys er slukket for at eliminere spejlinger i skærmene, og omgivelserne er oplyst for at mindske kontrasten mellem computerskærmen og rummets lysintensiteter.



Scene 3, **Elevarbejde.**

Elevarbejde indstillingen er med 4500K og 70% uplight og 50% downlight. Denne indstilling leverer ca. 550-650 lux på bordene.

Scene 3 definerer et lysmiljø, hvor der kan arbejdes med læsning, skrivning og andre opgaver, som kræver tydelige arbejdsforhold ved bordene. Denne indstilling har en balance mellem uplight og downlight, der sikrer klarere skygger og rumtegning, samt nuancer og retning i lyset, som sikrer klar oplevelse af rumlige former og orientering i rummet. Kontrast er hævet og bevægelse gennem rummet vil opleves direkte som nuanceret lysmiljø. Med denne indstilling etableres et lysmiljø, hvor der kan foregå alle forskellige, varierede og dynamiske, former for elevarbejde, samarbejde, udfoldelse, koncentration og fokus, som undervisningen indeholder.



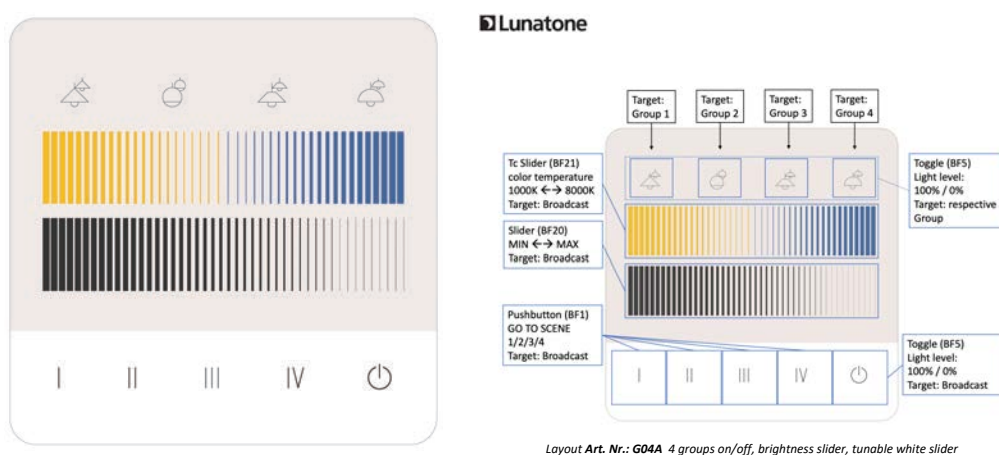
Scene 4, **Hygge.**

Hygge indstillingen er med 3500K og 70% uplight og 0% downlight. Denne indstilling leverer ca. 250-270 lux på bordene.

Scene 4 er den varmeste Kelvin eleverne kunne acceptere, og benyttes til at sætte lysmiljø for hygge og andre mere socialt definerede samværsformer. Denne indstilling leverer et lysniveau i spektret for Melanopic Light som er utilstrækkeligt som undervisningslys, men acceptabelt som en mulighed for perioder med mere afslappede forhold. Scene 1, 2 og 3 har sandsynligvis tilstrækkeligt med lys i spektret for Melanopic Light, delvis muliggjort ved armaturernes ekstra høje lysniveau i de blålige/lilla farver omkring 490nm (se side 52 for uddybende diskussion af Melanopic Light).

Touchpanel interface til adaptivt lys

Lunatone/Glamox har lanceret en Touch-panel løsning, som det er muligt at konfigurere på samme måde som sættet af fysiske interfaces. Det er således muligt at etablere en fuldt funktionelt interface til en adaptiv belysning med kun et panel for hvert lokale. Man vil med et Touchpanel muligvis miste noget af fornemmelsen af fysiske kontakt, som er så befordrende med de fysiske knapper, og dermed opnå en knapt så intuitiv relation til lysstyringen. Men Touchpanel interfaces vil være enkle at installere og servicere, og det vil være uproblematisk at skalere installation af adaptivt kunstlys til alle lokaler på en skole.



DALI-2 Touchpanel fra Lunatone/Glamox med eksempel på en konfiguration, der kunne tilfredsstille projektets interface behov.

Styring og sensor

LED lyset styres gennem DALI, hvor hvert armatur har to selvstændige adresser, en for uplight og en for downlight. Lysinstallationen i et klasselokale fungerer som en gruppe med samme styresignal til samtlige ni armaturer. Uplight'et i armaturerne er begrænset i Tilsted Skole, som har skrånende lofter, for at kompensere for den korte afstand mellem lampe og loft, således at loftet synes jævnt belyst.

Der er installeret rumsensor som registrerer bevægelse, med en reaktionstid på 60 minutter, således at der aldrig opstår problemer med at lyset går ud mens man er i lokalet, men samtidig har systemet en sikring af at lyset slukkes, når skoledagen er forbi, selv hvis elever og lærere skulle glemme at slukke efter sig. Alle armaturer i klasserum indgår i slukning ved PIR uden bevægelsesmåling i 60 min.

Adaptivt kunstlys som pædagogisk værktøj og didaktisk markør

De fire lysscenarier understøtter fire grundlæggende undervisningssituationer.

- "chrome" benyttes når man arbejder på computer
- "elevarbejde" benyttes når man læser eller skriver ved bordene
- "fælles" benyttes når klassen skal kommunikere indbyrdes og kunne se hinandens ansigter godt
- "hygge" benyttes til hyggestunder

De fire faste lysscenarier kan, som forklaret tidligere, justeres i lysfarver og intensitet, både i uplight og downlight, men hvert lysscenarie genstarter altid med en fast setting. Derudover er opretholdt en enkel adgang til grundbelysning, som benyttes til at give almenlys, og ofte benyttes før en specifik indstilling vælges.

Klasselæreren på Tilsted Skole fortæller, hvordan de anvender de fire lysscenarier som markør for den aktuelle undervisningssituation. At hun anvender et skifte i lysscenariet som introduktion til, hvad der skal ske. Når hun eksempelvis sætter "chrome"-scenariet på, forventer eleverne, at de skal arbejde på chromebook og finder computerne frem. Lysscenarierne er således, på ret overraskende vis, blevet et pædagogisk understøttende værktøj og en markør for den didaktiske situation.

På Hanstholm skole, har man valgt et mere åbent flow i styringen og har ikke umiddelbart ønsket faste scenarier i relation til undervisningens metodevalg. Også her har lærerne fundet frem til at bruge lyset til at fokusere opmærksomheden i klassen. Man anvender således lyset som en indikator for et skifte i den didaktiske metode, hvor der med lysskiftet forventes et skifte i adfærd og koncentration i klassen.

På begge skoler fortæller lærerne om, hvordan de begyndte at anvende lyset som et pædagogisk redskab. Det blev nemlig hurtigt klart for lærerne, at en forandring i lyset etablerer en ny rumlig iscenesættelse, hvilket afstedkommer et opmærksomhedsskifte, som man kan benytte konstruktivt. F.eks. fortæller en lærer, hvordan hun, når der bliver for megen uro i klassen, tidligere har brugt at sende børnene ud på en hurtig løbetur, så de "får rystet uroen ud af kroppen". Men med det nye lysdesign kan hun, ved at ændre på lyset, etablere et lignende opmærksomhedsskifte. Det gør, at hun kan holde børnenes opmærksomhed rettet mod et fokus over længere tid, og skifte fokus, uden koncentrationen brydes.

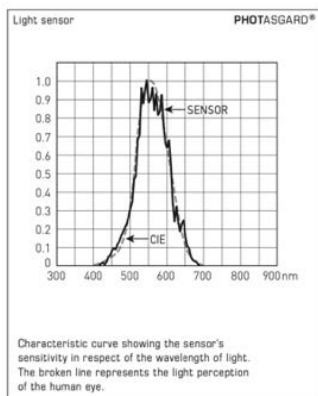
Det, at man forholder sig til lyssituationen, etablerer en bevidsthed om lyset og en omtanke i forhold til, hvordan man bruger det. Nu går man ikke længere bare ind i klassen og "banker lys på med kontakten". Man sætter lys i forhold til den undervisningssituation, man skal i gang med, og planlægger dagen ud fra hvilke lysmiljøer, der skal bruges.

Man orienterer sig helt instinktivt på dagslyssituationen i rummet og sætter lyset i et forhold til det naturlige lys. Ofte kan elever vælge slet ikke at ville have kunstlyset tændt, og endda bede om at få det slukket,

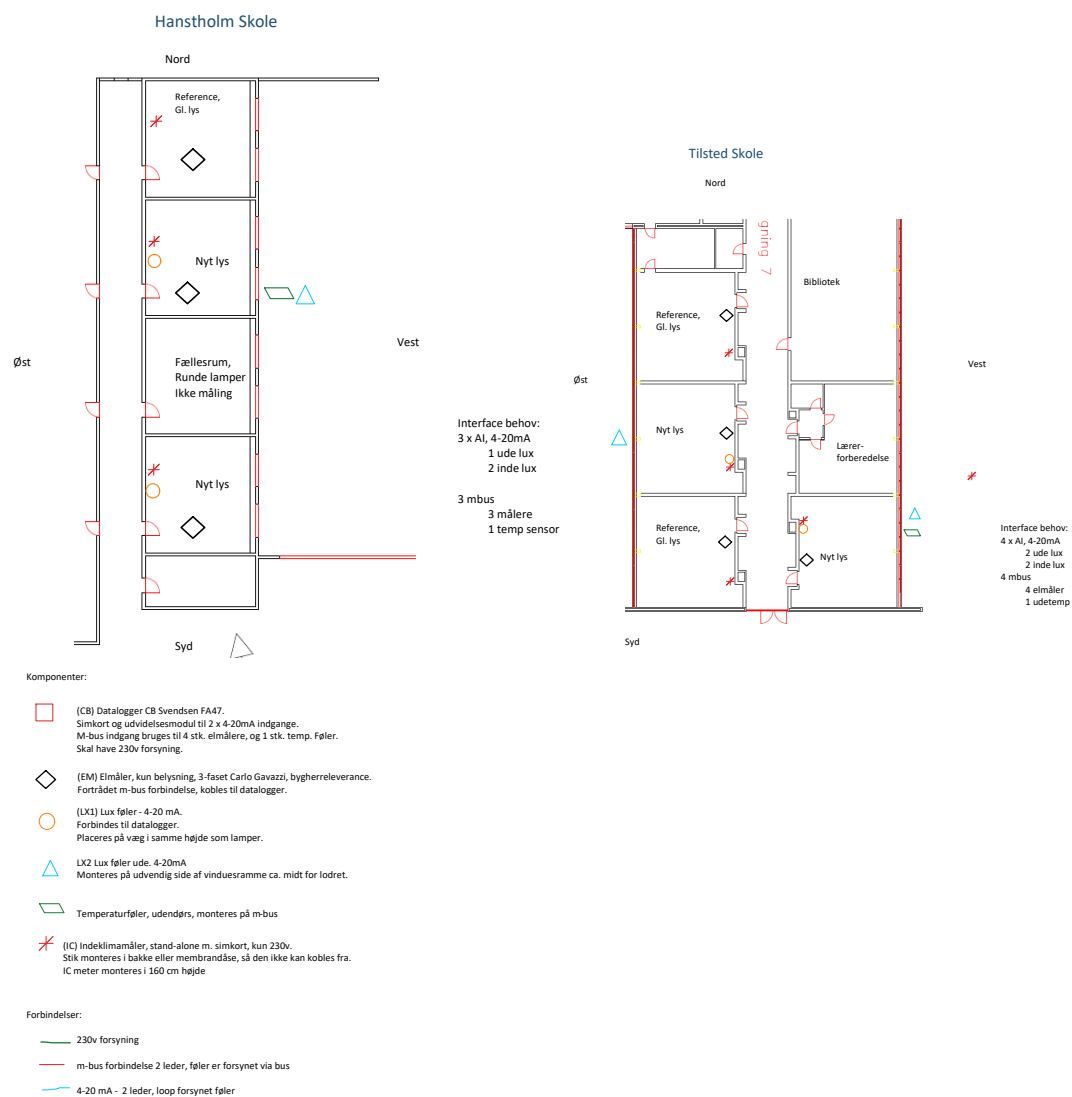
Generel dataindsamling i testlokaler og omgivelser

Alle klasselokaler har tre typer målere installeret, som indsamler data om lydniveauer, indeklimatekvaliteter og energiforbrug, både i de lokaler med nye LED installationer, og i de klasselokaler, der benyttes som reference og fremstår uforandret.

Energimålere indsamler data på elforbrug hver time. Lysintensitet måles indendørs og udendørs med dataindsamling hvert 5. minut. Alle data opsamles, bearbejdes og gøres tilgængelige af Neogrid Technologies som grafiske visninger.

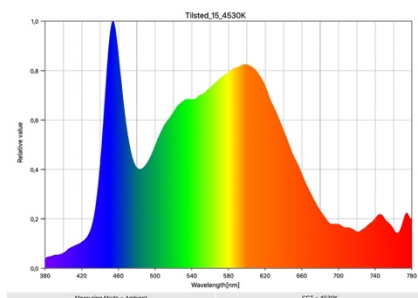


Lysmålere (S+S Regeltechnik-Photosgard AHKF) måler inde såvel som ude, med et spektralfordeling justeret til den visuelle perception hos mennesker. Indeklima målere fra IC-Meter indsamler data om lysintensitet, støjniveau, temperatur, fugtighed og CO2 niveau. <https://www.ic-meter.com/dk/hvad-er-ic-meter/>.



Opsætning af målere på Hanstholm og Tilsted Skoler, 26 juni 2019, optegnet af Thisted Kommunes energitekniker.

Specifik dataindsamling i testlokaler og omgivelser



C800 data visning. Alle lysmålinger og farvespekter målinger er foretaget med et Sokonic 800C Spectromaster spektrometer <https://www.sekonic.com/color-meters/c-800>, hvor der gives grafiske visninger af farvegengivelse (CIE med RA værdier i søjler og TM-30-18), farvetemperatur (Kelvin), lysintensiteter (Lux) samt et spektrogram.

Måleapparatet og målesystemerne er alle normeret til at kunne kvalificere lys som det opleves i den menneskelige perception. Test af lysmiljøer og elforbrug foregik over 18 måneder. Fra efteråret 2019 til foråret 2021. Der er dog flere perioder med usædvanlige brugsmønstre grundet Covid19 restriktioner i folkeskolens drift og dagligdag.

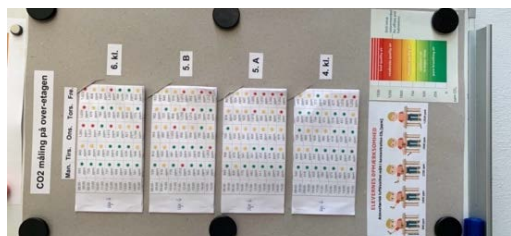
Samskabelse og Citizen Scientists in the Classroom

Til at understøtte elevernes arbejde som 'Citizen Scientists in the Classroom', og lærere og pedellers arbejde med at kunne diskutere lys og energioptimering, har projektet givet adgang til data og deltaget i diskussioner på tværs af interesser.

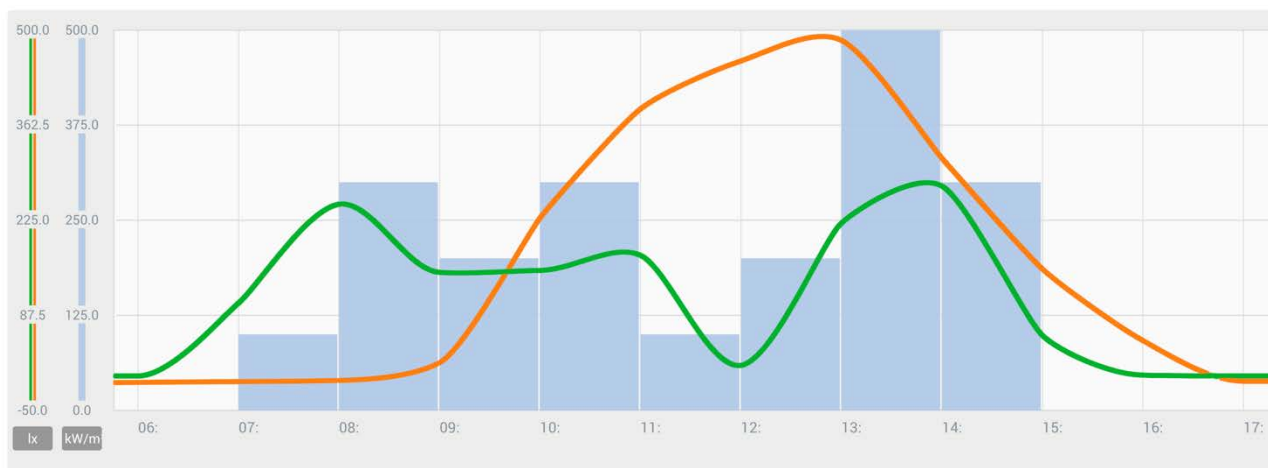
Elever og lærere har arbejdet med luxmålere, observationsobjekter, datavisninger, fotografiske registreringer, tegning og direkte observation, samt indgået i praktiske workshops med diskussioner, fremlæggelser, opgaver og øvelser.



TROTEC BF06 Luxmeter



Teknisk Service medarbejder, Tilsted Skole. Info materiale på den fælles opslagstavle med data udskrifter om CO2 niveauer. Datavisualiseringer og oversigter på lysforbrug, energiforbrug og luftkvalitet, som han deler med lærerne, og hvor de løbende diskuterer indeklimaforhold i undervisningen. Visning af data opsamlet over tid og på tværs af lokaler har muliggjort opbygning af fælles erfaringer og fælles brugerkultur baseret på data fra egne erfaringer med lokalerne i den forløbne uge.



Neogrid data visning, her valgt for en dag i et bestemt lokale, med visning af energiforbrug (lyseblå søjler) og lysintensiteter inde (grøn linje) og udenfor (orange linje).

Data og energioptimering

Som en del af laboratorieopsætningen i klasserne er der opsat sensorer, som løbende måler på indeklima (CO₂, lyd, varme, fugt), lyssensorer inde og ude, og energimålere på hvert lokale.

Som det ses i eksemplet fra 24. november 2020 (figur 4), er det tydeligt, at kunstlyset i dette lokale justeres ofte i løbet af dagen (kan ses af energiforbrugets variation). Lyset tilpasses oftest for at opnå et bestemt lysmiljø, snarere end for at opretholde et jævnt belysningsniveau (kan ses af lysniveauets variation i klasselokalet). Dette klasselokale har en ny LED-skærm med minimalt energiforbrug. Det tilsvarende referenceklasselokale med simpel tænd/sluk kontakt og lysstofrør har ens energiforbrug alle timer, hvor lyset er på og et tydeligt ekstra forbrug, når Smartboard er tændt. Energiforbruget er næsten det samme i de to klasselokaler, men kvaliteten af lysmiljøet og understøttelsen af undervisningen er væsentligt forbedret med nye lyskvaliteter og øget brugerbevidsthed om lysmiljøets muligheder i dagligdagen.

KAPITEL 4

ENERGIOPTIMERING MED ADAPTIVT LYS

Hypotesen i dette projekt indeholder ideen om, at energibesparelses-bestræbelser bør fokusere på bedre tilpasset forbrug af el og lysmiljøkvaliteterne elforbruget bidrager til, som supplement til mere generel energioptimering.

Dette projekts viser, at der kan opnås energibesparelser ved at tænke brugerne som driftere (teknologiske) i dagligdagen, og at der udvikles en (udvidet forståelse af belysningskultur) kultur i forbindelse med lys med prioritering af lyskvaliteters betydning for sociale situationer og velvære i læringsmiljøet.

Folkeskolen

Folkeskolen har været en meget interessant kontekst for projektet og blev i sin tid valgt, fordi der her er en tydelig prioritering af at ville opnå optimale vilkår for undervisning og sociale aktiviteter for skolebørnene. Således har der i processen løbende udfoldet sig en afklaret response fra brugerne (skoleledere, lærere, elever og teknisk service), som giver grundlag for vurdering af 'adaptivitet' indenfor en udfordrende men afklaret ramme, med fokus på mennesker, deres aktiviteter, deres helse og deres oplevelser.

Elbesparelser med brugerkultur snarere end bygningsstyring

Projektet er gennemført som en samtidig design- og forskningsproces, hvor der således er designet løsninger parallelt med, at brugerne har været involveret igennem mange gentagne re-design processer. De to skoler i Tilsted og Hastholm har på denne måde fungeret som Living-Lab, hvor brugerstyret adaptivt lys er udviklet sammen med brugerne, således at deres brugerkultur har kunnet udvikles samtidig med at lysstyringen udvikles.

Det adaptive system – koordinering af dynamiske systemer

Projektets mange aktiviteter har haft fokus rettet på adaptivitet. Det vil sige tilpasningsevne i forholdet mellem; det omgivende lysmiljø, kunstlys-teknologien, brugerstyring og undervisningen.



Det adaptive lys baseres på en dynamisk relation mellem

- (A) dagslyset, det omgivende lys og vejret, samt konteksten i lokalet med lysrefleksioner, computerskærme m.m.
- (B) kunstlyset med armaturer og infrastruktur, samt interface til brugere og adgang for driftspersonale
- (C) brugernes indstilling og oplevelse af lysmiljøet, samt den udviklede brugerkultur omkring indstilling af kunstlys
- (D) undervisningens praksis med dens flow, situationer og begivenheder med læring og sociale aktiviteter

Adaptivt lys består af designede relationer mellem disse dynamiske systemer. Hypotesen er at en optimering af elforbrug med adaptivt lys opstår gennem en organisering af gensidig tilpasning mellem de fire del-elementer.

Elbesparelser ved dynamisk brugerstyret tilpasning af kunstlyset

Forbruget af el til belysning er væsentligt mere varieret med det adaptive lys. Der er tydeligt merforbrug af kunstlys i vintermånederne sammenlignet med en standard-lysinstallation, der overholder lovens minimumskrav. Der er samtidig betydeligt mindre forbrug af kunstlys i forår-sommer-efterårs-månederne.

Elever og lærere benytter gerne højere lysniveauer end minimumsstandarden, for at kunne se og have de lysmiljøer, der er behov for i undervisningen. Muligheden for højere lysstyrker end de foreskrevne minimumskrav bliver udnyttet, med lysniveauer i lokalerne svingende op til omkring 800-1000 lux i bestemte undervisningssituationer. Men samtidig er der benyttelse af lavere lysniveauer og perioder helt uden at kunstlyset er tændt. For eksempel etableres der skumringslys, afgrænsede lysrum i rummet, perioder med lavere lysintensitet ved brug af computere, og kunstlys som supplement til dagslyset i rummet.

Det adaptive lys er blevet en del af de didaktiske værktøjer i dagligdagen. Der justeres på lyskvaliteter og forandringer af lysmiljøet. Forandringer i lysmiljøet er blevet tegn til forandret fokus i timerne, hvor den daglige klasseledelse benytter lysskiftenes signalværdi til at dirigere undervisningen. De fire forprogrammerede scenarier iscenesætter kulturer. Der forandres ikke længere kun funktioner, men der navigeres et helt kompleks af forventninger og opbyggede sociale aftaler, hver gang der justeres i lysmiljøet.

Det adaptive lys er blevet en del af den daglige drift, hvor brugerne slukker lyset, når de forlader lokalet. Skolerne foretrækker, at det at slukke (og tænde) kunstlyset, skal indlæres som en bevidst og begrundet vane, snarere end at overlade det til et automatisk tænd/sluk system. Det automatiske system slukker efter 60min for at sikre at det ikke pludselig slukker og forstyrrer koncentrationen i undervisningen.

I referencelokalerne med lysstofrør kan kunstlyset kun tændes eller slukkes. Det er blevet en praktisk vane, at lyset tændes når man går ind i lokalet og slukkes når man går ud. Det nye adaptive LED lys introducerer et langt mere varieret forbrugsmønster, hvor indstillingsmuligheder af kunstlyset åbner for, at lysmiljøet i klasselokalet mere varieret kan tilpasses undervisningssituationen og dagslysforholdene.

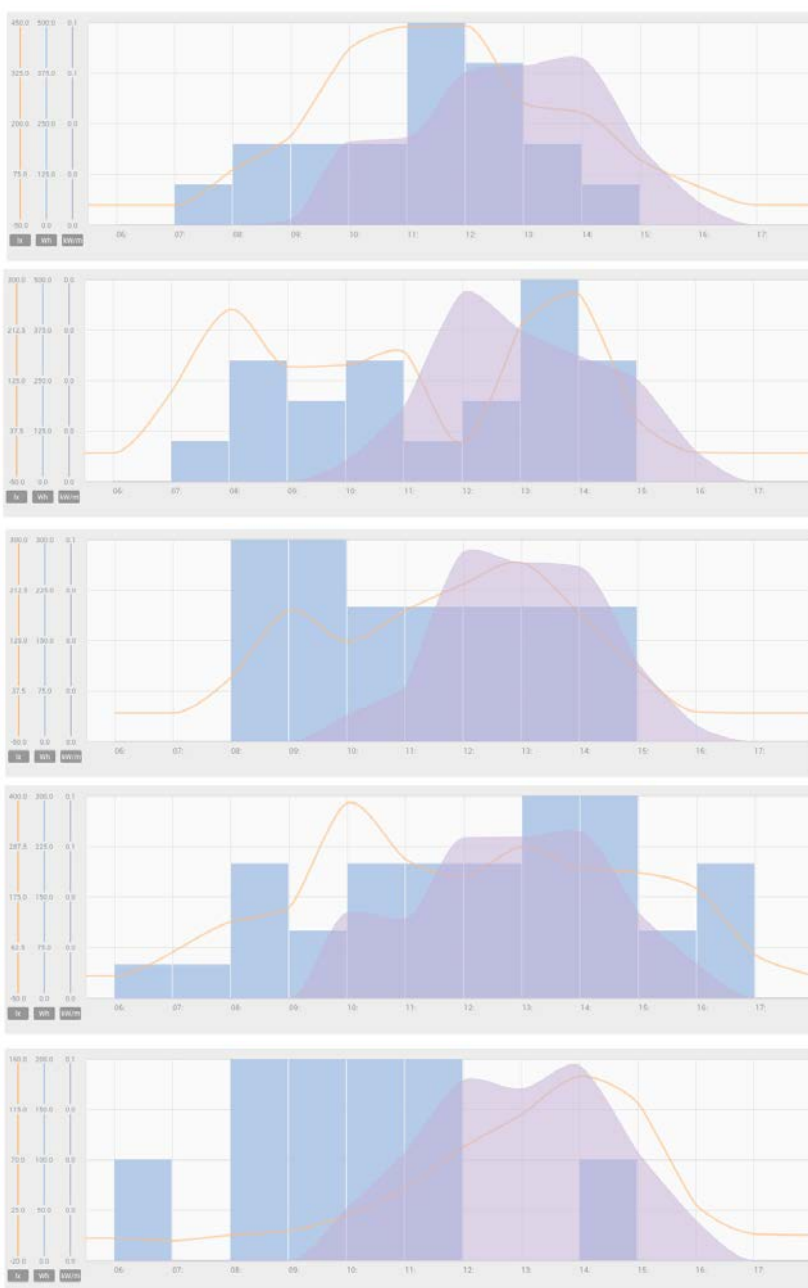
Elbesparelser ved øget variation i forbrugsmønstret

Brugsmønstret for det adaptive LED lys har således langt større variation end lyssystemer med mere begrænset brugerkontrol. Graferne fra Neogrid viser variation hen over året, med mere kunstlysforbrug i mørke tider og mindre i lyse tider. De viser variation hen over dagen i en tilpasning til dagslys og de

didaktiske metoder. Data viser variation i timerne, hvor der med normale brugsmønstre foretages indstilling af kunstlyset 2-9 gange i hver time, varierende fra 2-3 ved undervisning med mere stabile aktiviteter, til 5-9 gange i undervisning med mere skiftende aktiviteter. De største variationer fremkommer af variationer i sociale og pædagogiske forhold, som i øvrigt varierer meget alt efter den specifikke lærer og elevgruppe.

Adaptivt lys udvikler på sammenhænge mellem lysmiljø og undervisningsmiljø. Det udvikler på kvaliteter ved lysmiljøet, der har betydning for læring og trivsel. Med den store fleksibilitet i lysmiljøet og direkte brugerstyring kan de relevante lysmiljøer opnås på rette sted til rette tid.

Grafer fra Neogrid med datavisning



Elforbrug til kunstlys med adaptivt lys

Graferne er fra Neogrids visning af data fra fem dage i en uge i sent efteråret 2020 fra et testlokale på Tilsted Skole med nyt adaptivt LED lys. Den tynde graf viser lysintensiteten inde i klasselokalet, og den fyldte graf dagslysintensiteten udenfor. Søjlerne viser det samlede elforbrug i lokalet. Graferne viser variation i forbrugsmønstre ved de nye lysanlæg.

Der er i den viste uge, som det oftest er i alle uger, valgt en meget varieret lysintensitet af brugerne. Man kan se på anden-dagen (tirsdag), at der er benyttet kunstlys om formiddagen for at etablere arbejdslys i lokalet, og at der næsten ingen dagslys er til at bidrage til lysmiljøet. I løbet af de første timer er der justeret til flere lysintensiteter. Midt på dagen er der trukket for dagslyset og benyttet lav intensitet i kunstlyset og med samtidig brug af LED Smartboard. Midt på eftermiddagen er intensiteten i kunstlyset sat ekstra højt, samtidig med højt dagslys, for i en periode at have ekstra høj lysintensitet.

Man kan se af denne uges grafer at energiforbruget varierer meget, og varierer meget forskelligt hver dag, inklusive perioder helt uden kunstlyset tændt og andre perioder med ekstra højt niveau i kunstlyset. Den relativt svage sammenhæng mellem dagslysintensiteten udenfor og lyset indenfor skyldes det mangelfulde dagslysgesign og det ofte begrænsede influx af dagslys.

ENERGIBESPARELSER VED JUSTERING AF KUNSTLYSET

De forprogrammerede scenarier viser en fortolkning af dagligdagen i undervisningen, hvor valg af farvetemperatur og lysfordeling er et markant indblik i brugernes valg af lysmiljøer. Lysscenerne er komponeret ud fra et års undersøgelser og erfaring blandt primær-brugerne (elever og lærere), og fungerer som udgangspunkt for typiske situationer i undervisningen. Der justeres oftest yderligere i den konkrete situation efter at scenariet er valgt – i fordeling af uplight/downlight, farvetemperaturer og lysintensiteter. Scenerne fungerer som didaktiske markører i sammenhæng med undervisningskulturen, og er således vigtige som redskaber i klasseledelsen. De daglige justeringer er en tilpasning til brugerønsker, stemningskvaliteter og dagslysforhold. Al denne tilpasning foregår ofte og i hver klassesstime, som en integreret del af den daglige brugspraksis.

Elbesparelser ved valg af 4000-5500 Kelvin farvetemperatur i normalbelysning

Ved at stille muligheden op for slutbrugerne (elever og lærere) for selv at bestemme farvetemperatur, og indstilling for uplight og downlight, er der fremkommet tydelige brugervalg: der vælges stort set aldrig farvetemperaturer under 4000K, oftest mellem 4000K og 5500K, og der vælges typisk samme farvetemperatur i uplight og downlight. Ved at producere LED armaturer med 4000-5500K i fast farvekvalitet, og med dagslys lignende farvespekter fordeling, vil man kunne opnå betydelige besparelser i elforbrug, da driver og LED lysgiver kan optimeres betragteligt. Væsentligt er her at den 'koldere' farvetemperatur stiller mindre krav til intensiteten af de røde farver (varmere farver), som er de absolut mest energikrævende at generere.

Elbesparelse ved øget dagslyskvalitet i kunstlyset og integrering med dagslys

Ved at installere LED lysgivere, som har spektralt indhold og fordeling sammenligneligt med dagslys, vil kunstlyset fungere i et bedre samspil med dagslyset i rummene. Ved rette lysspekter kan LED lyset indgå i en større sammenhæng med dagslyset i lokalerne, og derved fungere som supplerende lys til dagslyset snarere end belysning af lokalet som hovedlyskilde.

Photopic Light farvefordeling i kunstlyset

Perception gennem synssansen giver bidrag til mange sansemodaliteter, bl.a. sansningen af lysintensitet, farvegengivelse, formgengivelse, rumoplevelse, navigering i omgivelserne, mellem menneskelige relationer og oplevelse af at bevæge sig i rum, samt oplevelse af stemning, steder og atmosfærer.

Synssansen fungerer under meget forskellige lysintensiteter og kan tilpasse sig alle variationer af lysmiljøer, vi kender fra dagslyset. Derimod har synssansen sværere ved at fungere i lysmiljøer med ujævne eller manglende spektre. Et mere dagslysfordelt farvespekter i kunstlyset vil derfor give mulighed for perioder med lysmiljøer med lavere lysintensitet, men med passende synlighed, som ikke er mulig med lysgivere, der afviger væsentligt fra dagslyset spektralkomposition.

Problemet kendes fra billige sparepærer og lysstofrør, som kun lyser med smalle spektralbånd i nogle få farver, og hvor store dele af farverne næsten ikke er repræsenteret. De første generationer af LED har

lignende problemer med et selektivt farvespekter. Led med varmt lys (2700-3500K) har ofte utilstrækkeligt intensitet i det grøn-blå-lilla farvespekter, hvilket giver problemer med at genkende farver og former i de koldere spektre, samtidig med at de gul-røde farver blænder.

Melanopic Light farvefordeling i kunstlyset

Melanopic Light spekteret påvirker menneskers vågen/sove tilstand. Klasselokalerne med undervisning skal generelt have et lysmiljø, der befordrer vågen tilstand og dermed understøtter læringsaktiviteterne. Kunstlys med farvetemperaturer, der er varmere (under 4000K) vil ikke give tilstrækkeligt Melanopic Light. Kun ved koldere lys (over 4000K) – eller særligt forbedret lys, der forøger indholdet af Melanopic Light – vil lysgiveren befordre vågentilstand.

Ved lysgivere med for lidt Melanopic Light vil der være tendens til at forøge lysstyrken for at få oplevelsen af tilstrækkeligt lys, som fører til merforbrug ved for varme lyskilder. Samtidig er det særligt relevant af have tilstrækkeligt Melanopic Light i undervisningsmiljøer, hvor vågentilstandens befordring af opmærksomhed og læringsevne er essentielle kvaliteter.

Elbesparelser ved tilpasset lysfordeling mellem indirekte og direkte belysning

De selvstændige indstillinger af uplight og downlight er også med til at forme fordelingen mellem diffust og rettet lys, direkte lys og kontekst lys i lysmiljøet. Med indstillinger som de brugerdesignede scenarier, kan det ses at der foretrækkes en overvægt af uplight, og ofte helt uden downlight (70/30 eller 70/0). Det generelle lys med 50/50 i fordelingen benyttes når man skal overskue rummet og bevæge sig rundt, men ved de forskellige former for koncentration og fokus i undervisningen foretrækkes hovedsagelig diffust lys med et mindre supplement af rettet lys. Man kan opnå betydelige besparelser i elforbrug ved at kunstlyset kan tilpasses i balancen mellem indirekte og direkte belysning, da lysmiljøet derved væsentligt bedre kan tilpasses brugsbehov og dagslysforhold.

Lys handler ikke om at bekæmpe mørket, eller om at etablere et kompromis mellem alle krav, men at forme lysmiljøer, der tilpasses de behov og ønsker, der er på hvert sted til hver tid. Lysmiljøets funktion følger situation og aktivitet, og det medfører behov for stor variation af lysmiljøer for fleksibelt at kunne følge undervisningens flow. Variationerne kan sammenlagt give mindre elforbrug til lys, opnået ud fra et meget mere varieret forbrug, præcist tilpasset behovet i hver situation. De visuelle forhold understøtter en række aktiviteter, som stiller et mere kompleks krav til hvad synlighed er, som inkluderer rumlighed, retning/orientering, sted, situation og sociale relationer.

ENERGIBESPARELSER VED INTEGRERING MED DAGSLYSET

Lysmiljøet i lokalerne er resultatet af en kombination af dagslys og kunstlys. Da hovedparten af undervisningen foregår indenfor dagtimerne med dagslys, har dagslysforholdene i lokalerne afgørende indflydelse på forbruget af kunstlys.



Elbesparelse ved mere fleksibel solafskærmning

Begge skoler er bygget med udhæng over vinduerne, der er tænkt som horisontal solafskærmning. Men, på vores breddegrader og med skolerne orientering med vinduer mod øst og vest, er der næsten aldrig solhøjde nok til at den direkte sol kan afskærmes med den horisontale solafskærmning. Skal solafskærmningen følge solens orientering og højde, altså skærme for direkte solinfald i skoletiden, skal afskærmningen nok snarere være vertikal, og kan passende etableres som en del af designet af de enkelte vinduesrammer. De horisontale solafskærmninger mindsker derimod influx af himmellys på alle tider af døgnet.

Dagslysproblemerne i klasselokalerne er en kombination af, at der kommer for lidt himmellys og for meget direkte sollys ind ad vinduerne, hvilket medfører for lave lysniveauer og for høj kontrast. Desuden er dagslyset så dynamisk varierende, at der ofte er variationer i dagslysmiljøet indenfor minutter, med skift i lysintensitet, lysfarve og sammensætningen af rettet/diffust lys. Klasselokalerne har ofte et dagslysindfald, der er for svagt, med perioder af direkte sol og med meget ujævnt fordelte dagslysniveauer i lokalerne. Selv på dage med højt dagslys niveau udenfor, er den målte dagslys influx oftest under 10% og ofte helt nede på 1-2%. En afgørende energibesparelse på kunstlyset vil kunne opnås ved at forbedre dagslysindtaget i

klasserummene. Klasserum med velfordelt dagslys fra to sider behøver kun supplerende kunstlys, med mindre intensiteter, i under 20% af brugstiden.

Skolerne vælger typisk at afskærme dagslyset med mørklægningsgardiner og tænde kunstlyset. En mere passende designet influx af dagslys vil kunne bidrage væsentligt mere til lysmiljøet, og derved væsentligt mindske behovet for kunstlys i dagtimerne. En mere fleksibel solafskærmning, med mulighed for en kombination af diffuserende, reflekterende og mørklæggende gardiner, der kan justeres til at dække dele af vinduesflader, vil kunne tilpasses det enkelte lokales behov. I testlokalerne udvikledes enkle solafskærmninger, således at hovedparten af dagslyset har uhindret influx det meste af tiden.

Elbesparelse ved re-design og re-allokering af Smartboards

Nydesign af solafskærmninger kan kun lade sig gøre, ved at der samtidig er blevet udskiftet Smartboard fra projektor løsninger til LED-skærme, som bedre kan fungere under dagslysforhold. Smartboards er blevet flyttet til mere optimale positioner i rummene, både steder hvor de ikke generes af dagslys, og samtidig placeret således, at elever og lærere kan se hinanden optimalt.

Elbesparelse ved varieret brug af rummet

Nydesign af solafskærmninger, smartboards og det adaptive kunstlys har tilsammen gjort det mere fleksibelt hvordan klasselokalet bruges. Der forandres oftere indretning i lokalerne. Man flytter borde, skifter synretninger og varierer hvordan man samler grupper eller har fokus. Således giver et mere fleksibelt lysmiljø en mere fleksibel benyttelse af lokalerne, og danner forudsætningerne for at kunne optimere energiforbruget med en mere fleksibel brugspraksis.

ENERGIOPTIMERING MED TEKNISK INNOVATION

Påvirkning af energiforbruget af lyskildernes lyskvalitet

Krav til LED lyskildernes energieffektivitet (lumen/watt) er et af redskaberne, der benyttes til at optimere elforbruget til belysning. Minimumskravene var i august 2020 på 105 lumen/watt, og fra februar 2021 på 130 lumen/watt. Minimering af energiforbruget i forhold til lysintensitet sætter krav, som kan være i konflikt med ønsker om lyskvalitet, specielt med ønsker om en bedre spektralfordeling og bedre farvegengivelse. Målt som RA (farvegengivelse) er der i 2019 et 5-8% større energiforbrug ved en RA over 90 end ved en over 80. LED med et fuldt dagslys spekter vil typisk kunne levere en RA på 97+, men med en et energiforbrug der i 2019 er 7-10% større end en RA 80, omkring 105 lumen/watt. Det forudses (energy.gov) at om kun 5-6 år (2025) vil bredspektrede LED lysgivere blive mere energieffektive end dem med begrænset spekter. Det vil derfor kunne betale sig energimæssigt at udskifte LED lysgivere hvert 5-10 år, og samtidig opnå betydelige forbedringer i lysspektret, farvegengivelsen og dermed i lyskvaliteten.

Med data fra energy.gov, hvor de potentielle udviklinger i energioptimering for LED fremskrives, vil der ske en radikal forbedring af lumen/watt allerede indenfor nogle få år (se figur nedenfor). Man kan se af tallene, at der forventes en 45% forøgelse af energieffektiviteten i LED i perioden fra 2019 til 2025. LED lysgivere i projektet er fra ca. 2019, og en renovering af LED lysgiverne i 2025 vil således kunne føre til 30% energibesparelse på kunstlys, samtidig med en væsentlig forøgelse af lyskvaliteten. Hvis man tager fremskrivningen til 2035, vil der være 70% forøgelse af energieffektiviteten i LED i perioden fra 2019 til 2035, og således kunne føre til 45% energibesparelse på kunstlys fra 2019 til 2035 genereret af den teknologiske udvikling af LED lysgivere, og der vil være mindre forskel mellem energiforbrug i forhold til lyskvalitet. Teknisk udvikling i alle dele af systemerne for armaturer og kunstlys styring (bl.a. drivere) vil yderligere effektivisere energiforbruget til kunstlys.

Table 3.4 Phosphor-converted (PC) and color-mixed (CM) LED package historical and targeted efficacy levels.

Metric	Type	2019	2022	2025	2035	2050
LED Package Efficacy (lm/W)	PC Cool White	184	232	241	249	250
	PC Warm White	168	223	237	249	250
	Color Mixed	114	158	196	288	325

Forventet udvikling i energieffektivitet for LED lysgivere, beregnet i 2019.

<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/01/f70/ssl-rd-opportunities2-jan2020.pdf>

US Department of Energi, <https://www.energy.gov>

Sammenhænge mellem energiforbruget og pris på LED lysgivere

Prisen på at vælge LED lysgivere af højere kvalitet diskuteres en del hos installatører og bygningsafdelinger, altså om det er økonomisk forsvarligt at forlange RA 95+ med velfordelt lysspekter snarere end RA 80 med ujævnt og begrænset lysspekter. Set i forhold til prisen på et leveret LED armatur, så er pris-andelen for LED lysgiveren 3-9% (2019) alt efter armaturtype. Prisforskellen er ca. 30% mellem den billigste og den dyreste LED lysgiver. Forskellen i prisandel for LED af slutprisen, alt efter valg af lyskvalitet, er ca. 1-3%. Valg af lyskvalitet har altså i 2019 og fremover meget begrænset betydning for den samlede pris på et armatur.

Et estimat af prisudviklingen for LED lysgivere vil yderligere sænke LED lysgiverens andel af armaturprisen til 3-5% i 2035. Der synes således at være gode muligheder for at opnå betydelige energibesparelser og kvalitetsforøgelser, uden at det påvirker prisen på et leveret LED armatur væsentligt, idenfor de nærmeste år.

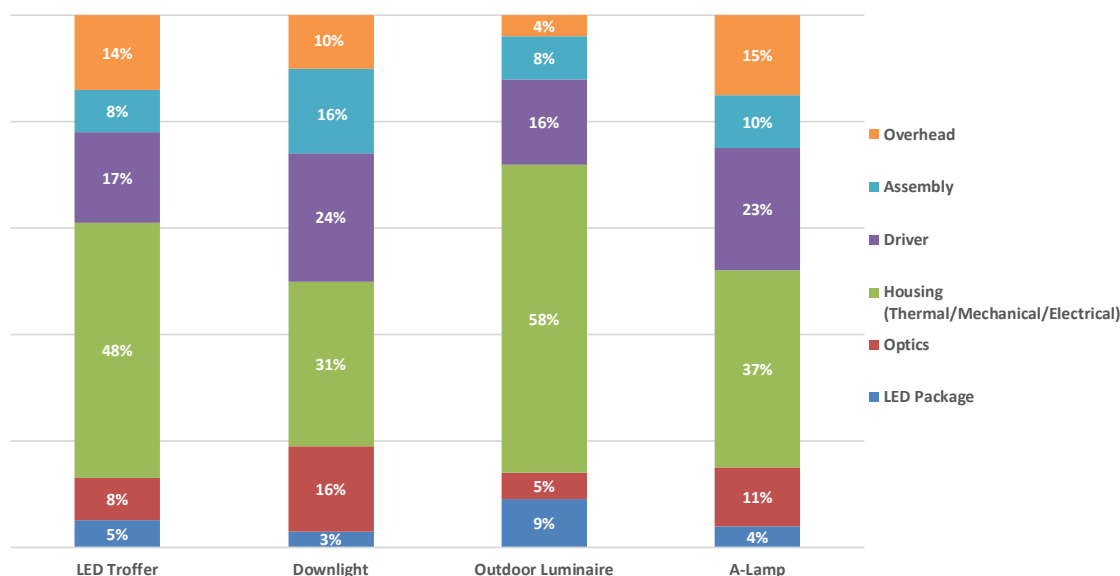


Figure 3.9 Comparison of cost breakdown for different lighting applications in 2019. The categories of LED lighting

Opdelte udgifter ved produktion af LED armaturer, beregnet i 2019.

<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/01/f70/ssl-rd-opportunities2-jan2020.pdf>

US Department of Energi, <https://www.energy.gov>

Påvirkning af energiforbruget af produktets levetid

Hvad er energioptimeringspotentialet i de enkelte dele af et armatur? Hvad betyder produktets levetid for energioptimering af armaturet? Med nye bæredygtighedskrav, som inkluderer helheds perspektiver og affødte effekter, forandres hvordan der vælges løsninger og hvilke argumenter, der er mest betydnende.

Med den forventede teknologiske udvikling bliver det vigtigere at kunne opdatere armaturer med nyere teknologi jævnlgt (5-10år), end at de enkelte produkter har en længere levetid. Produktkvaliteten, lyskvaliteten og energieffektiviteten forbedres i et tempo, som berettiger at installationer skal kunne opgraderes løbende.

Set over perioden 2019-2025 (6 år) vil en opgradering af kunstlys installationerne i skolerne halvere energiforbruget, alene drevet af den teknologiske udvikling af lysteknologien. Samtidig vil LED lysgiverne opnå fuldt dagslys-spekter, og brugerstyringen blive endnu mere fleksibel med højere kvalitet i variationerne. Det er derfor sandsynligt, at det vil være nødvendigt med jævnlige opgraderinger, for at leve op til de kommende skærpede bæredygtighedskrav, og samtidig kunne understøtte de nødvendige forandringer i brugerkultur omkring lysmiljø.

En cyklus af udskiftning som grundbetingelse for bæredygtig optimering

Hvis man i et bæredygtighedsperspektiv kigger på de sandsynlige levetider, bør der foretages jævnlige opgraderinger af lyssystemet. Dette nødvendiggøres af teknikens hurtigere udaterede relevans og performance, hvor nye LED produkter er så markant bedre, og handler altså ikke om den benyttede tekniks tekniske levetid men dens driftsmæssige energiforbrug. Ligeledes vil der skulle opgraderes hvis mønstret i brugerkulturen udvikles så markant anderledes, at et re-design af kunstlyset og interfacen bliver nødvendig.

Der er krav på vej om at armaturer skal kunne renoveres med nye LED lysgivere, og altså snarere tale om en cyklus af udskiftning som grundbetingelse for bæredygtig optimering, end renovering ved endt levetid for teknikken. Når relevansen af produktets specifikation forældes før teknologien, bør man måske producere til kortere levetid, og hvis produkter skal udskiftes, er det vigtigt at medtage affaldsproblematikken ved bortskaffelse, mulige processer af genanvendelse, og resource-problematikken ved produktion.

I en mere helhedsorienteret tilgang til energioptimering kan man inddrage de ca. 60% af armaturprisen som involverer 'housing/driver/assembly' (se side 79), hvor der ligger betydelige energi-ressourcer til at fremstille materialer og producere armaturerne. I en mere bæredygtig fremtid kunne man anvende betydeligt mindre materialer til armaturerne, mindre aluminium til køling af LED, lettere armaturer af pap eller genbrugsmaterialer, mindre installation i bygningen af kabler og styring, og generelt indrette med bedre sammenhæng mellem lysdesign, brugerbehov og energioptimering.

Energioptimering med klarere brugerkrav ved renovering og nybyggeri

For at opnå en mere bæredygtig bygningsdrift, er det nødvendigt at kravene til lysmiljø og undervisningsmiljø præciseres. En præcisering kræver informerede brugere, der kompetent kan formulere deres ønsker og krav til renovering eller nybyg.

Hvis man skal kunne medtage løsninger der sparer energi ved at levere bedre kvalitet, så skal skoleledelserne specificere kvaliteten tydeligere. Skal energioptimering opnås med mere kombinerede effekter, skal byggeprocesserne organiseres med mere fokus på at opnå bæredygtige resultater. Arbejdet med at forbedre kvalitetsfokus og optimere byggeprocesserne foregår bl.a. i regi af Bygherreforeningen, hvor netop skolerne er i fokus⁸. Der er enighed om, på tværs af interessenter, at et pres fra brugerside, baseret på forprocesser og øget kompetence hos brugerne, er det vigtigste element til succes. Brugere skal forstå og kunne formulere, hvad lysmiljøet skal kunne og derfra udvikle krav til bygningen. Leverandører kan levere de efterspurgte produkter, med bedre afstemt bæredygtighed. Men de bæredygtige produkter skal efterspørges, for ofte står producenterne med relevante bæredygtige produkter, men kan ikke få dem afsat.

⁸ Dialogværktøj udviklet af Bygherreforeningen: <https://bygherreforeningen.dk/bygtilvelfaerd/>

BILAG

FORMIDLING – PUBLIKATIONER, PRÆSENTATIONER OG EVENTS

Projektbeskrivelse ELFORSK

Energioptimering med adaptivt lys i folkeskolen, 2019-2021, projekt nr: 351.008⁹

Fagbladsartikler (dansk sproget, national kontekst)

Energioptimering med adaptivt lys i folkeskolen. Kjell Yngve Petersen og Karin Søndergaard. Artikel i fagbladet LYS 4, december 2019.

Energioptimering gennem tilpasset lys i folkeskolen. Kjell Yngve Petersen og Karin Søndergaard. Artikel, ELFORSK hjemmeside, april 2020.¹⁰

Udstilling af lysinstrumentet Digital Weather på Thisted Bibliotek. Kjell Yngve Petersen og Karin Søndergaard. Artikel i fagbladet LYS 2, juni 2020.

Målrettet brug af lys skærper eleveres opmærksomhed og optimerer energiforbruget. Kjell Yngve Petersen og Karin Søndergaard. Artikel, ELFORSK hjemmeside, november 2020.¹¹

Erfaringer med adaptivt lys i folkeskolen. Kjell Yngve Petersen og Karin Søndergaard. Artikel i fagbladet LYS 1, marts 2021.

Gevinst på 20% ved brug af dynamisk lysstyring. Kjell Yngve Petersen og Karin Søndergaard. Artikel, ELFORSK hjemmeside, april 2021.¹²

Forskningsartikler (peer review, engelsk sproget, international kontekst)

Energy optimisation with adaptive light in primary schools. Kjell Yngve Petersen & Karin Søndergaard. Journal of Architectural Research in Finland ATUT2020. Under udgivelse.

Re-appreciation of people's engagement with Nordic Light. Kjell Yngve Petersen & Mikkel Bille. Journal of Architectural Research in Finland ATUT2020. Under udgivelse.

Artikel i bog

Tilsted Skole og Hanstholm Skole, Thisted Kommune. Adaptivt lys med LED armaturer optimerer læring og energiforbrug. Kategori: Renovering med mere. Kjell Yngve Petersen & Karin Søndergaard. Redigeret

⁹ <https://elforsk.dk/projektdatabase/energioptimering-med-adaptivt-lys-folkeskolen>

¹⁰ <https://elforsk.dk/nyheder/projektsresultat/energioptimering-gennem-tilpasset-lys-folkeskolen>

¹¹ <https://elforsk.dk/nyheder/projektsresultat/malrettet-brug-lys-skaerper-elevens-opmaerksomhed-optimerer-energiforbruget>

¹² <https://elforsk.dk/nyheder/projektsresultat/gevinst-pa-20-ved-brug-dynamisk-lysstyring>

bogudgivelse fra Realdania med fokus på gode indeklimaløsninger i skolerne. Under udarbejdelse. Publiceres oktober 2021.

Seminarer, konferencer, udstillinger og events

Forældre-introduktioner – 15 min. oplæg + folder på henholdsvis Hanstholm og Tilsted skoler, september 2019. Ved Karin Søndergaard og Kjell Yngve Petersen.

Oplæg ved Kjell Yngve Petersen: *Energieffektivisering og bedre læringsmiljøer i folkeskolen med Adaptiv belysning*. En tværfaglig case fra Thisted Kommune. Oplæg og diskussion om projektet på *Temadag for Energi- og Resourcestrategi*, Thisted Kommune. Strategimøde for de kommunale politikere og embedsfolk i Thisted Kommune, oktober 2019.

Præsentation og rundgang på Thisted Kommunes Skoleforvaltnings halvdagsseminar for Teknisk Service personel på skolerne. Planlagt med ½ times oplæg + rundvisning i Hanstholm d. 12. marts, 2020. Grundet Covid 19 blev arrangementet dog aflyst samme dag. Teknisk Service leder ved Tilsted Skole, Jan Møller, viste dog kommunens Teknisk Service medarbejdere rundt, ved et senere arrangement.

Udstilling Thisted bibliotek: Digital Weather. Ved Karin Søndergaard og Kjell Yngve Petersen. Fra januar 2020 - april 2021.

Skolelederarrangement. Lærer, Mia Y. Hegelund rundviser kommunens skoleledere om det nye lysdesign i klassen, oktober 2020.

Udstilling på Thisted Bibliotek om elev-workshops 10. november 2020 – februar 2021. Ved Karin Søndergaard og Kjell Yngve Petersen. Al udstillingsmaterialet, som bestod af udvalgte elevarbejder fra workshops placeret på en 2x6m 'liggende plakat', blev færdig-produceret. Men udstillingen måtte i flere omgange aflyses grundet Covid 19.

Interview-artikel. Kommunens projektleder Morten Sander arrangerer interview med lærer Mia Yde Hegelund, oktober 2020. Det er planlagt at interviewet publiceres i forbindelse med åbning af elev-udstilling på bibliotek. Desværre måtte udstillingen aflyses og interviewet blev ikke publiceret.

Præsentation. *Energy optimization with Adaptive Light in primary schools*. 12th Symposium of Architectural Research (ATUT2020). Session 2.2 'Northernness' – Designing for sustainable living, working, and well-being in the North. Kjell Yngve Petersen. Oktober 2020.

Præsentation. Re-appreciation of people's engagement with Nordic Light. 12th Symposium of Architectural Research (ATUT2020). Session 2.3 'Northernness' – Light and materials as elements of Northern architecture. Kjell Yngve Petersen og Mikkel Bille, Oktober 2020.

Præsentation. *Energioptimering med adaptivt lys i folkeskolen*. i forbindelse med DCLs årlige arrangement 'Lysets Dag 2020', online, ved forskningsleder Kjell Yngve Petersen, november 2020.¹³

¹³ <https://www.youtube.com/watch?v=SAT025D6D-k>

ENERGIOPTIMERING MED ADAPTIV BELYSNING I FOLKESKOLEN

Nyt projekt undersøger, om ny tilpasset belysning, der understøtter læringsmiljøet, kan føre til bæredygtig energioptimering

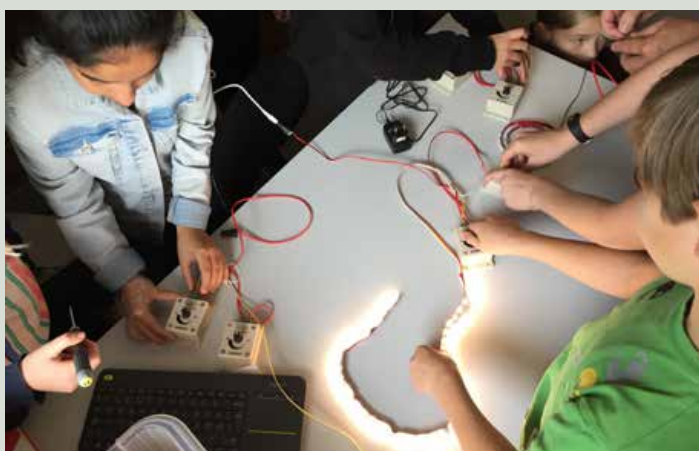
AF KARIN SØNDERGAARD, FORSKER, STATION INTER VIEWS OG KJELL YNGVE PETERSEN, FORSKNINGSLEDER, ATELIER KHR ARKITEKTER

Atelier KHR Arkitekter og Thisted Kommune har i et innovativt samarbejde og med ELFORSK midler i ryggen udviklet et spændende belysningsprojekt på to skoler i Thy. Der er tale om eksisterende skolebygninger på henholdsvis Tilsted og Hanstholm skoler. "Energioptimering med adaptiv belysning i folkeskolen" er projektets titel, og det handler kort fortalt om installation af nye belysningsteknologier, der – med fokus på klimatisk og social bæredygtighed – skal understøtte et fremadrettet, pædagogisk læringsmiljø.

Projektets hypotese er, at hvis lysdesignet giver muligheder for høj lyskvalitet og kvalitative lysmiljøer, og man samtidig giver brugeren adgang til kontrol af de adaptive styringer, så vil man i højere grad kunne energioptimere bæredygtigt.

Det adaptive betyder "tilpasning". Med de nye belysningsteknologier følger nye potentialer med temporært flydende lysdesigns og provisoriske rundannelser. De nye belysningsteknologier arbejder, ligesom dagslyset, med både vekslende lysfarver og omskiftelige intensiteter. Lysdesignere og forskere må således søge stadig nye forståelser i potentialet af belysnings-situationer og af lysets iscenesættende kvaliteter. Tænd/sluk-lyset er ved at være fortid. Kunstlyset kan integreres i intelligente systemer med sensorer og datainput og således spille sammen med brugerne og omgivelserne i dynamiske udvekslinger.

Dog, med alle disse tekniske muligheder, lurer den fare, at brugerens belysning i en fremtid styres af rigide og ufleksible, forudbestemte lysscenerier. Det kan være dagslysstyring sat ud fra idéer om døgnrytmer hos brugerne. Eller bevægelsestyring fra sensorer sat ud fra ideer om brugerens handlinger. Andre muligheder er faste sæt af scenarier, som tænkes passende for brugerens behov i dagligdagen eller managementbestemte optimeringer af med-



Situation fra workshop med elever på Tilsted Skole, hvor der konstrueres LED-lys prototype med samme indstillingsmuligheder som det installerede kunstlys i klasselokalet

arbejderperformance. Dette kan alt sammen være spekulationer, som brugerne hverken er ordentlig bevidstgjorte om, har givet tilsagn til, eller har mulighed for at undslippe.

I denne fagre, nye verden må vi derfor til stadighed stille kritiske spørgsmål til, i hvor høj grad vi vil styres af dataopsamlinger og forprogrammeringer, og hvorvidt det er vigtigt, at brugeren selv kan styre basale behov – som at kunne styre lyset og åbne vinduer. I dette projekt lægges der vægt på, at brugeren, som den kompetente borger, tildeles råderum til kontrol med sit miljø. Således tager undersøgelserne udgangspunkt i en pragmatisk tilgang, hvor brugerens handlinger og egne perceptioner tænkes som de primære parametre i styringen af det indendørs klima.

Projektets metodiske tilgang

Projektet udfører konkret transformation af lysmiljøet i afgrænsede arealer på de to folkeskoler. Undersøgelsen er sat op som komparative forsøg, hvor der på hver skole

er to klasseværelser, som er ombygget, og to der fremstår, som da projektet startede. På begge skoler er desuden flere fællesarealer medtaget i undersøgelserne om belysningstransformation, da væsentlige dele af den daglige undervisning foregår udenfor klasseværelserne i de fælles arealer.

Da der er tale om et forskningsprojekt, har vi kunnet afsætte tid til en analytisk og transformativ proces med re-design og samskabelse, hvor alle deltagende parter lærer af hinanden.

En væsentlig del af det adaptive lysdesign og ambitionen om bæredygtighed er baseret på idéen om velinformerede, indsigtfulde slutbrugere til at varetage den daglige drift.

Det adaptive lys installeres i klasselokaler og fællesarealer gennem en 18 måneders lang proces af samskabelse, re-design og gensidig læring. Lokalerne fungerer som aktive living-labs, der involverer lærere og elever, forskere, pedeller og kommunens tekniske forvaltning, samt skoleledere og skoleforvaltning. Lokalerne

Ubeskårede fotos taget af elever i 5.klasse, under en opgave om at finde og analysere lysituationer og fænomener. Tilsted Skole i Thy.



Lysstråle og glans på bænke



Lys og skygge i kompliceret hjørne



Lysmediering i orange plast

omdesignes med de nyeste, justerbare lyskilder og armaturer, adaptive kontrolsystemer og tætte sensornetværk.

I alle rum er der sat styringssystemer og separate målere af strømforbrug op. Desuden opsamles data vedrørende øvrige indeklimaparametre herunder luftkvalitet, lydniveau, temperatur og fugtighed. Dette for i sidste ende at kunne vurdere det samlede indeklima.

Samskabelse, re-design og living-labs

I samskabelsesprocessen omkring det nye kunstlys udvikler alle involverede et fagligt sprog om lys og indføres i kompetencerne til at kunne bestemme lysmiljøet.

I en serie workshops involveres lærere og 5-6 klasses elever i grundlæggende forståelser af dagslys og kunstlys, lysfænomener, rumlige lysituationer og lysteknologi. De introduceres til, hvordan lyset fordeles og reflekteres til rumlige kvaliteter. Gennem observation og analyse foretager de visuelle studier af lyssteder, lysforekomster og lysscenarier.

For at give sprog til lysmiljøets kvaliteter, effekter og funktioner, indføres de i metoder til at observere og notere lyskvaliteter og lyskvantiteter. Således stilles der opgaver i workshopsene. Lysværdier undersøges gennem lysmålingsopgaver, hvor eleverne håndterer luxmålere og spektralfordelingsmålere og analyserer, hvordan lysets karakteristisk opstår fra lyskilder og dagslys.

Gennem klassens almindelige dukse-ordning har de to ugentlige dukse ansvar

for dagens lysdesign i klasserummet. Dukse laver notater om det daglige lysmiljø, og leverer rapporter omkring lysindstillinger og lyskvaliteter til forskerne. Børnene lærer hurtigt at styre lysdesignet, og de er generøse i deres videndeling med pedeller og lærere.

Kvalitative parametre i lysdesign

De nye lysinstallationer skal understøtte det nutidige læringsmiljø og den pædagogiske indsats, som skolerne i dag forpligter sig på. Designet tager afsæt i diskussionen om læringsmiljøet som sociale miljøer, hvor et spekter af helt praktiske forhold bliver væsentlige for lysmiljøet. For eksempel:

- Understøtte sociale situationer og gruppearbejder med etablering af lysrum eller lys som "rum i rummet".
- Hvordan visuelt samvær understøttes, herunder hvordan lærere og elever ser hinanden
- Det skal være muligt at se smartbordet og samtidig have rigeligt med dagslysfald
- Indstillinger af balancen mellem dagslyset og kunstlyset åbner for mere direkte dagslysfald.
- Lysdesignet i klasseværelset skal kunne danne flere lysscenarier; til Chromebook-undervisning ved bordene, til håndarbejde ved bordene, til hvor der kræves redskaber, udføres håndværk, og til hvor der læses fra bøger osv.

- Lysmiljøet skal understøtte, at man kan bevæge sig igennem rum, se langt igennem bygningen og have udsigt

Det nye lysdesign er en arkitektonisk afvejning af lyskilder og lysindfald. Kunstlyset indstilles i dynamiske variationer i samspil med dagslyset. Der etableres balancer mellem uplight og downlight og der skabes kompositioner af diffust og rettet lys. Der formes vandrette og lodrette flow med refleksioner af lys, og der dannes skyggetegning og skyggefordeling.

Brugerstyret lysmiljø

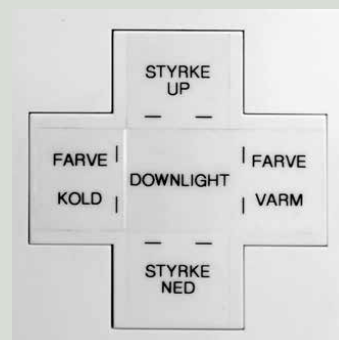
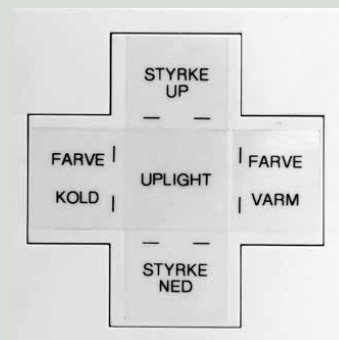
Det nye design af lysystemet giver brugerne adgang til at styre de kvalitative parametre af lysmiljøet. Lyset styres med enkle kryds-knapper, der er monteret, så alle kan være med - inklusive elever. Gennem det daglige design af lyset opbygger elever og lærere en nuanceret forståelse af lysmiljøer, som de er i stand til at beskrive, ønske, iscenesætte og diskutere, og altså tage indsigtsfuldt ansvar for designet af sit eget lysmiljø.



Direkte sol og refleksioner på gulv.



Lysfænomen på hvid væg.



↑ Krydskontakt med separat indstilling af lysintensitet og lysfarve, som elever og lærere benytter i de daglige indstillinger af lysmiljøet

← To tekstdrag fra duksenes rapporter om deres belysninger af klasserummene på Tilsted Skole.

Uge 36:

Vi har valgt at gøre downlight lidt varmt og ikke så kraftigt fordi vi skal arbejde på chromebook. Uplight er mere kraftigt med normal farve.
uplight tog vi op for på varm og downlight tog vi ned fordi vi brugte chromebook
downlight er koldt og uplight er varm vi tog lidt op for styrken fordi vi skulle læse og skrive og få skulle være på chromebook
vi har valgt at downlight er kold og styrke ned og uplight var styrke op fordi vi brugt chromebook og så der er lidt mere daglys

Uge 43

Vi har valgt at lyset skal være at uplight skal være gult/lyst og downlight skal være blå/kold
Vi har valgt at tage det øverste lys helt ned og det nederste lys har vi skruet op. Fordi at vi skal lave arbejdsbogen
Vi har valgt at lyset skal være varmt for oven og så har vi skruet ned for det og så og så normalt lys for neden og skruet lidt op for det.
Vi har valgt og skrue ned for lyset som peger op mod loftet og skrue lidt op for det som peger ned mod gulvet i farven kold.



Fællesrum på Hanstholm Skole før (april 2019) og efter (september 2019) installation af nyt LED-lys med separat indstilling af lysintensitet og lysfarve for både uplight og downlight



Klasselokal på Hanstholm Skole før (april 2019) og efter (september 2019) installation af nyt LED-lys med separat indstilling af lysintensitet og lysfarve for både uplight og downlight



Titel: Energioptimering med adaptivt lys i folkeskolen.

Forskningsprojekt 2019-2021, støttet af ELFORSK.

Projektledelse:

Atelier KHR Architecture, forskningsleder Kjell Yngve Petersen
KHR Architecture A/S

Partnere:

Thisted Kommune, Erhverv og Teknik
Tilsted og Hanstholm Skoler
Roskilde Universitet, lektor Mikkel Bille
Station Inter Views, forsker Karin Søndergaard
Lysteknik: Glamox A/S
Dansk Center for Lys

Bygninger:

Tilsted Skole, Bygning 7, opført 1970
Arkitekt: Jørgen Råby
Hanstholm Skole, Bygning 2, opført 1967
Arkitekt: Henning Jørgensen & Arne Christensen

UDSTILLING AF LYSINSTRUMENTET DIGITAL WEATHER PÅ THISTED BIBLIOTEK

– i forbindelse med projektet Energioptimering med adaptivt lys i folkeskolen ved KHR Architecture. Digital Weather er bygget som et iagttagelsesinstrument. Værket iscenesætter oplevelsen af lyset i en dynamisk integrering af dagslys og kunstlys.

AF KJELL YNGVE PETERSEN, FORSKNINGSLEDER, KHR ARCHITECTURE OG KARIN SØNDERGAARD, FORSKER OG KONCEPTUDVIKLER, STATION INTER VIEWS

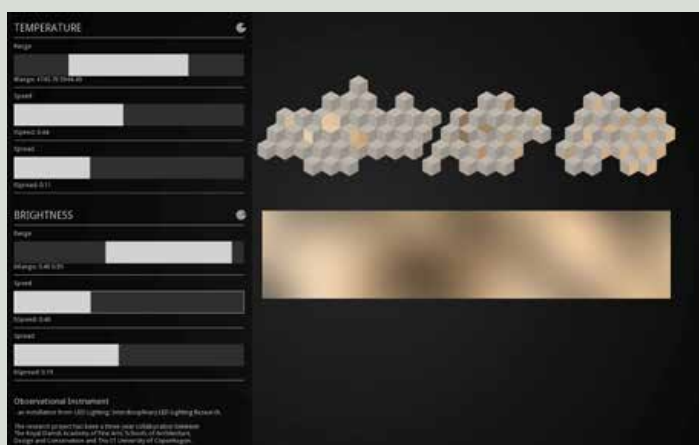
→ Digital Weather fanger dagslysfaldet med sine kuber og som en digital lysende sky leger den med en dynamisk flux af hvide lysfarver og lysintensitet. Foto: Kjell Yngve Petersen.

Dagslyset er dynamisk, og afhængig af vejret udfolder det sig med både subtile og dramatiske skift i lysets farver og intensiteter. Gennem bygningskroppens åbninger skaber lyset en sammenhæng mellem verden udenfor og rummet indenfor. Man kan sige, at verden udenfor projicerer sig i rummet indenfor som abstrakte og diffust lysende refleksioner. Som mennesker stimuleres vi i denne dynamiske interaktion med verden.

Kunstlyset har indtil for nylig været en tænd/sluk-teknologi kendetegnet ved en konstans i farve og intensitet. I kraft af LEDens teknologiske konvertibilitet med digitale styringssystemer er de nye lyskilder imidlertid i stand til at producere dynamisk variation i farver og intensitet, på måder, der svarer til dagslyset. Dagslyset og kunstlyset er således stillet i en ny relation. Digital Weather stiller fokus på denne relation.

Digital Weather består af kuber, der stikker ud fra væggen. En del af kuberne har translucente sider, hvor der bagved er indbygget reflektorkasser med lysdioder. Lysdioderne er forbundet til et digitalt styringsværktøj, der med en specialdesignet software kan iscenesætte dynamiske lys-scenarier i kunstlyset – altså et slags digitalt vejr. Via en touch-screen kan man stille på kunstlyset. På touch-screen ses også en dynamisk visualisering af det "digitale vejr", som styrer flowet af lys-farver og lysstyrker i værket på væggen.

Digital Weather er udstillet fra januar frem til december i Thisted Biblioteks stilfulde hall og i maj skulle elevernes undersøgelser fra elev-workshops på de to Thy-skoler have været udstillet sammen



På touch screen ses illustration af instrumentet Digital Weather og den bagvedliggende digitale sky dens lysfarver og intensitet styres af. Screenshot, softwaredesign: Ole Kristensen.

med Digital Weather. På grund af coronasituationen kunne dette ikke realiseres i maj, men vi satser på at kunne gennemføre i august/september.

Digital Weather er produceret ved Det Kongelige Danske Kunstakademis Skoler for Arkitektur & Design og IT-Universitetet – i et forskningssamarbejde mellem forsker Kjell Yngve Petersen, software-kunstner Ole Kristensen, arkitekt Karina Munkholm Madsen samt konceptudvikler og forsker Karin Søndergaard, Station Inter Views. ■

Fakta om projektet:

Digital Weather og de iagttagelser, som værket sætter i scene, er aktuelle i forbindelse innovationsprojektet Energioptimering med Adaptivt Lys i Folkeskolen – et samarbejdsprojekt mellem KHR Arkitekter og Thisted Kommune, RUC, Glamox og DCL. Projektet handler om bæredygtig belysning og ny teknologi og er støttet af ELFORSK. Projektet udfolder sig i samskabelse med elever, lærere og teknisk personale ved Tilsted og Hanstholm Skoler (2019-2021). Læs mere om projektet i LYS 4 – 2019.

www.centerforlys.dk / 29

ERFARINGER MED ADAPTIVT LYS I FOLKESKOLEN

Mange folkeskoler står overfor bæredygtige opgraderinger af deres kunstlys. Det indebærer implementering af LED-belysninger med andre og nye lyskvaliteter og styringsmuligheder end tidligere. Hvilke nye potentialer for lysmiljøet udfolder LED-teknologierne? Og hvad omfatter disse nye potentialer af bæredygtige muligheder for den daglige undervisning og kvaliteterne af skolens lysmiljøer?

AF KARIN SØNDERGAARD, FORSKER, STATION INTER VIEWS OG KJELL YNGVE PETERSEN, FORSKNINGSLEDER, ATELIER KHR ARKITEKTER

I Atelier KHR Architecture og Thisted Kommunes projekt Energioptimering gennem adaptivt lys i folkeskolen, som er støttet af ELFORSK, har den intentionelle driver været at undersøge om, brugerne egenkontrol med styring af kunstlyset vil generere et andet forbrugsmønster, der potentielt vil kunne udnytte energien bedre. Samtidig undersøges hvordan undervisningen benytter de nye muligheder for variation i lysmiljøet, og hvad det stiller af krav til producenter og designere af fremtidens lysdesign i skoler.

Projektet arbejder med samskabende brugerintegrering, og interesserer sig særligt for, hvordan adaptiv belysning, som en faktor for indeklimaet samtidig kan stimulere undervisningsmiljøet. Derfor har det været essentielt at indgå i samskabende udvekslinger med lærere, elever og teknisk personale i kommunen for at undersøge, hvordan belysningsteknologierne kunne tænkes som en kontekst, der understøtter pædagogiske metoder, og som kan integreres i den daglige undervisningspraksis.

Samskabende brugerintegrering

Gennem 18 måneder har folkeskolerne i Tilsted og Hanstholm fungeret som et laboratorium, hvor man har bidraget aktivt med et udforskende brugerperspektiv. Den samskabende brugerintegrering er gennemført dels i form af workshops med elever og lærere, hvor vi – med fokus på både dagslys og kunstlys – har undersøgt lyset som arkitektonisk materiale, og udforsket hvordan lyset iscenesætter rumlige situationer. Dels har vi, sammen med kommunens tekniske servicefolk og lokale elektrikere, gennemført længere processer af re-designs og tests, hvor installering af lysdesign og styringssystem i en periode afprøves og tilpasses forskellige undervisningssituationer.



Figur 1. De fire lysscenarier: øverst til venstre "chrome" og til højre "elevarbejde". Nederst til venstre "fælles" og "hygge" til højre. Tilsted Skole, klasseværelse mod vest. Foto: KHR.

Adaptivt kunstlys som pædagogisk værktøj og didaktisk markør

I afgrænsede fællesområder og i fire klasseværelser har de to folkeskoler fået installeret et nyt LED-lysdesign.

På Tilsted skole har vi i klasseværelserne fundet frem til et sæt af fire lysscenarier, som understøtter fire grundlæggende undervisningssituationer. De fire lysscenarier er navngivet: 1) "chrome" (når man arbejder på computer, 2) "elevarbejde" (når man læser eller skriver ved bordene), 3) "fælles" (når klassen skal kommunikere indbyrdes og kunne se hinandens ansigter godt) og 4) "hygge" (til hyggestunder). De fire faste lysscenarier kan justeres i lysfarver og intensitet, både i uplight og downlight, men hvert lysscenarie genstarter altid med en fast setting. Derudover har vi opretholdt det, vi kalder grundlys, som benyttes til at give almenlys før en specifik indstilling vælges.

Klasselæreren fortæller, hvordan de anvender de fire lysscenarier som markør

for den aktuelle undervisningssituation. At hun anvender et skifte i lysscenariet som introduktion til, hvad der skal ske. Når hun eksempelvis sætter "chrome"-scenariet på, forventer eleverne, at de skal arbejde på chromebook og finder computerne frem. Lysscenarierne er således, på ret overraskende vis, blevet et pædagogisk understøttende værktøj og en markør for den didaktiske situation.

På Hanstholm skole, har man valgt et mere åbent flow i styringen og har ikke umiddelbart ønsket faste scenarier i relation til undervisningens metodevalg. Også her har lærerne fundet frem til at bruge lyset til at fokusere opmærksomheden i klassen. Man anvender således lyset som en indikator for et skifte i den didaktiske metode, hvor der med lysskiftet forventes et skifte i adfærd og koncentration i klassen.

På begge skoler fortæller lærerne om, hvordan de begyndte at anvende lyset som et pædagogisk redskab. Det blev nemlig hurtigt klart for lærerne, at en forandring

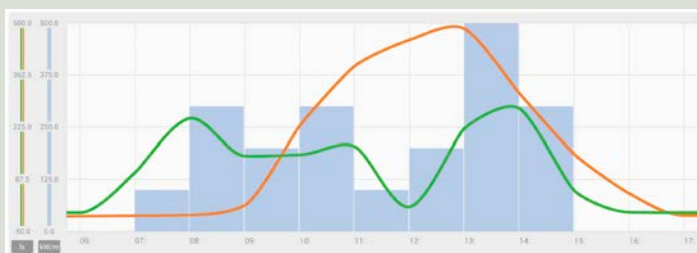


Figur 2. Klasseværelse på Tilsted Skole med træer til at afskærme direkte sol, høje vinduer og lofter der er skrå og reflekterende for dagslyset. Indsat en lysberegning af belysningsforholdene ved grundbelysning (40/40%, 4000K), som giver jævn arbejdsbelysning. Grafik: KHR.

Scene oversigt klasserum – Adaptivt lys i folkeskolen – KHR

Scener	Downlight (%)	Downlight (Kelvin)	Uplight (%)	Uplight (Kelvin)
Grundbelysning	40	4000	40	4000
Chrome	0	6024	70	6024
Elevarbejde	30	4504	70	4504
Fælles	51	4504	70	4504
Hygge	0	3508	70	3508

Figur 3. Data om indstillingerne af lysintensitet og lysfarve i grundbelysningen og de fire lysscener. Indstillinger udviklet og udvalgt af brugerne gennem samskabelsesprocessen.



Figur 4: Datavisualisering af dagslys (orange linje), lysniveau i klasselokalet (grøn linje) og energiforbrug (blå søjler). Målt tirsdag den 24. november 2020 i klasselokale med nyt LED-lys og østvendte vinduer på Tilsted Skole.

i lyset etablerer en ny rumlig iscenesættelse, hvilket afstedkommer et opmærksomhedsskifte, som man kan benytte konstruktivt. F.eks. fortæller en lærer, hvordan hun, når der bliver for megen uro i klassen, tidligere har brugt at sende børnene ud på en hurtig løbetur, så de "får rystet uroen ud af kroppen". Men med det nye lysdesign kan hun, ved at ændre på lyset, etablere et lignende opmærksomhedsskifte. Det gør, at hun kan holde børnenes opmærksomhed rettet mod et fokus over længere tid, uden koncentrationen brydes.

Det, at man forholder sig til lyssituationen, etablerer en bevidsthed om lyset og en omtanke i forhold til, hvordan man bruger det. Nu går man ikke længere bare ind i klassen og "banker lys på on/off kontakten". Man sætter lys i forhold til den undervisningssituation, man skal i gang med. Og man orienterer sig helt instinktivt på dagslyssituationen i rummet og sætter lyset i et forhold til det naturlige lys. Ofte kan elever vælge slet ikke at ville have kunstlyset tændt, og endda bede om at få det slukket.

Data og energioptimering

Som en del af laboratorieopsætningen i klasserne er der opsat sensorer, som løbende måler på indeklima (CO₂, lyd, varme, fugt), lyssensorer inde og ude, og energimålere på hvert lokale.

Som det ses i eksemplet fra 24. november 2020 (figur 4), er det tydeligt, at kunstlyset i dette lokale justeres ofte i løbet af dagen (kan ses af energiforbrugets variation). Lyset tilpasses oftest for at opnå et bestemt lysmiljø, snarere end for at opretholde et jævnt belysningsniveau (kan ses af lysniveauets variation i klasselokalet). Dette klasselokale har en ny LED-skærm med minimalt energiforbrug. Det tilsvarende referenceklasselokale med "on/off"-kontakt og lysstofrør har ens energiforbrug alle timer, hvor lyset er på og et tydeligt ekstra forbrug, når smartboard er tændt. Energiforbruget er næsten det samme i de to klasselokaler, men kvaliteten af lysmiljøet og understøttelsen af undervisningen er væsentligt forbedret med nye lyskvaliteter og øget bruge-bevidsthed om lysmiljøets muligheder i dagligdagen.

Optimering af lys til undervisning

I et bæredygtigt perspektiv er der store potentialer med adaptivt lysdesign. Spørgsmålet er, om man ikke kan opnå lige så gode optimeringer af økonomi og energi med den bedste kvalitet og det rette lys, som ved løsninger, hvor kun det lovmæssigt krævede minimum i lysmiljøet overholdes? Kan brugerkulturer omkring lys optimere bedre end tekniske løsninger med automation? Hvis lyset er der for at understøtte undervisningens aktiviteter,

hvilke krav og muligheder skal der så stilles til lysmiljøet og dets tilpasningsmuligheder?

Fleksibilitet og brugerengagement er forudsætningen for yderligere bæredygtighed i fremtiden. Det adaptive lysdesign beforder, at lyset hele tiden justeres til det niveau, som der er behov for. Mulighederne for at justere balancen mellem diffust og rettet lys, variere lysfordelingen opad og nedad, og forandre lysfarven til koldere og varmere, gør at der benyttes meget mere tilpassede lysforhold til undervisningens aktiviteter. Med de nye lysinstallationer er rullegardiner, som tidligere næsten altid var rullet ned, nu næsten altid oppe. Dagslyset er blevet en ressource snarere end et problem, og det adaptive lys sikrer meget mere dagslys i dagligdagen.

Inddragelse af kompetente brugere er en vigtig forudsætning for en bæredygtig brugerkultur omkring lys, hvor ressourcer og behov balanceres i den daglige undervisning. Brugernes engagement udvikler en øget viden omkring lys og beforder kompetent indflydelse på lysmiljøet.

Det adaptive lysdesign opnår optimering ved fleksibilitet i lysmiljøet, konkret styret af brugerne, og gennem udvikling af en bæredygtig brugerkultur. ■

Titel:

Energioptimering med adaptivt lys i folkeskolen.
Forskningsprojekt 2019-2021, støttet af ELFORSK.

Projektledelse:

Atelier KHR Architecture, forskningsleder Kjell Yngve Petersen
KHR Architecture A/S

Partnere:

Thisted Kommune, Erhverv og Teknik
Tilsted og Hanstholm Skoler
Station Inter Views, forsker og kreativ producer, Karin Søndergaard
Roskilde Universitet, lektor Mikkel Bille
Lysteknik, Glamox A/S
Dansk Center for Lys

Bygninger:

Tilsted Skole, bygning 7, opført 1970. Arkitekt Jørgen Råby
Hanstholm Skole, bygning 2, opført 1967. Arkitekt: Henning Jørgensen & Arne Christensen.

Se LYS 4 – 2019 for introducerende artikel om projektet.

Forskningsartikel

Energy optimisation with adaptive light in primary schools

Authors:

Kjell Yngve Petersen & Karin Søndergaard

Journal of Architectural Research in Finland ATUT2020

Abstract

The research investigates the challenges in the design of light environments in primary school environments. The challenging question is, how it is possible to achieve better economy and energy optimization by enhancing the user influence and aiming at highest light quality?

The research analyses and discuss findings in a lighting-design research project (2019-2021) transforming two primary schools in Thisted Kommune, Northern Jutland, Denmark. A team of researchers engage in progressive co-design processes, gradually implementing a new lighting system. The project seeks to enhance the concrete potentials of intelligent energy optimization with adaptive light in primary schools, where a selection of spaces is re-designed with the newest adjustable light armatures, dense sensor networks and adaptive control systems.

The research is a close collaboration between designers, architects, managers, manufacturers and, not the least: the end-users by involving teachers and pupils, engaged through their everyday educational activities.

The adaptive lighting enables enhanced access for users to modify their light conditions. The suggestion is that high quality lighting and enhanced user control offers a more sustainable lighting design than current focus on price and automation. Adaptive light is installed in select teaching spaces through an 18 months co-design process, involving pupils and teachers. Across the seasons and educational user scenarios, the installations are tested for energy usage, operating economy, and the quality of the lighting as experienced by the users.

Spaces are monitored with sensors on light levels and energy consumption, and on a range of indoor climate parameters, such as temperature, sound and air quality, every 5 minutes over more than two years, both in re-designed spaces and reference spaces that have been left un-altered.

Pupils and teacher are engaged as citizen scientists, in collaboration with the researchers, enabling experiential reports and monitoring from the user's perspectives. The empowerment of the inhabitants, to control and develop their own lighting design qualities, is suggested to be an essential part of future sustainable design paradigms, where the social, the environmental and the economic aspects are equally relevant when assessing design solutions.

Forskningsartikel

Re-appreciation of people's engagement with Nordic Light

Authors:

Kjell Yngve Petersen & Mikkel Bille

Journal of Architectural Research in Finland ATUT2020

Abstract

The Nordic Light, as a metaphor, could be viewed as a composite, made of the actual light conditions outdoor, the way we design and use artificial light indoor, and the sensibilities, habits and customs of our light appreciation. The particular character of the northern light qualities is formed by several dynamics, each of different scale, rhythm and fluctuation, which in the everyday is experienced as a lively modulated and diverse light environment.

To respond to the complex fabric of light events, qualities and variations, which generate the qualities of the northern light conditions, there are new opportunities in integrated adaptive lighting system to mediate indoor lighting in dynamic ways relative to the outdoor lighting. This paper presents how the engagement with the systems of adaptive lighting, facilitates the introduction of the empowered and informed user with extended access to form their light environment and shape their Nordic Light interpretation through access to control artificial lighting and modulate daylight influx.

Our research project establishes a living-lab, which allows for continuous and evolving re-design of the light environment in two primary schools. This field study, and lighting design practice, enabled questions on the deeper relations between light environment, lighting systems, and the everyday practices and experiences of people. The paper shows how Nordic Light, as the aesthetic appreciation of both natural and artificial illumination, and the technologies and weather that facilitates it, have a special meaning as a culturally generated atmosphere of learning, which form an essential part of how new adaptive lighting systems are to be understood and designed. This shows how a re-appreciation of the environmental light dynamics can empower user-driven designs and everyday user engagement.

UDSTILLINGER PÅ THISTED BIBLIOTEK

Som en del af projektets formidlingsstrategi var der planlagt udstillinger på kommunens største bibliotek beliggende i Thisted. Udstillingerne blev planlagt til at skulle foregå i to etaper.

Første etape med værket *Digital Weather*, som illustrerer nye grundprincipper i belysningsdesign, hvor der indgår dynamisk variation i lysstyrke og lysfarver. Værket er skabt som del af et tidligere forskningsprojekt, hvor forholdet mellem dynamisk dagslys og dynamisk kunstlys sættes i fokus.



På billedet er man ved at ophænge Digital Weather på Thisted Bibliotek. Værket har været udstillet på biblioteket fra januar 2020 til april 2021.

Ved en åbningsevent skulle næste etape udvide udstillingen med udvalgte elevarbejder fra workshops. Dette var planlagt til maj 2020. Med udstillingen ønskede vi at formidle projektet til forældre, andre skoler - deres elever og lærere, politikere, embedsmænd og andre, som ville høre om udstillingen gennem beskrivelser af eventen og udstilling i lokale medier

I den forbindelse iværksatte projektlederen i kommunen et interview med en lokal journalist og en lærer fra en af skolerne, som skulle publiceres i en lokal avis samt på kommunens hjemmeside. Interviewet var tænkt som formidling af udstillingseventen og blev desværre ikke publiceret, idet biblioteket lukkede ned og vi måtte aflyse elevudstillingen.

For i sidste ende kom Covid19-restriktionerne i vejen for udstillingen af elevarbejder. Sammen med kommune og bibliotek planlagde vi en senere åbning i september 2020 og senere igen udskudt til november 2020. Desværre har vi i dette forløb måttet opgive den ellers færdig producerede elev-udstilling. Vi vælger dog her at fortælle om den, som den ville have taget sig ud – med de udfærdigede tekster og plakater.

Værk og værktekst til udstilling af Digital Weather, Thisted Bibliotek



DIGITAL WEATHER

Værket **Digital Weather** er et iagttagelsesinstrument.

Værket iscenesætter oplevelsen af lyset i en dynamisk integrering af dagslys og kunstlys.

Dagslyset er dynamisk, og afhængig af vejret udfolder det sig med både subtile og dramatiske skift i lysets farver og intensiteter. Gennem bygningskroppens åbninger skaber lyset en sammenhæng mellem verden udenfor og rummet indenfor. Man kan sige, at verden udenfor projicerer sig i rummet indenfor som abstrakte og diffust lysende refleksioner. Som mennesker stimuleres vi, i denne dynamiske interaktion med verden.

Kunstlyset har indtil for nylig været en tænd/sluk teknologi, kendetegnet ved en konstans i farve og intensitet. I kraft af LED'ens teknologiske konvertibilitet med digitale styringssystemer, er de ny lyskilder imidlertid i stand til at producere dynamisk variation i farver og intensitet, på måder der svarer til dagslyset. Dagslyset og kunstlyset er således stillet i en ny relation. *Digital Weather* stiller fokus på denne relation.

Digital Weather består af trefladede kuber (en tesselering), der stikker ud fra væggen. En del af kuberne har translucente sider, hvor der bagved er indbygget reflektorkasser med lysdioder. Lysdioderne er forbundet til et digitalt styringsværktøj, der med en specialdesignet software kan iscenesætte dynamiske lysscener i kunstlyset – altså et slags *digitalt vejr*.

Via en touch-screen – som står oppe på trappeafsatsen – kan man stille på kunstlyset. På touch-screen ses også en dynamisk visualisering af det 'digitale vejr', som styrer flowet af lys-farver og lysstyrker i værket på væggen.

Digital Weather og de iagttagelser værket sætter i scene, er aktuell i forbindelse innovationsprojektet *Energioptimering med Adaptivt Lys i Folkeskolen*.

Projektet er et samarbejdsprojekt mellem KHR Arkitekter og Thisted Kommune. Projektet handler om bæredygtig belysning og ny teknologi og er støttet af ELFORSK. Projektet udfolder sig i samskabelse med elever, lærere og teknisk personale ved Tilsted og Hanstholm Skoler (2019-21)

Digital Weather er skabt i et samarbejde mellem software-kunstner Ole Kristensen, arkitekt Karina Munkholm Madsen, forsker Kjell Yngve Petersen, samt forsker Karin Søndergaard.

Værket er produceret i et forskningssamarbejde mellem IT-Universitetet i København og Det Kongelige Danske Kunstakademis Skoler for Arkitektur og Design (2012-15). Projektet er støttet af Kulturministeriet.

Projekt præsentation, udstilling Thisted Bibliotek

På udstillingen skulle projektet præsenteres med følgende plakat ophængt i bibliotekets Hall.

Energioptimering med Adaptivt Lys i Folkeskolen

– er titlen på et samarbejdsprojekt mellem KHR Arkitekter og Thisted Kommune, der handler om bæredygtig belysning og ny teknologi. Projektet udfolder sig ved Tilsted og Hanstholm Skoler og sker i samskabelse med elever, lærere og teknisk personale, som agerer *Citizen Scientists in the Classroom*.

Som Citizen Scientists in the Classroom, indgår borgere som forskere i faglige undersøgelser, som vedkommer deres liv og omgivelser. Både børn og voksne kan indgå i seriøse faglige undersøgelser og på denne måde få indsigt og indflydelse på udvikling og fremtid. I dette projekt får vi indsigt i, hvad lys er, og hvordan vores brug af lys påvirker både os selv og klimaet.

I to klasseværelser på hver skole og i fællesområder, har projektet installeret ny kunst-belysning, hvis lysfarver og lysintensiteter kan indstilles i relation til dagslyset udenfor, samt i forhold til de forskellige behov på en skoledag. En del af projektet har netop beskæftiget sig med at identificere disse behov, og hvad de bedste valg kan være for skolernes brugere. Med denne viden kan forskerne rapportere til aktører i belysningsfaget og til producenterne, der udvikler lamper og teknologi. Og således kan vi hjælpes ad, med at forbedre vores teknologi i bæredygtig retning.

Dagslyset er det bedste lys, vi har og når man designer kunstlys, ser man på, hvordan dagslyset fungerer. Derfor har vi i samarbejde med Kommunens afdeling for Teknik og Erhverv – og sammen med elever, lærere og teknisk service, undersøgt kvaliteter i dagslyset. Hvad er lysfarver? Hvad er lysstyrke? Hvad er lysmediering? Hvad er lys-refleksioner? Hvordan bevæger lyset sig? Hvad er godt lys for øjet og hvordan måler man lyset?

Denne udstilling formidler nogle af de mange undersøgelser, vi har gjort sammen med fire 5. klasser. Eleverne har været optaget af at finde, dokumentere og analysere lysfænomener, lyssituationer, lysfarver, forhold mellem lys og skygge og hvad, der er godt lys i forskellige situationer. De har lavet lysdesign i små modelkasser og undersøgt fænomenet Camera Obscura. Nogle af disse dokumentationer kan ses på denne udstilling. Mange af øvelserne er ligetil at gå i gang med selv, og i udstillingen kan man aflure hvordan.

På væggen op ad trappen ses fotos taget af grupper i 5.klasse, under en opgave om at dokumentere og analysere fundne lyssituationer og fænomener. I biblioteket kan du se en liggende plakat med objekter, anvendt som instrumenter til lys-iagttagelser.

Projektet er udviklet af KHR Arkitekter, Station Inter Views og Thisted Kommune – og det er støttet af ELFORSK. Projektet sker i samarbejde med Roskilde Universitet, GlamoX og Dansk Center for LYS.

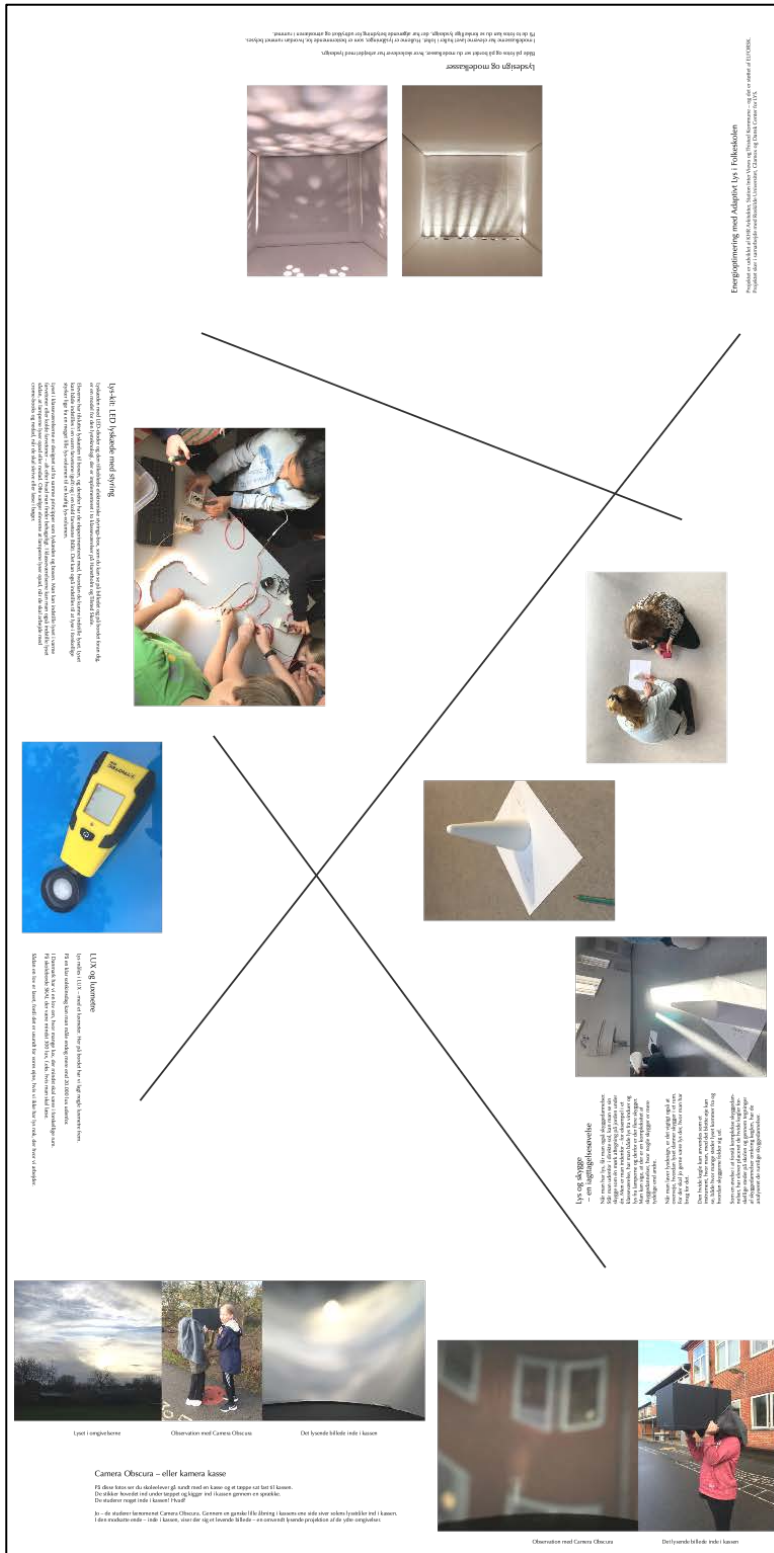
Vægplakater, udstilling Thisted Bibliotek

På den modsatte væg i Hallen – overfor *Digital Weather*, var det planlagt at ophænge fem plakater. Plakaterne er udvalgte elevarbejder, hvor eleverne har fået til opgave at iagttage særlige lysforhold på skolens område, tage et foto og præsentere deres iagttagelse i fælles forum.



Liggende plakat, udstilling Thisted Bibliotek

I bibliotekets store sal var det planlagt at etablere en stor liggende plakat på 120 x 240 cm. Bordet skulle være tilgængeligt fra alle sider, således man kunne bevæge sig rundt om det og læse og se de printede fotos.



På plakaten skulle objekter, udvalgte elevopgaver og værktøj til iagttagelse ligge fremme på bordet, så publikum selv kunne studere f.eks. hvordan man bygger en *Camera Obscura* eller laver en *model kasse* til lysdesign. Eller man kunne prøve et *luxmeter* og se hvordan man måler lys.

IKHAR

A R C H I T E C T U R E



THISTED KOMMUNE



GLAMOX

STATION INTER VIEWS



ELFORSK