



VARMT ELLER KOLDT?

Lysets indflydelse på termisk komfort

PSO 348-030



Ásta Logadóttir,
Anders Thorseth,
Jørn Toftum,
Sophie Stoffer,
Jakob Markvart

SBi
Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet · 2018

Titel VARM T ELLER KOLD T?
Undertitel Lysets indflydelse på termisk komfort PSO 348-030
Serietitel
Udgave 1. udgave
Udgivelsesår 2018
Forfatter Ásta Logadóttir, Anders Thorseth, Jørn Toftum, Sophie Stoffer, Jakob Markvart
Redaktion
Sprog Dansk
Sidetæl
Litteratur-
henvisninger
English
summary
Emneord

ISBN

Pris
Tegninger
Fotos

Omslag: Forsøgslokalet ved forskellige farvetemperature, foto Michelle Kühl [1] og bygning 130 på DTU Fototeknik med forskellige temperature på etagerne, foto Anders Thorseth.

Tryk

Udgiver Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet,
A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København SV
E-post sbi@sbi.aau.dk
www.sbi.dk

Der gøres opmærksom på, at denne publikation er omfattet af ophavsretsloven

Indhold

Indhold.....	3
Forord.....	4
Hovedkonklusioner.....	5
Indledning.....	7
Formål.....	8
Laboratorieforsøg.....	9
Metode.....	9
Forsøgsforhold.....	9
Forsøgskammer.....	10
Målinger.....	11
Resultater.....	12
Betydning af CCT for termisk oplevelse.....	12
Potentiale for energibesparelse.....	13
Betydning af en belysningsstyrke på 500 lux.....	14
Effekt af lys fra computerskærme.....	14
Effekt af forsøgspersonernes alder.....	15
Effekt af eksponeringens varighed.....	16
Felt forsøg.....	18
Lokaler og forsøgspersoner.....	18
Forsøgsmetode.....	19
Resultater.....	20
Diskussion.....	29
Referencer.....	32
Figurliste.....	33

Forord

Projektets formål var at vise, om man ved brug af regulerbart LED lys i en bygning kan udvide det temperaturinterval, som brugere af bygningen opfatter som komfortabelt. Projektet bygger på tidligere forskningsresultater om farvet lys og vil kunne føre til en reduktion af bygningers varmekonsum om vinteren samt reduceret køling om sommeren.

Tidligere undersøgelser viser potentiale for brug af farvet lys til at påvirke oplevelsen af termisk komfort, hvor en varm farvetemperatur af lyset medfører en oplevelse af varmere omgivelser end ved en kold farvetemperatur af lyset.

Denne slutrapport omhandler PSO-projekt nr. 348-030 og er støttet af EL-FORSK under Dansk Energi. Projektet er gennemført i tidsrummet 2. kvartal 2016 til 4. kvartal 2018. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet København (SBI - AAU) har været projektleder og andre projektdeltagere er Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Byggeri og Anlæg (DTU - Byg) og Institut for Fotonik (DTU - Fotonik).

Slutrapporten her giver et overblik over laboratorieforsøg udført på DTU - Byg og feltforsøg udført på DTU - Fotonik i samarbejde med SBI – AAU og DTU – Byg. Begge forsøg indebærer brug af varmt - og koldt regulerbart hvidt lys fra den elektriske belysning, en belysningstype der er under udbredelse og allerede ses installeret i kontorer samt i dele af sundhedssektoren i Danmark. Til sidst i rapporten sættes resultaterne i perspektiv til nuværende viden på området.

Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet Afdelingen for Bygningers Energieffektivitet, Indeklima og Bæredygtighed

Søren Aggerholm
Forskningschef

Hovedkonklusioner

En effekt af lysets farve på den oplevede temperatur ser ud til at eksistere [2], [3]. I dette projekt undersøgte om en lignende effekt også findes ved brug af regulerbart koldt og varmt elektrisk hvidt lys, som allerede er installeret i flere kontorer og dele af sundhedssektoren i Danmark.

Projektets formål var at undersøge potentialet for at reducere energiforbruget til opvarmning og køling i bygninger ved at udnytte en evt. sammenhæng mellem den oplevede temperatur og farvetemperaturen af den elektriske belysning i et rum.

Først blev sammenhængen mellem oplevet temperatur og lysets farveegenskaber testet uden dagslys i laboratorieomgivelser på DTU – Byg. Forsøgets hypotese var, at der ved særligt kølige eller varme temperaturer var potentiale for, at lysets farveegenskaber influerede temperaturoplevelsen. Denne hypotese blev afvist, men til gengæld viste resultater tæt på komforttemperaturen 22°C en tendens til at omgivelsestemperaturen opleves køligere ved højere farvetemperatur end ved lavere farvetemperatur. Forsøget foregik ved et højt lysniveau, 1000 lx på arbejdsborde.

Næste skridt var et parallelt forløb med laboratorieforsøg og feltforsøg. Laboratorieforsøgene fokuserede på yderligere at undersøge effekten fundet ved de 22°C og feltforsøgene havde som formål at undersøge sammenhæng mellem oplevet temperatur og lysets farvetemperatur i et almindeligt anvendt kontormiljø på DTU – Fotonik, Risø campus.

De nye laboratorieforsøg fokuserede på udelukkende at udforske effekten af farvetemperatur på oplevet temperatur ved 22°C og 24,5°C. Forsøgene blev afviklet med 500 lx på arbejdsborde. Her viste det sig, at der efter skift af lysets farvetemperatur er tegn på, at denne har indflydelse på den oplevede temperatur, men efter en halv time i lokalet var der ingen effekt af farvetemperaturen på oplevet temperatur. Effekten kunne heller ikke registreres, når forsøgspersoner brugte computerskærm eller hos forsøgspersoner over 30 år.

Feltundersøgelserne havde til formål at teste, hvorvidt effekten fundet i de første laboratorieforsøg også eksisterede i et almindeligt kontormiljø og med omskiftelige omgivelser. Feltundersøgelserne foregik på Risø DTU Fotonik i kontorer med dagslys. Lysarmaturerne i kontorerne var med programmerbar farvetemperaturer og blev indstillet til 3 niveauer på hhv. 3200 K, 3600K og 4600K, dækkende deres maksimum spænd. Belysningsstyrken på arbejdsområdet fra den elektriske belysning blev programmeret til at være éns for de 3 farvetemperaturer. Målte belysningsstyrker varierede mellem 373 – 573 lx under forsøget. Feltundersøgelserne viste ikke en sammenhæng mellem lysets farvetemperatur og oplevet temperatur.

Baseret på vores undersøgelser ser der således ud til at være en effekt af lysets farvetemperatur på den oplevede temperatur i lokaler uden dagslys og ved 22°C. Effekten ser ud til at forsvinde efter 30 minutters tilvænning til omgivelserne.

Resultaterne peger på, at hvidt lys under almindelige forhold ikke er nok til at påvirke oplevet temperatur væsentligt og at der derfor kræves lys, der er mere farvemættet eller som ikke er påvirket af dagslyset. Effekten af farvetemperatur lader til at være negligerbar efter en halv times tilvænning.

Indledning

Farvemætnings-varme hypotesen (Hue-Heat) foreslår en sammenhæng mellem varme og kolde farver og menneskers oplevelse af temperatur. At man fx kan male eller bruge farvet lys på overflader i et rum for at få det til at føles varmere eller køligere.

Europa fordeles groft sagt i to grupper af lysfarvepræferencer. Nordpå er der en tendens til at bruge varme lysfarver mens kolde lysfarver anvendes mere sydpå. I lysbranchen er den generelle opfattelse, at i den nordlige del af Europa bruges der varmere lys på grund af den lave temperatur og sydpå bruges der koldt lys for at køle sig ned i varmen.

Vi har valgt at undersøge om farvetoner af hvidt lys hænger sammen med menneskers oplevelse af temperatur for at undersøge muligheden for at nedbringe energiforbrug til opvarmning om vinteren og køling om sommeren.

Formål

To væsentlige drivkræfter ligger bag dette projekt. For det første havde vi en nysgerrighed omkring det faktum, at der i nordligt beliggende lande er en tendens til at bruge lys med varme nuancer modsat anvendelsen af køligere nuancer i Sydeuropa; for det andet havde vi en hypotese om, at dette kunne udnyttes til energisparende formål. Denne fælles interesse bragte projektdeltagerne til at undersøge emnet nærmere.

Projektets formål var at undersøge potentialet for at sænke energiforbruget til opvarmning og køling i bygninger via en sammenhæng mellem oplevet temperatur og farvetemperatur af den elektriske belysning i bygninger.

Vi vurderede at der lå et energi-spare potentiale på op mod 10 % til opvarmning om vinteren. Energibesparelsen blev baseret på beregninger ved brug af varmepumpeteknologi og en udvidelse af det komfortable temperaturinterval på ± 1 grad celsius.

Laboratorieforsøg

Laboratorieforsøgenes formål var at undersøge

- Om det komfortable temperaturinterval i bygninger kan udvides ved at regulere farvetemperaturen af hvidt LED lys og hvis, så at kvantificere sammenhængen mellem den korrelerede farvetemperatur og menneskers oplevelse af termisk komfort
- Om en potentiel effekt af korreleret farvetemperatur på termisk komfort bevares også ved anvendelse af computerskærme
- Om en potentiel effekt af korreleret farvetemperatur på termisk komfort bevares over længere tids eksponering
- Om en potentiel effekt af korreleret farvetemperatur på termisk komfort er den samme for yngre som for ældre personer
- Potentialet for energibesparelser ved trade-off mellem justerbart LED lys og temperaturindstillinger for opvarmning og køling

Metode

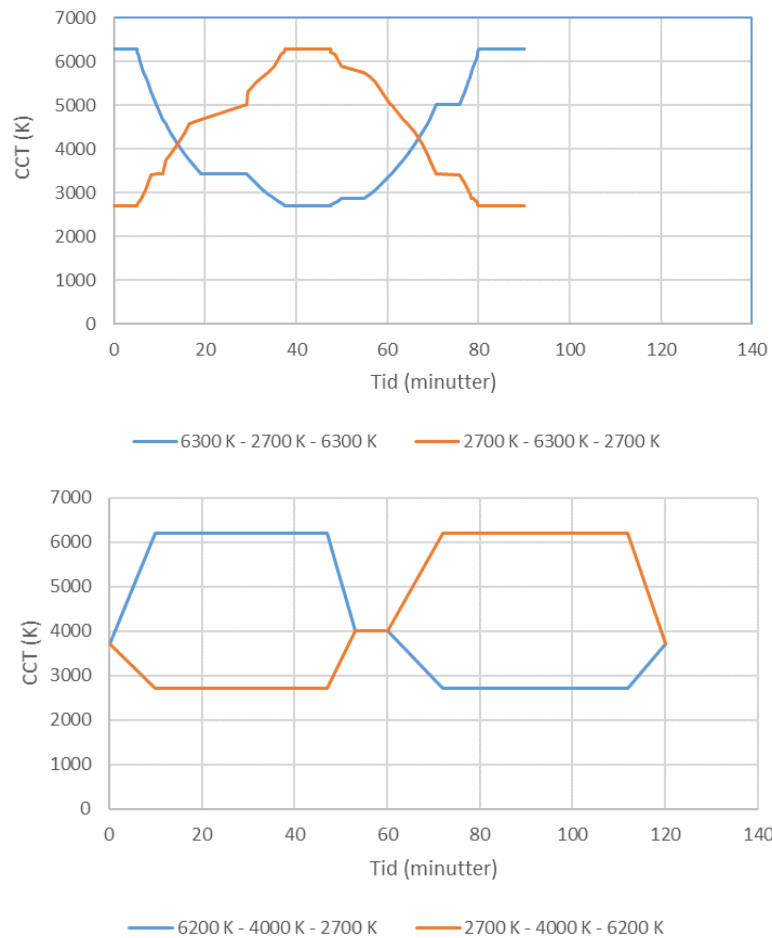
Forsøgsforhold

Ved en række forsøg i et simuleret, kontorlignende miljø i et klimakammer blev forsøgspersoners perceptuelle og fysiologiske respons undersøgt ved eksponering for korrelerede farvetemperaturer (CCT) i intervallet fra ca. 2700 K til 6300 K og i temperaturer fra 19 °C til 22 °C. Der gennemførtes to runder af forsøg: a) med temperaturer på kanten af og i midten af komfortintervallet og med en høj belysningsstyrke; b) supplerende forsøg, hvor forsøgspersonerne anvendte computere, aldersvariationen mellem forsøgspersonerne var større og eksponeringstiden forlænget. Tabel 1 viser den samlede forsøgsmatrix og Figur 1 viser, hvorledes CCT blev varieret gennem forsøgsperioden i første og anden runde af forsøg. I det enkelte forsøg blev temperaturen holdt konstant og kun CCT varierede.

Tabel 1 Forsøgsmatrix. Bortset fra temperatur og lysstyrke indikerer tallene antallet af deltagende forsøgspersoner.

Temperatur [°C]	Belysningsstyrke på bord [lux]	Sammenhæng mellem farvetemperatur og termisk komfort	Computerskærme	Længere eksponering	Alder > 30
19 ^a	1000	43			
22 ^a	1000	23			
22 ^b	500	35	14	35	9
24.5 ^b	500	34		34	
27 ^a	1000	43			

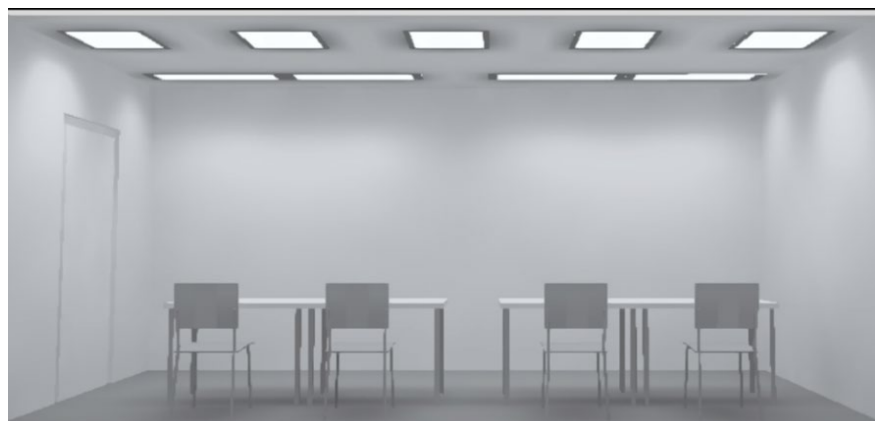
a indikerer første runde af forsøg og b anden runde.



Figur 1 Variation af CCT i løbet af forsøgsrunderne i klimakammer. Øverst sekvensen anvendt i første runde (a) og nederst i anden runde (b) af forsøg (svarende til a og b i Tabel 1).

Forsøgskammer

Forsøgene blev gennemført i et lokale uden dagslysadgang. Lokalet blev oplyst af ni lysarmaturer monteret i det nedhængte loft som vist i Figur 2. Fem af armaturerne var kvadratiske og anvendt til at belyse forsøgspersonernes siddeområde, mens de fire rektangulære armaturer fortrinsvis belyste væggen foran forsøgspersonerne. Armaturerne indeholdt koldt-hvide og varmt-hvide LED'er, der separat kunne dæmpes for at opnå den ønskede CCT. Opbygning af lokalet blev en del af to studerendes afsluttende bachelor projekt [4].



Figur 2 Forsøgskammer med lyskilder i det nedhængte loft og forsøgspersonernes arbejdsstationer.

Målinger

Forsøgspersonerne blev regelmæssigt bedt om at udfylde et spørgeskema bestående af 19 spørgsmål om deres oplevelse af det termiske, atmosfæriske, visuelle og akustiske indeklima. Derudover blev deres mentale præstationsevne evalueret via små opgaver. Når de ikke udfyldte spørgeskemaer eller præstationstests, havde forsøgspersonerne mulighed for at læse avis eller udfylde sudoku, men bortset fra forsøg med computere, måtte de ikke anvende telefon eller computer. Dette var for at minimere påvirkning fra andre lyskilder end LED belysningen.

Før, under og efter et forsøg målt forskellige indeklimaparametre, inklusive spektralfordeling og CCT af lyset. Desuden blev operativ temperatur, luftfugtighed, lufthastighed og CO₂ koncentration løbende målt.

Figur 3 viser forsøgspersoner i klimakammeret ved den laveste CCT på ca. 2750 K og ved den højeste CCT på ca. 6200 K. For at tilpasse forsøgspersonernes beklædningsisolans til enten vinter (1 clo) eller sommer (0.5 clo) blev de instrueret i, hvilke beklædningsgenstande de skulle møde op i til de forskellige forsøg.



Figur 3 Forsøgspersoner i kammeret ved ca. 2750 K (øverst) og ca. 6200 K (nederst).

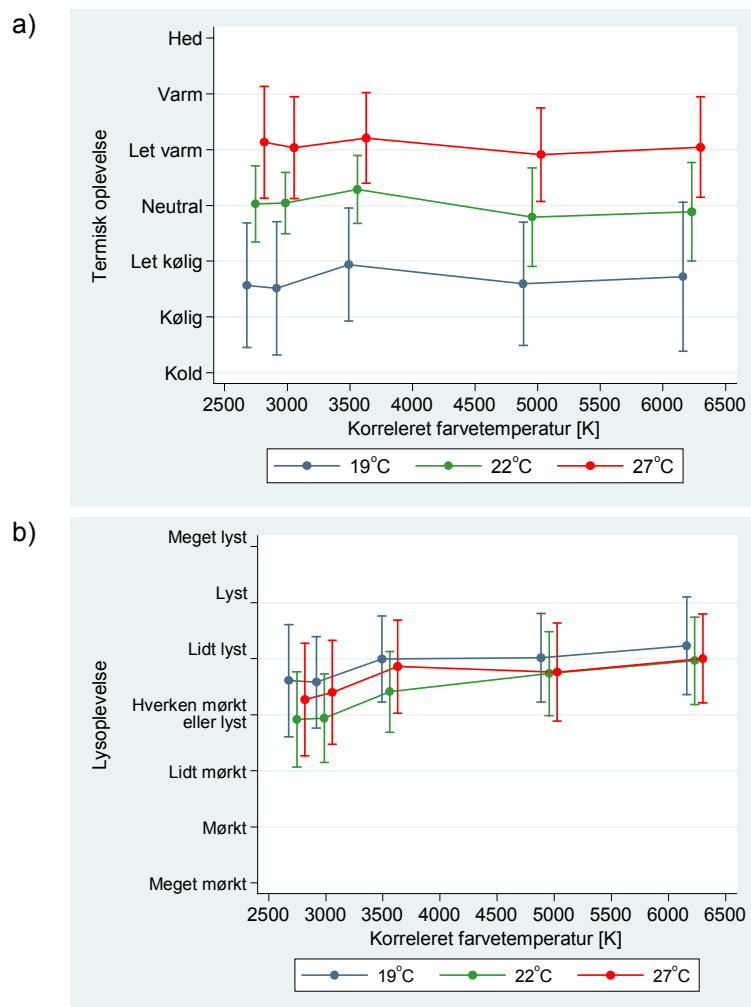
Resultater

Betydning af CCT for termisk oplevelse

Figur 4 viser sammenhængen mellem CCT og oplevet termisk fornemmelse bedømt på en syv-punktsskala gående fra Kold til Hed (venstre) samt mellem CCT og lysoplevelsen på en syvpunktsskala fra Meget mørkt til Meget lyst (højre). Selvom det ikke fremgår tydeligt af Figur 4 var der ved 22 °C, hvor forsøgspersonerne var tættest på termisk neutralitet, en signifikant sammenhæng mellem CCT og den termiske oplevelse. Endvidere var der en signifikant sammenhæng mellem køn, CCT og termisk oplevelse, hvilket betød, at kvinder reagerede kraftigere på ændringer i CCT. Ved 19 °C og 27 °C, hvor forsøgspersonerne i gennemsnit følte omgivelserne som let kølige eller let varme var der ingen effekt af CCT på forsøgspersonernes termiske oplevelse. Den termiske oplevelse blev således påvirket af CCT, men kun i et temperaturområde, hvor forsøgspersonerne var tæt på termisk neutralitet. Det er derfor ikke sandsynligt, at det acceptable temperaturinterval i bygninger kan udvides via regulering af farvetemperaturen af hvidt LED lys, da grænserne for intervallet svarer til omkring let kølig eller let varm, hvor CCT ikke påvirkede den termiske oplevelse.

Foruden ændringer i den termiske oplevelse syntes forsøgspersonerne, at lyset var stærkere ved de høje og blålige farvetemperaturer, selvom belysningsstyrken blev holdt konstant. Resultatet indikerer således, at man ved høj CCT har mulighed for at sænke belysningsintensiteten i forhold til ved lavere og varmere farvetemperaturer, og derved opnå samme rapporterede oplevelse af lysstyrken.

Forsøgsresultaterne viste desuden, at forsøgspersonerne fandt luften i rummet mere frisk i de høje og kølige farvetemperaturer, selvom den faktiske luftkvalitet i rummet var den samme under alle forsøg. Der var ikke sammenhæng mellem CCT og præstationsevne.



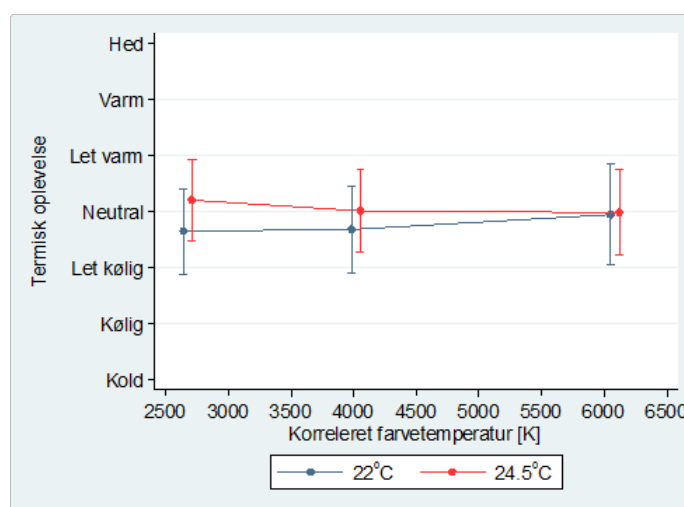
Figur 4 Sammenhæng mellem CCT og termisk oplevelse (a) og mellem CCT og lysoplevelse (b) ved 1000 lux. Værdier er middel ± standardafvigelse.

Potentiale for energibesparelse

Ændring af CCT fra 2700 K til 6200 K ved komforttemperaturen 22 °C resulterede i, at forsøgspersonernes termiske oplevelse ændredes i negativ retning (mod koldere) med 0.35 skalaenheder (Figur 4 a). Dette svarede til en ækvivalent temperaturforskel på 1.7 °C med en typisk vinterbeklædning og ved et stillesiddende aktivitetsniveau. For at kvantificere en potentiel energibesparelse ved at stimulere den termiske oplevelse via farvetemperatur, udførtes en energi- og indeklimasimulering af et rum i en typisk dansk kontorbygning med en referenceindstilling for varmesystemet på 22 °C ved en middel farvetemperatur på 4500 K. Ved at ændre temperaturindstillingen til 21.2°C ved 2700 K og således gennem farvetemperaturen opretholde en uændret, neutral termisk oplevelse, kunne der opnås en energibesparelse på 8%, når bygningen var placeret i en tempereret klimazone svarende til den danske. Dog vil der i praksis både være dagslys, computerskærme og en bredere farvesammensætning på lokalets overflader, hvilket vil betyde, at den potentielle besparelse ved at anvende LED lys til at påvirke menneskers termiske oplevelse vil være mindre.

Betydning af en belysningsstyrke på 500 lux

I modsætning til den høje belysningsstyrke på 1000 lux, der blev anvendt i første runde af forsøgene, vil en belysningsstyrke på omkring 500 lux være mere almindelig at forefinde i typiske danske kontormiljøer. Der blev derfor gennemført endnu en forsøgsrække i klimakamrene ved en neutral sommer-temperatur på 24.5 °C og en neutral vintertemperatur på 22 °C med 500 lux på bordene. CCT blev varieret som vist i Figur 1 (højre). Figur 5 viser sammenhængen mellem CCT og termisk oplevelse ved de to temperaturniveauer. Der var ikke en signifikant sammenhæng mellem CCT og termisk oplevelse. Dette kan skyldes den halverede belysningsstyrke i forhold til første runde af forsøg og at farvetemperaturen således ikke påvirkede forsøgspersonerne lige kraftigt. Alternativt at den indledende tilvænningsperiode var for kort til at eliminere effekten af residualvarme efter at forsøgspersonerne havde transporteret sig til laboratoriet. Dette vil blive uddybet i afsnittet "Effekt af eksponeringens varighed".



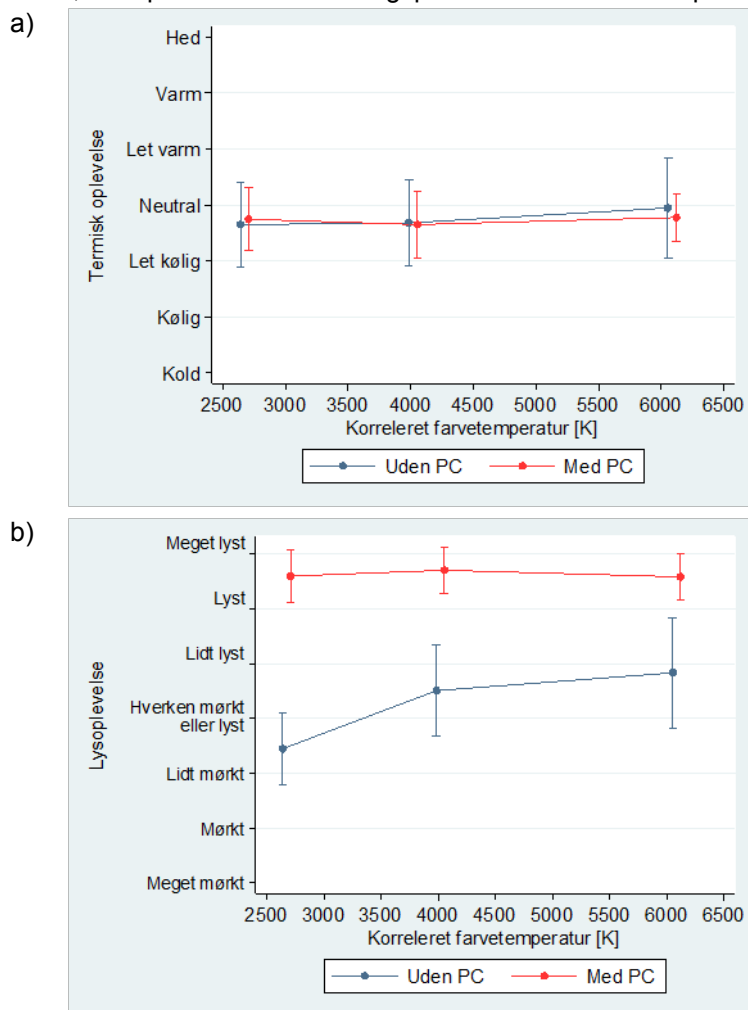
Figur 5 Sammenhæng mellem CCT og termisk oplevelse ved 500 lux. Værdier er middel ± standardafvigelse.

Effekt af lys fra computerskærme

Forsøgskammeret var klinisk indrettet med hvide vægge og intet dagslys eller andre forstyrrende faktorer, der kunne påvirke forsøgspersonernes oplevelse af lysets farvetemperatur. Endvidere udfyldte forsøgspersonerne spørgeskemaer og præstationstest på tonet papir (brækket hvid) for at undgå en påvirkning af deres synsindtryk. For at undersøge betydningen af arbejde ved en computerskærm for sammenhængen mellem farvetemperatur og termisk oplevelse gennemførtes en forsøgsrække, hvor papirspørgeskemaerne var erstattet af et elektronisk spørgeskema, der blev udfyldt på en PC. Der blev anvendt fire identiske computerskærme med samme lysstyrke- og farveindstillinger.

Figur 6 viser sammenhængen mellem CCT og termisk oplevelse og mellem CCT og lysoplevelse henholdsvis med og uden en computerskærm. Den termiske middelvotering var uafhængig af CCT og stort set identisk både med og uden skærm, men spredningen på voteringen virkede større med computerskærm. Dette kan skyldes at færre forsøgspersoner deltog i forsøgene med computerskærme (se oversigt i Tabel 1).

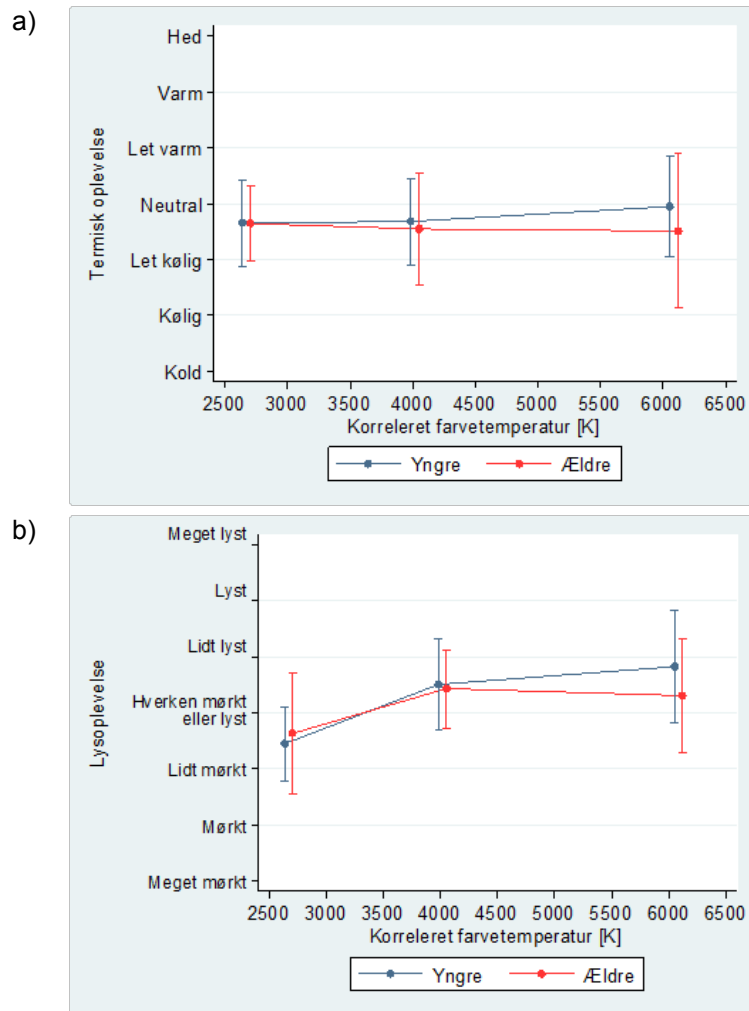
Lyset blev generelt oplevet som meget lyst med en computerskærm, uafhængigt af CCT. Uden computerskærm blev lyset oplevet som mere lyst med stigende CCT. Anvendelse af computer dominerede således synsoplevelsen, men påvirkede ikke forsøgspersonernes termiske oplevelse.



Figur 6 Sammenhæng mellem CCT og termisk oplevelse (a) og mellem CCT og lysoplevelse (b) med og uden anvendelse af computerskærm. Temperaturen i forsøgskammeret var 22 °C og belysningsstyrken var 500 lux på bordoverfladen. Værdier er middel ± standardafvigelse.

Effekt af forsøgspersonernes alder

Hovedparten af forsøgene blev gennemført med studerende med en gennemsnitsalder på 24 år (± 2.7 år). Synet ændrer karakter med alderen og for at undersøge om alder påvirkede sammenhængen mellem CCT og termisk oplevelse blev der gennemført et forsøg med en anden gruppe af forsøgspersoner med en gennemsnitsalder på 43.6 år (± 9.2 år). Figur 7 sammenligner sammenhængen mellem CCT og den termiske oplevelse (a) og mellem CCT og synsoplevelsen (b) mellem yngre og ældre forsøgspersoner. Der var ikke signifikant forskel på den termiske oplevelse mellem de to grupper, men Figur 7 (b) indikerer, at det var sværere for de ældre forsøgspersoner at skelne en forskel i CCT, når CCT var højere end 4000 K.



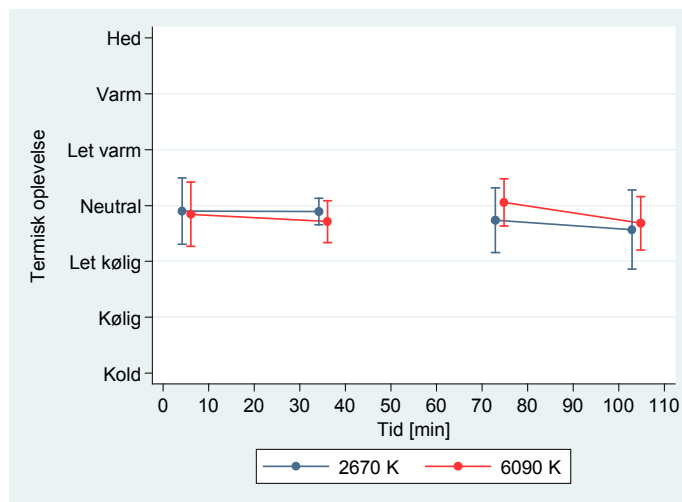
Figur 7 Sammenhæng mellem CCT og termisk oplevelse (a) og mellem CCT og lysoplevelse (b) for ældre og yngre forsøgspersoner. Temperaturen i forsøgsrummet var 22°C og belysningsstyrken var 500 lux på bordoverfladen. Værdier er middel ± standardafvigelse.

Effekt af eksponeringens varighed

Der var en signifikant sammenhæng mellem CCT og termisk oplevelse ved 22°C i første runde af forsøg, der blev gennemført med en belysningsstyrke på 1000 lux. Almindeligvis afhænger den termiske oplevelse af kroppens varmebalance, men resultatet indikerer, at visuelle stimuli nær termisk neutralitet også kan have en lille betydning. For at undersøge om effekten af CCT opretholdes over en længere periode blev forsøgene i anden runde forsøg udført med konstant eksponering over to perioder på 30 min i starten og slutningen af forsøgsperioden (fra 7 til 37 min og igen fra 72 til 102 min – Figur 1 nederst). Figur 8 viser forsøgspersonernes termiske oplevelse ved start og slut af disse perioder ved laveste og højeste CCT. Figuren indikerer, at den termiske oplevelse aftog med tiden på trods af at temperatur, CCT, beklædningsisolans og aktivitet ikke blev varieret. Figuren indikerer også en svag tendens til at den termiske oplevelse aftog marginalt mere med en CCT på 6090 K, selvom dette ikke var signifikant.

Det er generelt en udfordring ved indeklimaforsøg med fokus på termisk komfort, at forsøgspersonernes termiske oplevelse ikke er konstant i en periode efter ankomst til laboratoriet. Dette skyldes især residualvarme i krop-

pen som kan følge af transport på cykel eller i gang umiddelbart før ankomst. Der var derfor i alle forsøg indlagt en tilvænningsperiode på 30 min forud for den egentlige forsøgsperiode, hvor forsøgspersonerne opholdt sig i et lokale, der stødte op til forsøgslokalet. Temperatur og CCT var neutrale i dette lokale. Fuldstændig eliminering af effekten af residualvarme vil kræve op til flere timers tilvæning, hvilket ikke var muligt inden for rammerne af dette projekt. Påvirkningen af den termiske oplevelse via farvetemperaturen kan således både blive forstærket og reduceret, afhængigt retningen af en ændring i CCT. På baggrund af disse forsøg er det således ikke muligt at afgøre om den (begrænsede) effekt af CCT på termisk oplevelse faktisk bevarer i længere tid eller om det er et kortvarigt fænomen. Resultaterne af laboratorieforsøgene er blevet offentliggjort i det videnskabelige tidsskrift *Building & Environment* [5] og ved konferencen *Indoor Air 2018* [6].



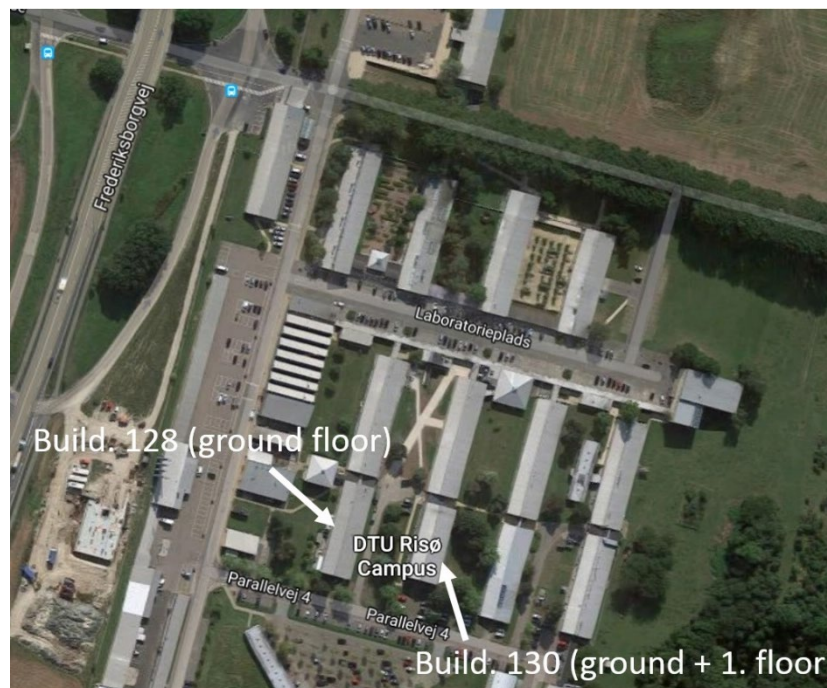
Figur 8 Sammenhæng mellem CCT og termisk oplevelse efter 30 min uændret eksponering ved højeste og laveste CCT. Temperaturen i forsøgsrummet var 22°C og belysningsstyrken var 500 lux på bordoverfladen. Værdier er middel \pm standardafvigelse.

Felt forsøg

Det primære formål med feltforsøget var at undersøge om lysets farvetemperatur påvirker oplevelsen af det termiske indeklima i realistiske omgivelser som fx kontorer, hvor der er et dagslysbidrag. Et sekundært formål var at undersøge om lysets farvetemperatur påvirker andre parametre af det visuelle indeklima. En forudsætning for at effekterne kunne testes i felten var at finde en arbejdsplads som allerede var installeret med lysarmaturer som kunne programmeres til at skifte farvetemperatur samtidigt med mulighed for at kunne indstille til en konstant belysningsstyrke.

To studerende på DTU Byg, Simone Laura Winter-Madsen og Nicolai Nørre-kær Mortensen, deltog i udførelsen af forsøgene som en del af deres bachelor projekt og dokumenterede målinger i deres rapport [4]. Efterfølgende beskrivelse er et resume af feltforsøgene, og der henvises til rapporten for nærmere detaljer.

Lokaler og forsøgspersoner



Figur 9 Bygningerne 128 og 130 på DTU Risø campus

Forsøget blev udført på DTU Fotonik i Risø, Frederiksborgvej 399, 4000 Roskilde. To kontorbygninger hhv. nummer 128 (stue-etagen) og 130 (stue- og 1. etage) (se Figur 9), blev udvalgt til deltagelse i forsøget på grund af det installerede lyssystem. Største delen af kontorerne var enkelt og to-mandskontorer (se eksempel fra bygning 130 på Figur 10). Fire storrums-kontorer med op til fem personer var inkluderet i forsøget (se Figur 11).

I de to kontorbygninger som var udvalgt til forsøget blev der udpejet 40 kontorer med i alt 48 medarbejdere som fungerede som frivillige forsøgspersoner. Deltagere i forsøget var således fordelt på 3 afdelinger og bestod af forskere og laboratoriepersonale som arbejder med lysets mange anvendelsesmuligheder samt uddannelse i Netværksteknologi, Fotonik og Telekommunikation. Forsøgspersonerne var derfor fagpersoner inden for lys og lys-relateret teknologi. Forsøgspersonernes gennemsnits alder var 40,4 år, med standard afvigelsen 10,3 år, den yngste forsøgsperson var 28 år og den ældste 72 år. Af de 48 medarbejdere var der seks som oplyste at være kvinder og en mand som oplyste at han var farveblind.



Figur 10 Eksempel på et typisk enkeltmandskontor som indgik i forsøget



Figur 11 Eksempel på et typisk storrumskontor som indgik i forsøget

Lysarmaturerne installeret i kontorerne er I-NO Daylight Monolith6060+ fra Spectra Nord. Ifølge databladet er den maksimale lysstrøm 3650 lm, farvetemperaturmuligheder 2700 K til 4000 K og farvegengivelsen på 95. Lysarmaturerne kan ses i Figur 11, hvor de er indstillet til at levere en lav farvetemperatur. Målinger udført efter installation viser et farvetemperatur interval som ligger på 3200 K til 4600 K.

Luft-temperaturen på kontorene kunne forsøgspersoner selv styre ved at åbne/lukke vinduer og ved at justere på radiatoren.

Forsøgsmetode

Til selve forsøget var lyssystemet programmeret til at kunne indstilles til tre forskellige farvetemperaturer, en høj (4600 K), middel (3600 K) og lav (3200 K). Belysningsstyrken var indstillet til at levere den maksimale, men stadig så vidt muligt ens belysningsstyrke for de forskellige farvetemperaturer. Samme indstilling blev anvendt på alle 3 afdelinger og resulterede reelt i lidt forskellige belysningsstyrker i lokalene på tværs af farvetemperatur indstillingerne.

Forsøget varede i 7 uger, med start i primo januar 2018, hvor den elektriske belysning blev indstillet til hver uge at skifte mellem at alle afdelinger havde middel (ens) farvetemperatur og til at afdelingerne hhv. havde lav, middel og høj farvetemperatur.

Tabel 2 Forsøgs rækkefølge med indstillinger af CCT, hvor H = 4600 K, M = 3600 K og L = 3200 K

Uge	Afd. 1	Afd. 2	Afd. 3
1	M	M	M
2	L	M	H
3	M	M	M
4	H	L	M
5	M	M	M
6	M	H	L
7	M	M	M

Indeklima loggere blev placeret i 29 (storrumskontorerne) af i alt 40 kontorer og data som temperatur, CO₂ koncentration og den relative luftfugtighed blev kontinuerligt målt hver femte minut. Forsøgspersonerne evaluerede indeklimaet og en halv time før evalueringen blev et gennemsnit af alle målinger registreret.

Dagslyset blev tilsvarende registreret ved brug af en vejrstation placeret på taget af en af bygningerne hvor forsøget foregik.

Det oplevede indeklima blev evalueret ved hjælp af spørgeskemaer, der blev sendt ud onsdag i alle syv uger. Forsøgspersoner blev bedt om at svare i løbet af arbejdsdagen imens de opholdt sig på deres kontorer.

Spørgeskemaet i sin helhed kan ses i [7] spørgsmålene blev stillet på engelsk og de omfatter efterfølgende:

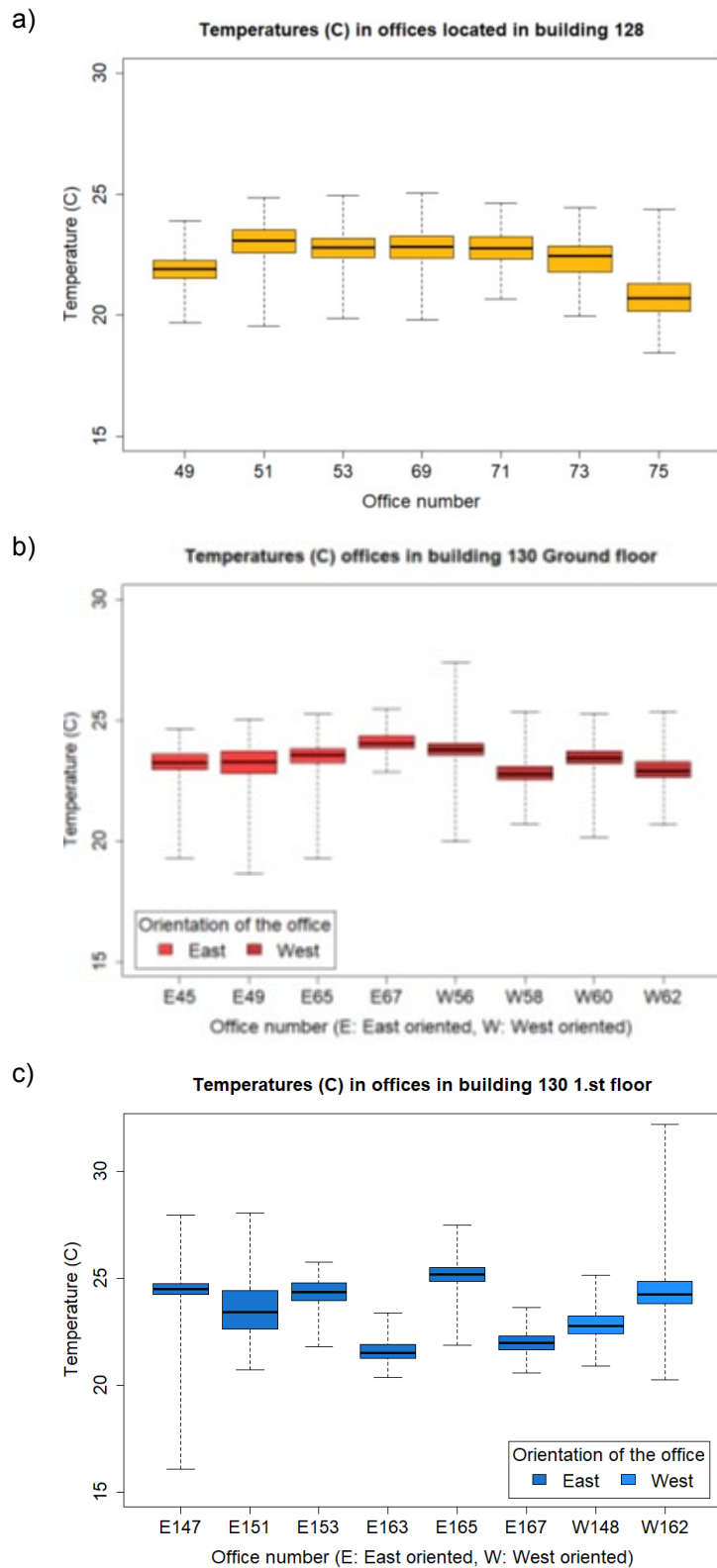
- Hvordan har du det på nuværende tidspunkt
 - Svarmuligheder: 7 point skala fra koldt til varmt
- Hvad er din præference for rum temperaturen?
 - Svarmuligheder: 7 point skala fra meget køligere til meget varmere
- Hvad synes du om luftkvaliteten?
 - Svarmuligheder: 5 point skala fra frisk til tungt
- Hvad synes du om lyset i lokalet?
 - Svarmuligheder: 7 point skala fra meget lyst til meget mørkt
- Hvad er din præference for den elektriske belysning?
 - Svarmuligheder: 7 point skala fra meget mørkere til meget lysere

Yderligere blev de bedt om at tage stilling til om de vil kunne acceptere belysningen i rummet eller ej, om de oplever blænding fra dagslys, om de synes dagslyset bidrager mere til lyset i rummet end den elektriske belysning og om de vil synes det vil være for mørkt i rummet uden elektrisk belysning. De bliver også bedt om at svare om den elektriske belysning er tændt, eller ej.

Resultater

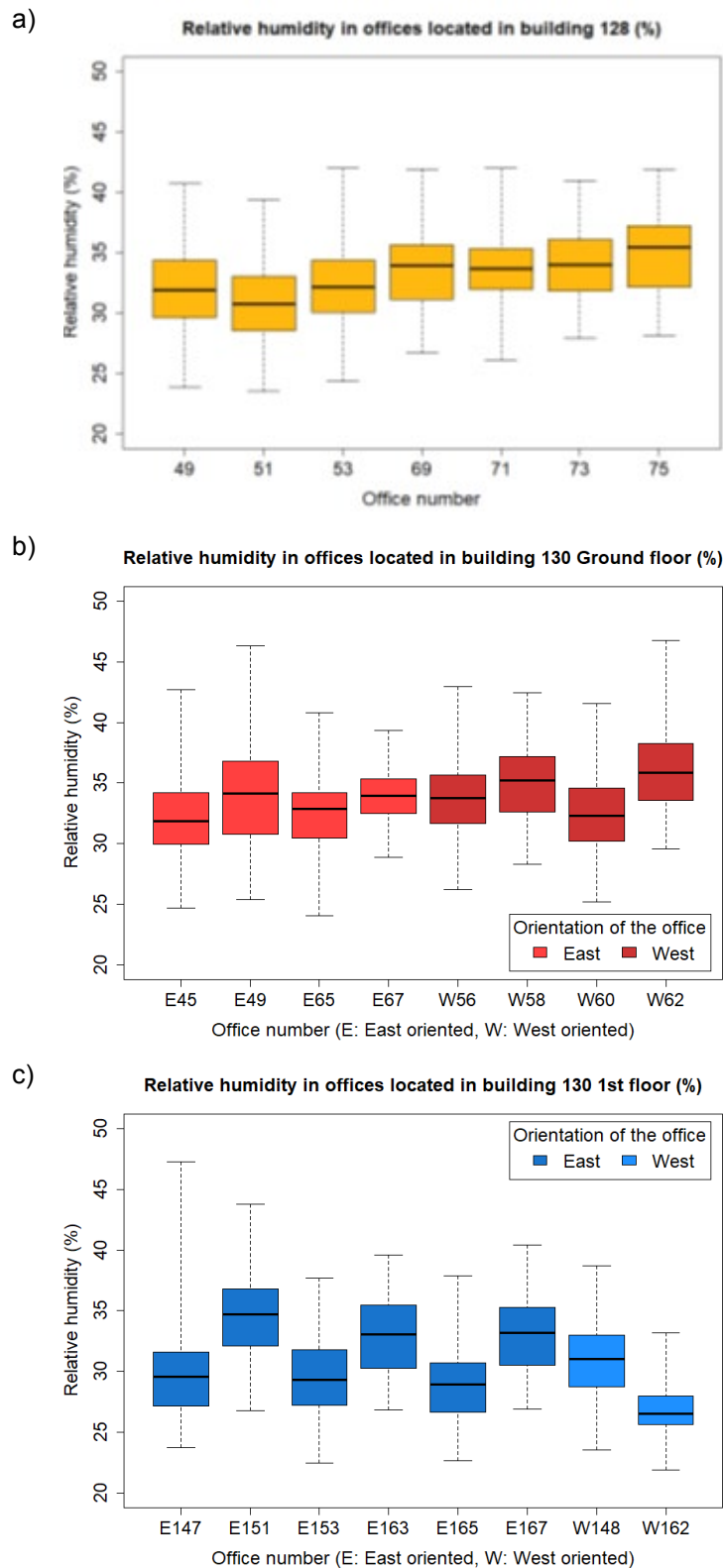
Temperaturmålingerne viser at forsøgspersonernes kontorer var indstillet til en median på 20°C til 25°C uafhængigt af kontor orientering.

Figur 12 a) til c) viser målinger i de enkelte lokaler i begge bygninger opdelt efter etage og orientering af vinduer.



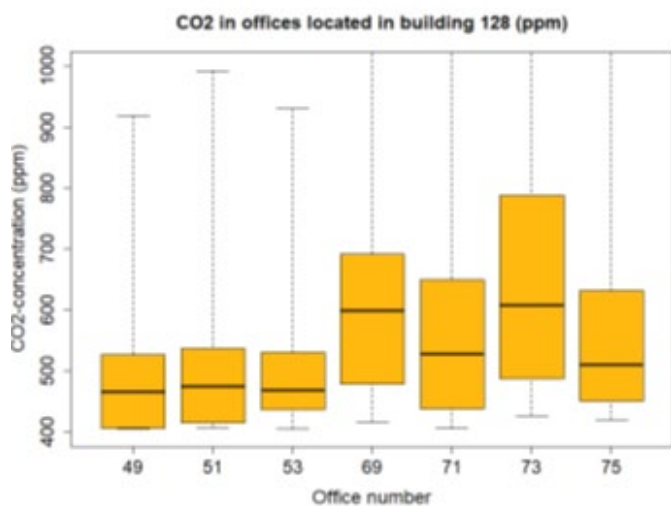
Figur 12 Målt temperatur i kontorer i bygning 128 (a), bygning 130 stueetage (b) og 130, 1. sal (c).

Relativ luftfugtighed lå hovedsagelig på 25% til 35% og CO₂ koncentrationen lå på 400 ppm til over 1000 ppm. Figur 13 a) til c) viser den relative fugtighed og Figur 14 a) til c) viser CO₂ koncentrationen i de enkelte lokaler i begge bygninger.

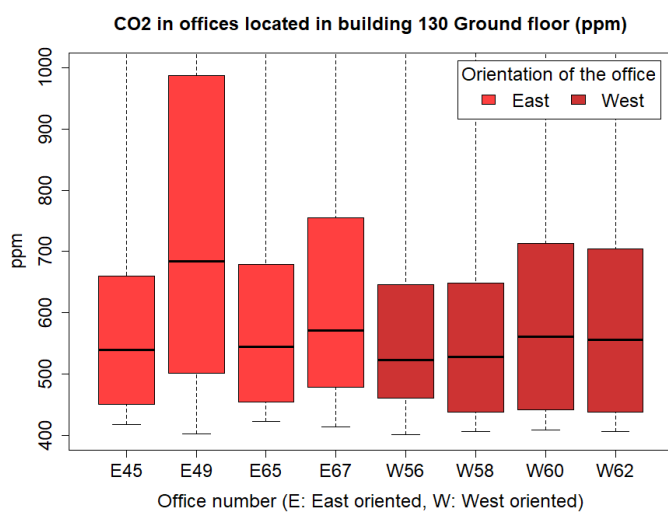


Figur 13 Målt relativ luftfugtighed i kontorer i bygning 128 (a), bygning 130 stueetage (b) og bygning 130 1. sal (c).

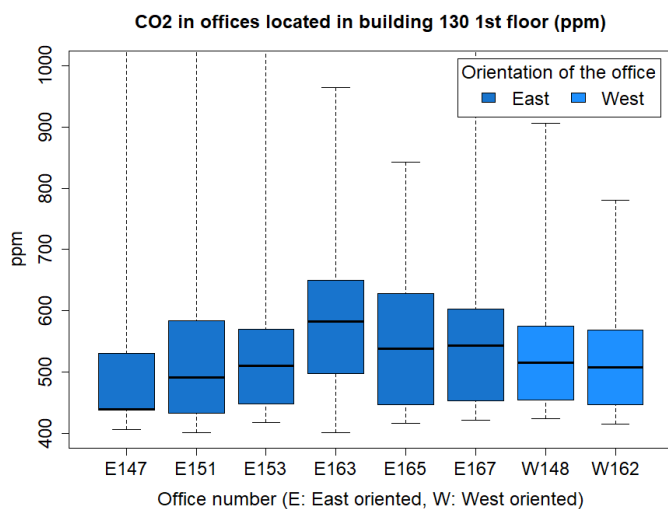
a)



b)

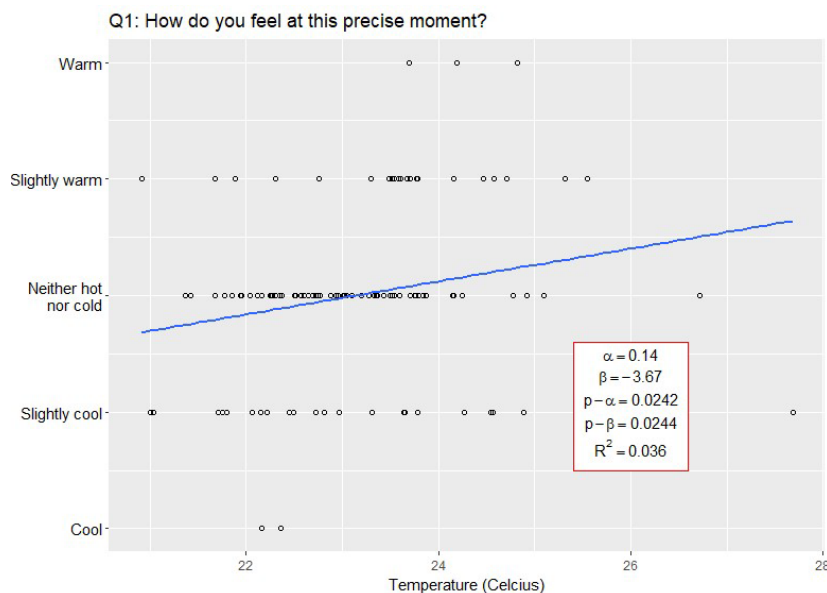


c)

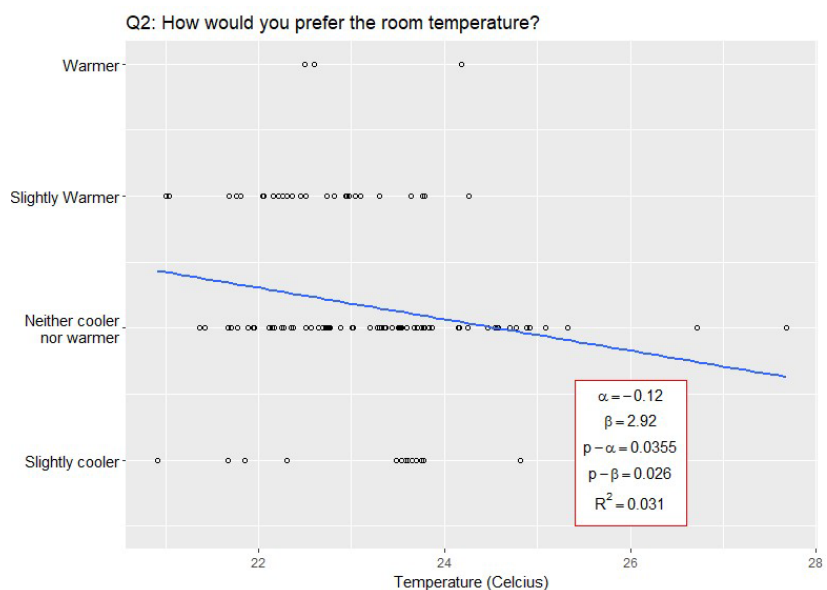


Figur 14 Målt CO₂ koncentration i kontorer i bygning 128 (a), bygning 130 stueetage (b) og bygning 130 1. sal (c).

Spørgeskemabesvarelserne viser, at der er sammenhæng mellem forsøgspersonernes oplevelse af temperaturen og målinger af rumtemperaturen. Den oplevede rumtemperatur blev vurderet højere når målinger viser en højere rumtemperatur (Figur 15) og testpersonerne ønsker en lavere rumtemperatur ved højere målinger af rumtemperaturen (Figur 16).



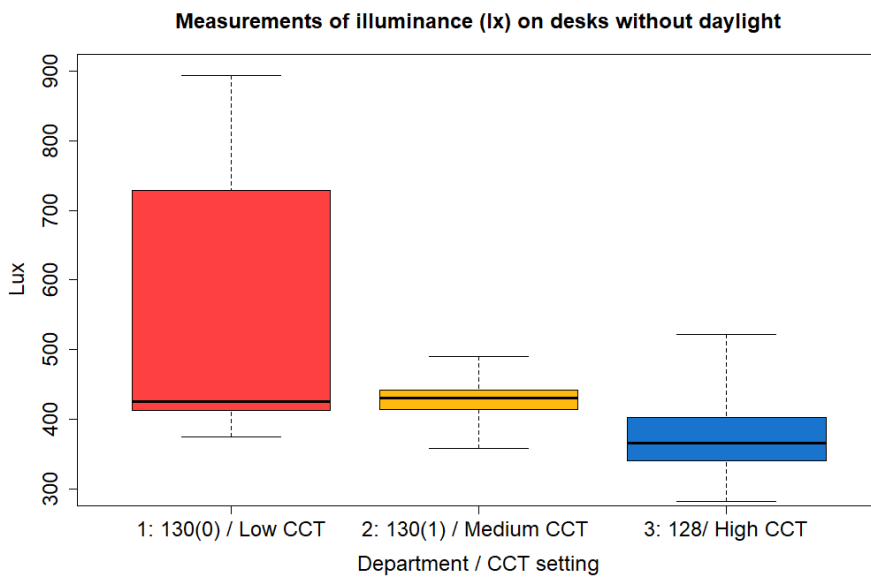
Figur 15 Svar til spørgsmål: Hvordan har du det på nuværende tidspunkt? Afhængigt af rumtemperatur



Figur 16 Svar til spørgsmål: Hvordan foretrækker du omgivelsestemperaturen? Afhængigt af rumtemperatur.

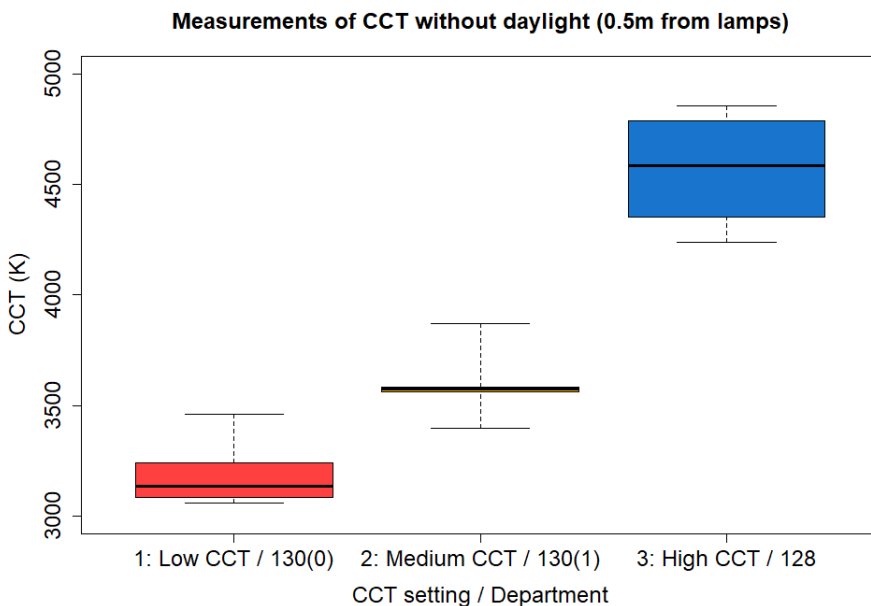
For at få så meget lys fra den elektriske belysning som muligt på arbejdsområdet var alle armaturer indstillet til den maksimale ens lysstrøm muligt for de enkelte farvetemperatur indstillinger. Samme indstilling blev anvendt på alle 3 afdelingers kontorer og gange og resulterede reelt i lidt forskellige belysningsstyrker i lokalene på tværs af farvetemperatur-indstillingerne. Dette skyldtes primært en forskel i loftshøjder, hvilket delvist afspejles i data (Figur 17 Belysningsstyrken på arbejdsområdet). I bygning 130 var median belysningsstyrken på bordet omkring 430 lx, men på grund af en højere lofthøjde i

bygning 128 var median belysningsstyrken fra den elektriske belysning på arbejdsområdet kun 370 lx (Figur 17)



Figur 17 Belysningsstyrken på arbejdsområdet

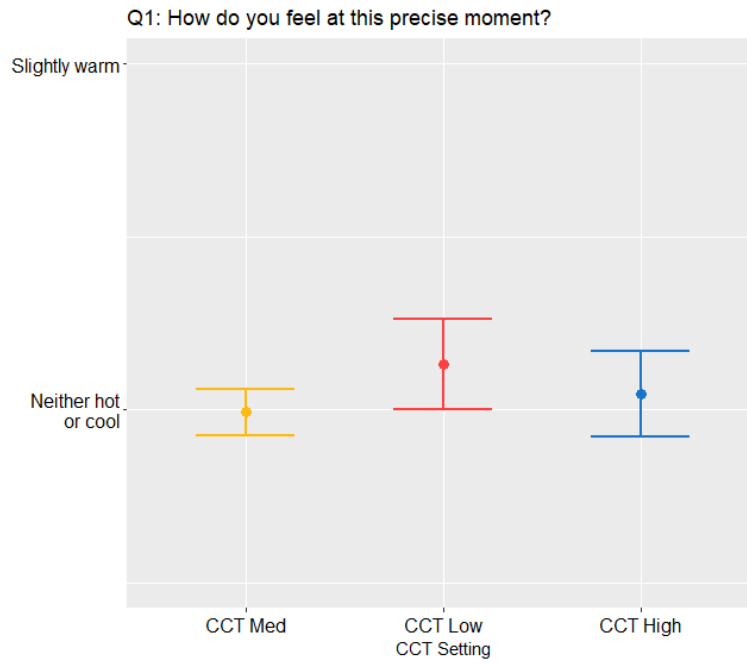
Lysarmaturernes farvetemperatur var kontrolleret med målinger som viser størst spredning i farvetemperatur i bygning 128 med den høje lofthøjde (Figur 18).



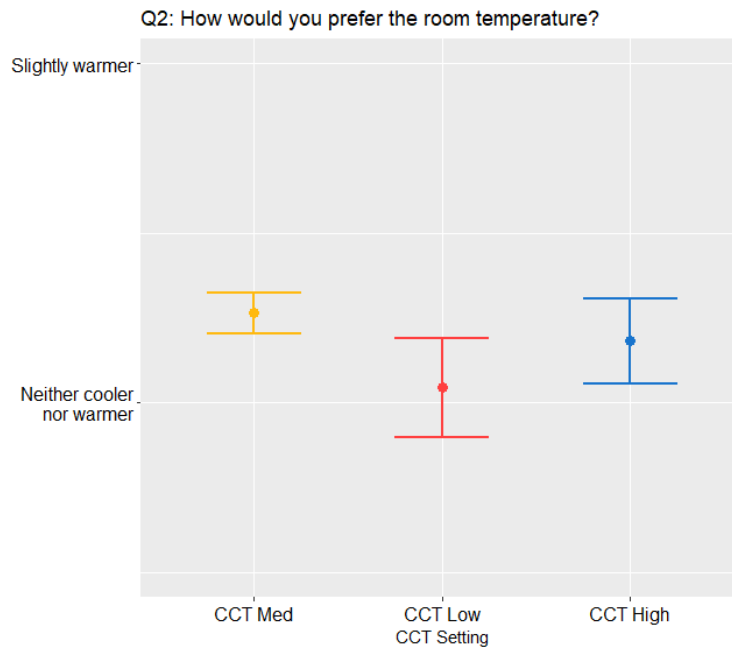
Figur 18 Målt farvetemperatur for tre forskellige indstillinger i tre forskellige afdelinger.

Dagslys havde en stor betydning for det tilgængelige lys i lokalerne og lysmængden målt på arbejdsområdet varierede i belysningsstyrker på mellem 500 lx og 1500 lx med størst spredning i data fra bygning 128 (data ikke vist).

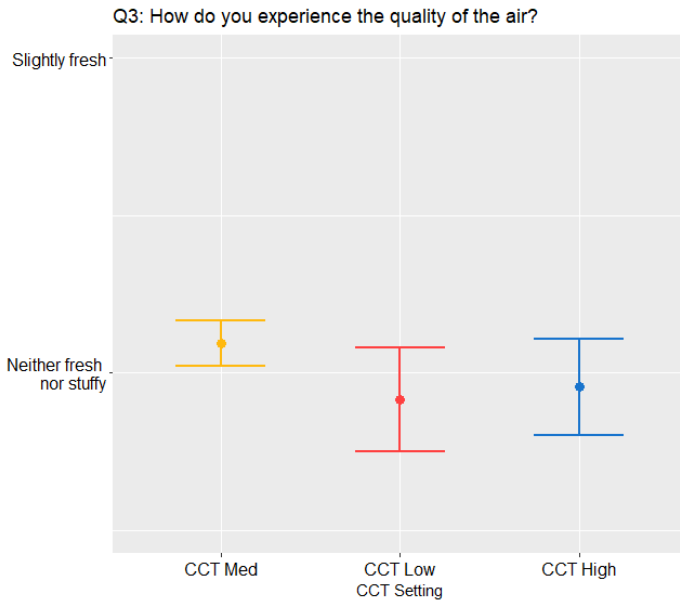
Der blev ikke fundet nogen signifikant sammenhæng mellem hverken den oplevede termiske komfort og lysets farvetemperaturer (se Figur 19 og Figur 20) eller mellem oplevet luftkvalitet og lysets farvetemperatur (Figur 21).



Figur 19 Hvordan har du det på nuværende tidspunkt? Afhængig af lysets farvetemperatur

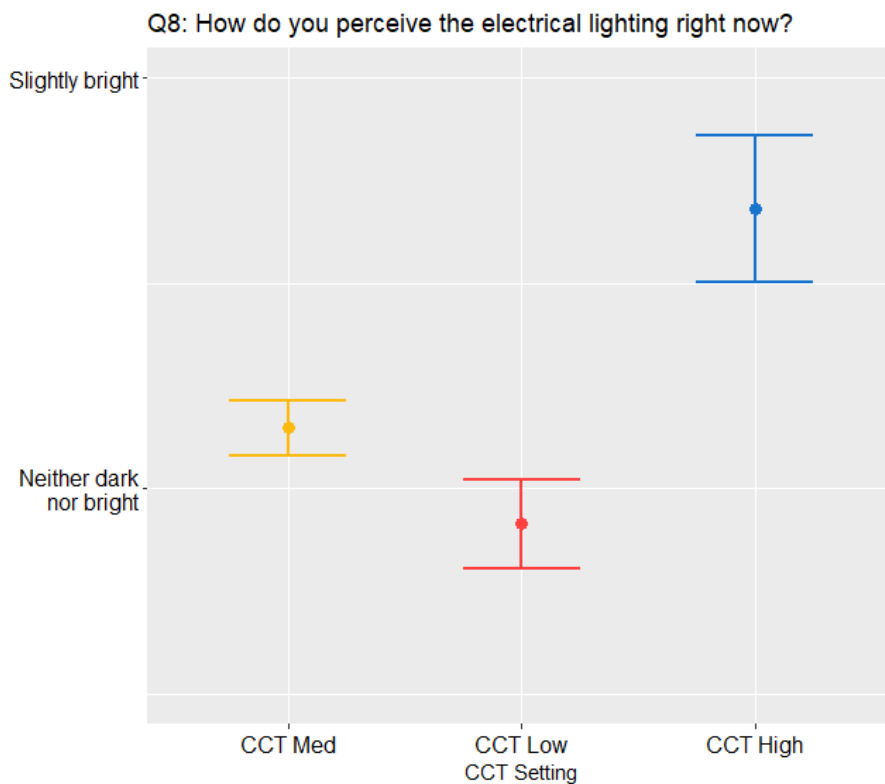


Figur 20 Hvordan foretrækker du rumtemperaturen? Afhængig af lysets farvetemperatur

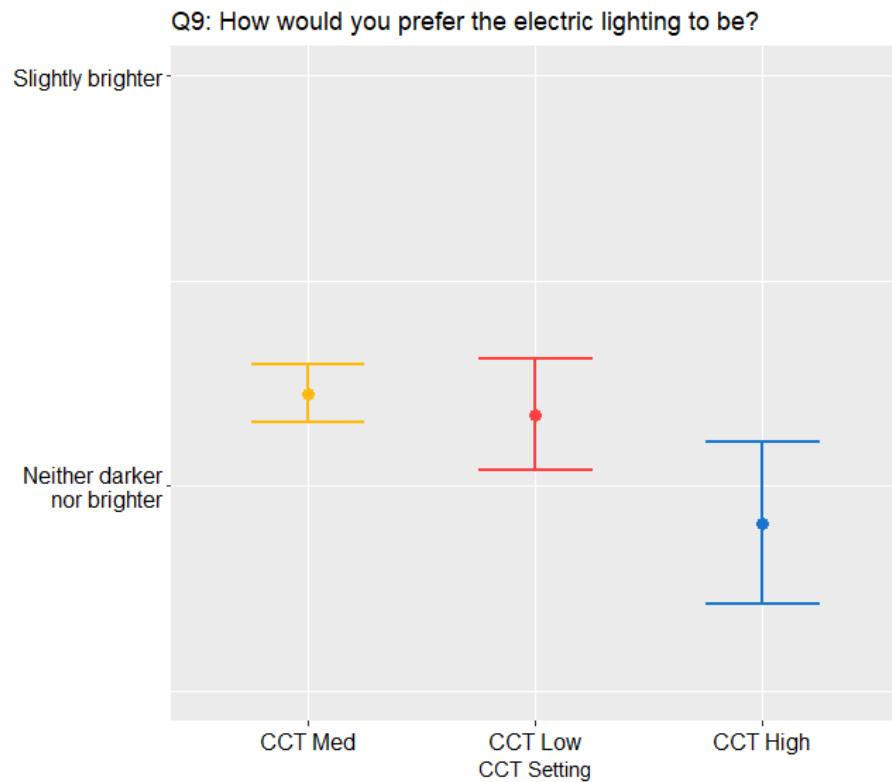


Figur 21 Hvordan oplever du luftkvaliteten? Afhængig af lysets farvetemperatur

Resultaterne viser at den høje farvetemperatur opfattes lysere og foretrakkes mørkere sammenlignet med den lave og middel CCT (se Figur 22 og Figur 23).



Figur 22 Svar til spørgsmål: Hvordan oplever du den elektriske belysning? afhængig af lysets farvetemperatur.



Figur 23 Svar til spørgsmål: Hvordan foretrækker du den elektriske belysning? afhængig af lysets farvetemperatur

Overordnet set blev den høje farvetemperatur foretrukket, frem for de to andre af de testede farvetemperaturer og den elektriske belysning blev generelt opfattet lysere når det var mørkt udenfor.

Yderligere informationer om data og dataanalyser fremgår af [7].

Diskussion

En forøgelse af CCT fra 2700 K til 6200 K forskød forsøgspersonernes gennemsnitlige termiske oplevelse. Denne forskydning svarende til en temperaturforskul på 1,7°C og blev vist ved en komfortabel temperatur og ved høj belysningsstyrke i laboratoriet. På baggrund heraf og ved at simulere energiforbrug og indeklima i en typisk dansk kontorbygning var den potentielle energibesparelse til opvarmning 8% af bygningens samlede årlige energiforbrug når bygningen var placeret i et køligt tempereret klima som det danske. Dette blev beregnet muligt at opnå ved at sænke setpunktet for opvarmning og kompensere med et tilsvarende fald i lysets farvetemperatur mod en varmere lysfarve.

Laboratorieforsøget viste en signifikant ændring i den oplevede rumtemperatur ved et lysniveau på 1000 lux på arbejdsfladen, hvilket dog ikke blev eftervist ved et lysniveau på 500 lux. Det er nødvendigt at udføre en samlet integreret energiberegning i hvert enkelte dimensioneringstilfælde, for at afgøre om det vil have en positiv energimæssige effekt at øge belysningsniveauet og derved potentielt reducere behovet for opvarmning og ventilation/køling.

I henhold til prEN 12464 skal belysningsniveauet i kontorrum være minimum 500 lux på arbejdsområdet. Forøges belysningsniveauet til 1000 lux bør det, ud over at energiforbruget til belysning forøges, tages i betragtning hvordan det højere belysningsniveau påvirker den visuelle komfort. Der vil være øget risiko for blænding fra armaturer og øvrige visuelle gener fra det øgede lysniveau. Omvendt vil en blændfri belysning med højere belysningsstyrke om dagen kunne stimulere kontorarbejderes døgnrytme i højere grad end en lavere vil kunne, hvilket dog ikke er blevet undersøgt her.

Potentialet for energibesparelser alene ved brug af regulerbart koldt og varmt lys, dvs. lys som stadig betegnes som hvidt lys (fuldspektret lys), må af nævnte faktorer anses for at være begrænsede i kontormiljøer. I kontormiljøer er der typisk et dagslys-bidrag. Dagslyset gør, at effekten af den elektriske belysning, vil være begrænset. Dette viste sig at være tilfældet i feltforsøgene, der blev udført i lokaler ved DTU fotonik. Dette på trods af at disse blev udført om vinteren. Forskelle der bør nævnes og som viste sig i feltforsøg, var at deltagerne i rapporterede den elektriske belysning med høj farvetemperatur som lysere og at denne belysning derfor blev foretrukket mørkere i sammenligning med den lave og middel CCT (Figur 22 og 23); hvilket stemmer overens med forsøg foretaget under laboratorieforhold. Dette indikerer at man ved høj CCT har mulighed for at sænke belysningsintensiteten i forhold til ved lavere og varmere CCT, og derved opnå samme rapporterede oplevelse af lysstyrken. Mange forskellige og ukontrollerbare faktorer gør sig gældende ved feltforsøg, hvilket gjorde, at det ikke var muligt at påvise en sammenhæng mellem lysets farvetemperatur og en ændring i temperaturfølelse.

Når man samlet ser på de forsøg som er lavet om relationen mellem lysfarve og oplevelsen af omgivelsernes temperatur (e.g. [2], [3]) er der dog noget som tyder på at der eksisterer sammenhæng derimellem, såfremt de lysfarver der testes adskiller sig nok fra hinanden og temperaturen er komfortabel.

I sundhedssektoren er man begyndt at installere og anvende farvet lys til at støtte døgnrytmen hos patienter og personale, som arbejder i skiftehold (nattevagter). Især rødt farvet lys anvendes om natten på sengestuer for at undgå at hæmme produktionen af søvnhormonet melatonin. Hvis man tager udgangspunkt i forskning og litteraturen er der meget som tyder på, at de personer der opholder sig i det farvede lys også vil opleve temperaturen anderledes. I de tilfælde hvor indstillingen om natten bidrager med et rødt lys, på f.eks. sengestuer, vil dette kunne medføre en oplevelse af varmere omgivelser. Til gengæld vil det kølige lys om morgenen, som indstilles for at hæmme eller stoppe produktion af melatonin og derved få personerne til at vågne, sandsynligvis medføre en oplevelse af koldere omgivelser. At lyset således påvirker døgnrytmen kan influere på behovet for brug af energi til opvarmning og køling på forskellige timer af døgnet. Det var tegn på at effekten af lysets farvetemperatur på temperaturfølelsen aftog efter eksponering over tid, og denne tilsyneladende tilvænning bør undersøges nærmere.

Det er ikke kun i sundhedssektoren man er begyndt at bruge decideret farver til belysning. Teknologien er på et stadie, hvor LED i farver og farvenuancer af hvidt lys er let tilgængeligt og vi ser hyppigere end tidligere private hjem, hvor der anvendes decideret farvet lys til belysning.

Brug af farvenuancer af hvidt lys blev brugt i dette projekt, fordi det betragtes som et bedre lys at opholde sig i længere tid, end farvet lys. Dette er især på grund af farveoplevelsen som ved brug af farvet lys forvrænges og kan medføre fejl i fortolkning af omgivelserne, eller fejl der hvor der er behov for god farvegengivelse og skelnen mellem farver.

Omvendt har brug af farvet lys formentlig potentialet til gennem perception at påvirke os på andre ukendte områder. Forsøgspersonerne fandt bl.a. luften i rummet mere frisk i de høje og kølige farvetemperaturer end ved de lavere. Vores sanser påvirkes således på kryds af andre sanser indtryk.

Resultaterne ville muligvis have været mere entydige og mere markante ved brug af decideret rødt og blå farvet lys frem for brug af to net hvidt lys, som anvendt i indeværende forsøg. Dette er dog ikke blevet undersøgt i indeværende projekt.

Gennemslagskraft

Artiklen om laboratorieforsøget [6] er citeret i et internationalt tidsskrift [8]. Projektet har været med til at uddanne flere ingeniørstuderende blandt andet gennem fire Master projekter [1], [9]–[13] og to Bachelor projekter [7][4], deres viden og erfaring vil komme videre ud i industrien. Endvidere er der publiceret en populærvidenskabelig feature artikel om projektet på det videnskabelige site Science Trends med titlen "Can we cheat the brain and save energy?" [14].

En introduktionsfilm om projektet er blevet produceret til nettet for at give en kort (2:30 min) gennemgang af metode og resultater. Filmen er tilgængelig på YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=dVzOjFnBOtU>

Referencer

- [1] M. Kühl, "Colour Temperature of Lighting and Thermal Comfort," Technical University of Denmark, 2017.
- [2] G. Chinazzo, J. Wienold, and M. Andersen, "Combined effects of daylight transmitted through coloured glazing and indoor temperature on thermal responses and overall comfort," 2018.
- [3] C. A. Bennett and P. Rey, "What's So Hot about Red?," *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.*, vol. 14, no. 2, pp. 149–154, Apr. 1972.
- [4] V. Christensen and K. F. Støttrup, "Lysets indflydelse på termisk komfort," Technical University of Denmark, 2016.
- [5] J. Toftum, A. Thorseth, J. Markvart, and Á. Logadóttir, "Occupant response to different correlated colour temperatures of white LED lighting," *Build. Environ.*, 2018.
- [6] J. Toftum, A. Thorseth, J. Markvart, and Á. Logadóttir, "Occupant response to controllable LED lighting," in *15th Conference of the International Society of Indoor Air Quality and Climate - Philadelphia, United States*, 2018.
- [7] S. L. Winter-madsen, N. Nørrekær, and N. Nørrekær, "Survey of the Color Temperature of Lighting and Indoor Climate," Technical University of Denmark, 2018.
- [8] J. Y. Park, T. Dougherty, H. Fritz, and Z. Nagy, "LightLearn: An adaptive and occupant centered controller for lighting based on reinforcement learning," *Build. Environ.*, Oct. 2018.
- [9] M. Rosenbeck and N. S. Gudmandsen, "Colour temperature of lighting and thermal comfort.," Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, Denmark, 2017.
- [10] K. Hebsgaard and F. Sørensen, "Colour temperature of lighting and comfort," Technical University of Denmark, 2017.
- [11] R. B. Lund, "Human perception of lighting," Technical University of Denmark, 2017.
- [12] N. A. Jørgensen, "Lighting and comfort," Technical University of Denmark, 2018.
- [13] L. Christensen, "Influence of lighting on indoor environment perceptions. M.Sc. Thesis.," Technical University of Denmark. Kongens Lyngby, Denmark., 2017.
- [14] J. Toftum, A. Thorseth, A. Logadóttir, J. Markvart, and S. Stoffer, "Can We Cheat The Brain And Save Energy?," *Science Trends*, 2018. [Online]. Available: <https://sciencetrends.com/can-we-cheat-the-brain-and-save-energy/>. [Accessed: 11-Dec-2018].

Figurliste

Figur 1 Variation af CCT i løbet af forsøgsrunderne i klimakammer. Øverst sekvensen anvendt i første runde (a) og nederst i anden runde (b) af forsøg (svarende til a og b i Tabel 1).....	10
Figur 2 Forsøgskammer med lyskilder i det nedhængte loft og forsøgspersonernes arbejdsstationer.....	10
Figur 3 Forsøgspersoner i kammeret ved ca. 2750 K (øverst) og ca. 6200 K (nederst).	11
Figur 4 Sammenhæng mellem CCT og termisk oplevelse (a) og mellem CCT og lysoplevelse (b) ved 1000 lux. Værdier er middel \pm standardafvigelse...	13
Figur 5 Sammenhæng mellem CCT og termisk oplevelse ved 500 lux. Værdier er middel \pm standardafvigelse.	14
Figur 6 Sammenhæng mellem CCT og termisk oplevelse (a) og mellem CCT og lysoplevelse (b) med og uden anvendelse af computerskærm. Temperaturen i forsøgskammeret var 22 °C og belysningsstyrken var 500 lux på bordoverfladen. Værdier er middel \pm standardafvigelse.....	15
Figur 7 Sammenhæng mellem CCT og termisk oplevelse (b) og mellem CCT og lysoplevelse (b) for ældre og yngre forsøgspersoner. Temperaturen i forsøgskammeret var 22°C og belysningsstyrken var 500 lux på bordoverfladen. Værdier er middel \pm standardafvigelse.	16
Figur 8 Sammenhæng mellem CCT og termisk oplevelse efter 30 min uændret eksponering ved højeste og laveste CCT. Temperaturen i forsøgskammeret var 22°C og belysningsstyrken var 500 lux på bordoverfladen. Værdier er middel \pm standardafvigelse.	17
Figur 9 Bygningerne 128 og 130 på DTU Risø campus	18
Figur 10 Eksempel på et typisk enkeltmandskontor som indgik i forsøget ..	19
Figur 11 Eksempel på et typisk storrumskontor som indgik i forsøget.....	19
Figur 12 Målt temperatur i kontorer i bygning 128 (a), bygning 130 stueetage (b) og 130, 1. sal (c).	21
Figur 13 Målt relativ luftfugtighed i kontorer i bygning 128 (a), bygning 130 stueetage (b) og bygning 130 1. sal (c).....	22
Figur 14 Målt CO ₂ koncentration i kontorer i bygning 128 (a), bygning 130 stueetage (b) og bygning 130 1. sal (c).....	23
Figur 15 Svar til spørgsmål: Hvordan har du det på nuværende tidspunkt? Afhængigt af rumtemperatur	24
Figur 16 Svar til spørgsmål: Hvordan foretrækker du omgivelsestemperaturen? Afhængigt af rumtemperatur.....	24
Figur 17 Belysningsstyrken på arbejdsområdet.....	25
Figur 18 Målt farvetemperatur for tre forskellige indstillinger i tre forskellige afdelinger.....	25

Figur 19 Hvordan har du det på nuværende tidspunkt? Afhængig af lysets farvetemperatur	26
Figur 20 Hvordan foretrækker du rumtemperaturen? Afhængig af lysets farvetemperatur	26
Figur 21 Hvordan oplever du luftkvaliteten? Afhængig af lysets farvetemperatur	27
Figur 22 Svar til spørgsmål: Hvordan oplever du den elektriske belysning? afhængig af lysets farvetemperatur.....	27
Figur 23 Svar til spørgsmål: Hvordan foretrækker du den elektriske belysning? afhængig af lysets farvetemperatur.....	28