

Forskningsbaserede anbefalinger for godt og læringsfremmende indeklima i klasseværelser

Fuld rapport

Redigeret af **Pawel Wargocki og David P. Wyon**, 13. april, 2021

Støttet af **Realdania**

International Centre for Indoor Environment and Energy
Institut for Byggeri og Anlæg
Danmarks Tekniske Universitet

Resumé

Denne rapport opsummerer eksisterende forskning i, hvordan børns præstationsevne i folkeskolen og gymnasiet samt deres efterfølgende uddannelse er påvirket af temperatur, luftkvalitet, støj samt dagslys og belysning i klasselokalet.

De vigtigste konklusioner (punkt 1-20) er angivet nedenfor. Konklusionerne underbygges af den detaljerede gennemgang af eksisterende forskning, der udgør størstedelen af rapporten. Referencer til de originale publikationer findes hvor et emne behandles eller i kildelisten nedenfor.

Korte kommentarer er tilføjet de enkelte emner, baseret på andre relevante resultater, der er beskrevet i redegørelsen.

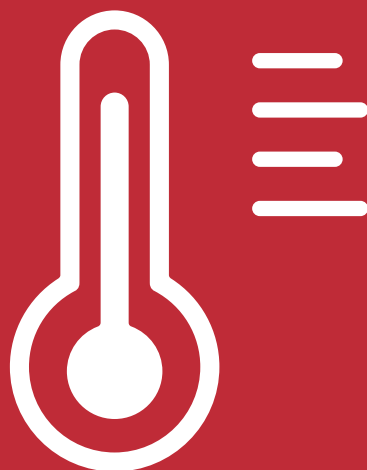
Derefter følger en kort liste over, hvad der endnu ikke vides om virkningerne af hver indeklimatektor (punkt 5, 10, 15 og 20), konsekvenserne der følger ved energibesparelse (punkt 21-25) og prioriteringer for fremtidig forskning på området (punkt 26-30).

Rapportens resumé med de aktuelle anbefalinger og krav til indeklimate på skoler er tilføjet i et særskilt afsnit.

Fire bilag beskriver de detaljerede gennemgange, som denne rapport er baseret på.

Termisk klima i klasselokaler

Forhøjede temperaturer i klasselokaler påvirker skolebørn negativt (Bilag 1)



Dokumentation

1 **Meta-analyse af alle tilgængelige studier viser, at børns præstationsevne reduceres med 20%, når lufttemperaturen i klasseværelset øges med 10 K. (Wargocki et al., 2019)**

Børn præsterer dårligere i høje temperaturer. Det kunne forventes, at dette påvirker, hvor meget de lærer i skolen. Dette blev undersøgt i to store uafhængige feltundersøgelser, en i New York (Park, 2016) og en i Californien (Goodman et al, 2018). Undersøgelserne blev gennemført ved skoleårets afslutning og evaluerede børnenes læring over tid. De konkluderede, at læringsudbyttet faldt med 0,4-0,5% for hver 1K stigning i udetemperatur. Man antog implicit, at temperaturen i klasselokalet steg i takt med udetemperaturen. Dette viser, at effekten på børnenes skolearbejde, uanset årsag, har indvirkning på den overordnede indlæring.

2 **Forhøjede temperaturer har dobbelt så stor negativ effekt på skolearbejde som på kontorarbejde (Wargocki and Wyon, 2013; 2017)**

På trods af at denne konklusion antyder, at børn er mere følsomme end voksne overfor det termiske indeklima, kan forskellen være en konsekvens af negativ indflydelse af høj temperatur på både elever og lærere, eller af at voksne, der arbejder i kontorer, udfører opgaver, som til en vis grad er indøvede, og som de er blevet oplært i, mens al indlæring for elever per definition er ny. Temperaturen påvirker koncentrationsevnen og evnen til at tænke klart – evner, der er essentielle for skolearbejde og indlæring, hvorfor præstationen af alle typer af skolearbejde påvirkes. Præcisionen af skoleopgaver påvirkes hvis tempoet øges, men ved selvstændig opgaveløsning forsøger børn bevidst eller ubevidst at opretholde en acceptabel præcision ved at reducere tempoet, som opgaverne løses i. Denne adfærd er den mest almindelige kompensation for høje temperaturer blandt skolebørn.

3 **Den optimale temperatur for skolearbejde er 2-3K lavere end for kontorarbejde, og børn i skoler foretrækker lavere temperaturer end voksne i kontormiljøer (Wargocki and Wyon, 2017)**

Dette kan skyldes, at børn har et højere basalt stofskifte og derudover sidder stille i kortere perioder, hvilket resulterer i, at deres gennemsnitlige indre varmeproduktion er højere end hos voksne. I en feltundersøgelse hvor et klasselokales temperatur og luftkvalitet blev justeret til mellem 21 og 26°C (Wyon & Wargocki, 2008), blev vinduet åbnet hyppigere, jo højere temperaturen var. Selvom dette ikke forhindrede temperaturen i klasselokalet i at stige, viste forsøget, at termisk ubehag tydeligt både mærkes og opleves negativt af både børn og voksne. Forsøget viste derudover, at vinduer ikke blev åbnet hyppigere som følge af dårlig luftkvalitet, selvom dette ofte antages.

4 **I Danmark er den optimale temperatur i klasselokaler lavere end 23°C (Wargocki and Wyon, 2007)**

Der er ikke fundet troværdig dokumentation for mekanismerne bag den negative effekt af moderat varmepåvirkning. Distraction forårsaget af termisk ubehag har været generelt accepteret som en plausibel forklaring, men nyere resultater har vist, at den kognitive præstation fortsat vil være nedsat, selvom beklædningen tilpasses temperaturen (Lan et al. 2020). Det antages, at kroppens fysiologiske reaktion på varme spiller en rolle.

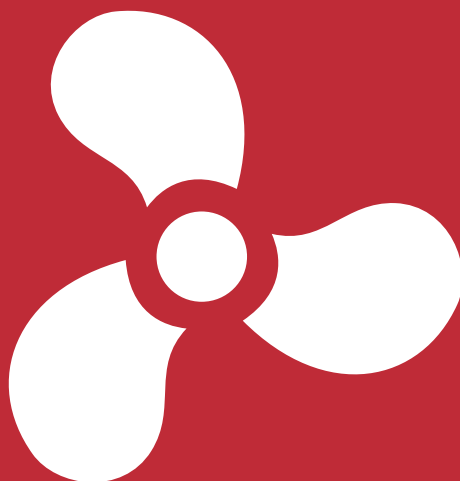
Potentiel fremtidig forskning

5 **Hvad vides endnu IKKE:**

Hvorvidt den optimale temperatur i klasselokaler varierer mellem klimazoner, om lærernes termiske påvirkning har indflydelse på kvaliteten af undervisningen (det vides, at temperaturen på arbejdspladsen påvirker kontorarbejde udført af voksne), mekanismerne bag påvirkningen af kognitiv præstation og indlæring, hvorvidt indeklimafaktorer som støj og luftkvalitet interagerer med termiske effekter.

Luftkvalitet i klasselokaler

**Dårlig luftkvalitet har negativ virkning på skolebørn
(Bilag 2)**



Dokumentation

6 **Børn løser skoleopgaver 12% hurtigere og 2% mere korrekt, når tilførslen af udeluft er tilstrækkelig til at CO₂ koncentrationen i klasselokalet er 900 ppm i stedet for 2100 ppm (Wargocki et al., 2020)**

Børns præstation ved løsning af typiske skoleopgaver er ringere i dårlig luftkvalitet (indikeret af forøget CO₂ koncentration). CO₂ koncentrationen målt i et lokale bruges ofte som en let tilgængelig indikator for, hvor meget udeluft, der tilføres et lokale i forhold til antallet af tilstedeværende, og som følge indeluftkvalitet. I forsøg med voksne havde tilførsel af ren CO₂ (uden øvrige emissioner fra mennesker, såkaldte bioeffluenter) negativ indflydelse på udførelsen under tidspress af opgaver, der simulerede komplekse ledelsesbeslutninger. Imidlertid er der ikke påvist en effekt af ren CO₂ på børn eller på opgaver svarende til almindeligt skolearbejde (Satish et al., 2012; Allen et al., 2016; Fisk et al., 2019). For almindelige kontoropgaver udført af voksne er der heller ikke påvist en effekt af ren CO₂ (Zhang et al., 2017).

7 **Prøve- og eksamensresultater er 5% bedre, når udelufttilførslen resulterer i, at CO₂ koncentrationen i et gennemsnitligt klasselokale er 900 ppm i stedet for 2400 ppm (Haverinen-Shaughnessy et al., 2011; Wargocki et al., 2020)**

Dette viser, at den effekt luftkvaliteten i et klasselokale har på præstationsevnen ved almindeligt skolearbejde kan overføres til prøve- og eksamensresultater, som det blev påvist ovenfor under punkt 1 i relation til temperaturen i klasselokalet, dog kun med halvt så stor effekt ved indeluftkvalitet. Der er god eksperimentelt baseret dokumentation for, at flygtige stoffer i klasselokalet - ikke luftbåren partikulær forurening - forårsager de observerede negative virkninger på den kognitive præstation (Wargocki et al., 2007; Wargocki and Wyon, 2016). Emissioner fra mennesker samt emissioner fra byggematerialer og inventar påvirker den kognitive præstation negativt (Wargocki et al., 2000). Hverken de aktive molekyler eller årsagen til deres negative effekter er blevet identificeret, så tilstrækkelig tilførsel af udeluft der fjerner og mindsker koncentrationen af luftbårne forureninger er foreløbig det bedste middel til at opretholde præstationsevnen.

8 **Resultater af nationale tests er 5% bedre med 7,5 L/s/p end med 2 L/s/p tilførsel af udeluft til klasselokaler (Haverinen-Shaughnessy et al., 2011, Mendell et al., 2016; Wargocki et al., 2020)**

Dette viser, at luftkvalitetens betydning for prøve- og eksamensresultater kan overføres til resultater af nationale tests, som generelt betragtes som de mest pålidelige indikatorer for den samlede læring i folkeskolen. De negative effekter ved dårlig luftkvalitet i klasselokalet har logisk nok også indvirkning på læreres sygefravær, på sygdomme som astma og på lærernes motivation, og disse effekter kan derved indirekte påvirke elevernes resultater i de nationale tests.

9 **Fraværet er 1,5% højere med 2 L/s/p end med 7,5 L/s/p tilførsel af udeluft til klasselokaler (Mendell et al., 2013; Wargocki et al., 2020)**

Dette antyder, at øget tilførsel af udeluft kan reducere smitterisikoen eller afhjælpe andre sygdomme, som forårsager fravær. Øget tilførsel af udeluft fjerner og fortynder luftbårne patogener samt flygtige stoffer og partikler (Li et al., 2007; Morawska et al., 2020), og i det omfang fraværet skyldes, at børn bliver hjemme mens de er syge, må dette formodes at være årsagen til den observerede effekt på fraværet. Derfor må høj tilførsel af udeluft ses som en god mulighed for at reducere indvirkningen af fremtidige pandemier på læring i skolen. Recirkulation af indeluft gennem grovfiltre vil gavne elever, der lider af allergi i løbet af pollensæsonen (ASHRAE Guideline, 2020).

Potentiel fremtidig forskning

10 **Hvad vides endnu IKKE:**

I hvilket omfang tætheden af personer i klasselokalet og lav udelufttilførsel påvirker smitterisiko, om lærerne påvirkes negativt og om det har følger for undervisningskvaliteten, om termiske effekter interagerer med effekter af luftkvalitet, mekanismerne bag den negative effekt luftkvalitet har på kognitiv præstation. Det er dog påvist, at lungekapaciteten midlertidigt reduceres ved eksponering for dårlig luftkvalitet (Shriram et al., 2019). De fysiologiske processer, som forårsager denne reduktion og hvordan disse påvirker den kognitive præstation kendes endnu ikke. Hvis dette var tilfældet, kunne de luftbårne molekyler, der forårsager disse negative virkninger muligvis identificeres og derved fjernes fra indeluften.

Klasselokalets støj og akustik

**Støj i klasselokalet påvirker skolebørns taleforståelse
(Bilag 3)**



Dokumentation

11 Støj i klasselokalet har negativ betydning for taleforståelighed, generel forståelse og hukommelse, men der findes kun sparsom dokumentation for, at det påvirker ikke-verbale opgaver som læsning, skrivning eller matematik (Astolfi et al., 2012; Bilag 3)

Børns forståelse af information formidlet mundtligt blev reduceret, når der var støj i klasselokalet. Støj der afleder opmærksomheden, som f.eks. trafik, flystøj eller baggrundstale, kan have negative effekter ved selv lave dB-niveauer. Børns interaktion med lærerne foregår i vid udstrækning verbalt, men selvom det virker oplagt at taleforståeligheden påvirker kvaliteten og dermed udbyttet af undervisningen, er den samlede effekt ikke kvantificeret.

12 Yngre børn er mere påvirkede end ældre børn og voksne (Jamieson, 2004; Bilag 3)

Støj i klasselokalet viste sig at have større negative effekter på taleforståelsen, jo yngre børnene var. Ældre børn og voksne befinder sig på et højere sprogligt niveau, hvilket gør dem i stand til at gætte, hvad uforståelige ord skulle have betydet. Deres kommunikation afhænger derfor ikke nær så meget af, hvor meget støj, der er i klasselokalet, og den bliver derved mindre følsom overfor støjen.

13 Børn med hørenedsættelse eller særlige behov samt tosprogede børn, der ikke undervises på deres primære modersmål, påvirkes negativt i højere grad (Geffner et al., 1996; Hurting et al., 2016; Bilag 3)

Børn der har svært ved at høre andres tale, eller af andre årsager er nødt til at koncentrere sig om at lytte eller forstå det talte sprog, klarede sig mindre godt end andre under påvirkning af støj i klasselokalet. Permanent flystøj resulterer over tid i dårligere læsefærdigheder. Flystøj anses som mere forstyrrende end kontinuerlig trafikstøj, fordi det består af enkeltstående og uforudsete støjpåvirkninger, der ikke kun forstyrrer hørelsen, men som også kan forstyrre opmærksomheden. Flere studier har vist, at skoler ikke bør bygges i områder med høj risiko for støj fra omgivelserne. Hvis placering af en skole i sådan et område er nødvendig, bør det tilstræbes at lydisolere skolebygningerne tilstrækkeligt for at beskytte mod udefrakommende støj.

14 Længere efterklangstid forværrer de negative effekter ved støj i klasselokalet (Klatte et al., 2010; Ljung et al., 2009; Bilag 3).

Børns sprogforståelse var værre jo længere klasseværelsets efterklangstid. Tiltag for at forbedre akustikken i klasselokaler, som f.eks. at øge arealet af lydabsorberende overflader, kan nemt reducere efterklangstiden. Dette er standardpraksis i forelæsnings- og mødelokaler, hvor forståelsen af tale er afgørende. Den bedste og billigste løsning ville dog være på en eller anden måde at reducere det støjniveau, der genereres af børnene selv, fordi forhøjede niveauer af støj i klasseværelset skader lærernes stemmebånd, når de er nødt til at hæve stemmen for at blive hørt. En måde dette kan opnås i praksis er ved at have dukse til at markere, når støjen bliver for høj, ligesom de ved høje CO₂ koncentrationer kan signalere, når det er tid til at åbne et vindue. En anden tilgang er "stilleklokken" der bruges af Montessori-uddannede lærere. Klokker kan ethvert barn ringe med for at bede om ro, når de personligt føler, at der er behov for det.

Potentiel fremtidig forskning

15 Hvad vides endnu IKKE:

De negative effekter på ikke-verbale opgaver og læringsudbytte af forskellige typer og niveauer af støj i klasselokalet, hvordan og hvor meget støjgener påvirker lærernes sundhed og trivsel, hvordan støj bedst kan mindskes ved hjælp af tekniske foranstaltninger som forbedrer akustikken, hvorvidt det påvirker kvaliteten af undervisningen, om vinduerne kan åbnes uden at det medfører for meget støj udefra, om støj fra installationer (f.eks. fra ventilatorer i ventilationssystemer, computere el. lign.) har negative effekter og hvorvidt der er vekselvirkning mellem termisk indeklima, luftkvalitet og støj. Forskellige pædagogiske metoders afhængighed af støj er ikke omfattet af denne gennemgang.

Dagslys, udsyn og kunstig belysning i klasselokalet

Dagslys, udsyn til grønne områder og god kunstig belysning kan forbedre børnenes præstationsevne (Bilag 4)



Dokumentation

16 Dagslys har i sig selv gavnlige betydning for børn i klasselokaler (Gentile et al., 2017; Studer et al., 2019; Bilag 4)

En forsinkelse i den daglige stigning i kortisolniveau i morgenurinen blev observeret hos 88 børn i alderen 8-9 år, der var tilfældigt fordelt på klasselokaler uden vinduer (Gentile et al., 2017). I en tværsnitsundersøgelse af skoler havde børnenes præstation en sammenhæng med dagslysadgang i klasselokalerne. Ved kortvarig eksponering (under 1 time) om morgenen af 28 børn i alderen 11-17 for enten rødlig belysning (900 lux) eller blålig belysning (1000 lux), forbedrede eksponeringen af den blå belysning opmærksomheden i to af tre opgaver, hvilket førte til bedre præstationsevne i matematikprøver og reduceret reaktionstid i en online opmærksomhedstest (Studer et al., 2019). Dette støtter den traditionelle opfattelse at (naturligt blåligt) dagslys, som kommer ind i klasselokaler gennem vinduer, muligvis har lignende fordele for præstationsevnen ved skolearbejde. Dokumentation i relation til kortisol antyder en plausibel sammenhæng. Kortisol er et stressrelateret hormon, der ændres sæsonmæssigt og dagligt og påvirkes af eksponering for dagslys.

17 Udsyn til grønne områder har en tydelig fordelagtig effekt på skolearbejde (Matsuoka, 2010; Bilag 4)

På baggrund af, at betydningen for børn af udsyn til grønne områder (græs, planter og træer) kunne skyldes adskillige andre faktorer i undersøgelser af forskellige skoler, udførtes et forsøg, hvor børn tilfældigt blev fordelt i klasselokaler med eller uden udsyn til grønne områder (Li and Sullivan, 2016). Børn der havde udsyn til grønne områder, præsterede bedre i forskellige prøver af opmærksomhedsevne (13% højere) og kom sig væsentligt hurtigere efter en stressende situation, end de børn, der opholdt sig i klasselokaler uden udsyn til grønne områder. I denne forbindelse er det værd at bemærke, at et lignende eksperiment gennemført for mere end 30 år siden viste, at udsyn til grønne områder reducerede varigheden af hospitalsindlæggelse og smertestillende medicin hos voksne patienter, der var blevet opereret (Ulrich, 1984).

18 Tilstrækkelig kunstig belysning af god kvalitet kan forbedre koncentrationsevnen (Bilag 4)

Belysningen i fire klasselokaler blev undersøgt i et interventionsforsøg (Barkmann et al., 2012). Børn i testgruppen lavede 20,8% færre fejl i en koncentrationstest i høj belysningsstyrke (>1000 lux) end børn der udførte samme test i "standard" belysning (300 lux). I et interventionsforsøg, der tilfældigt tildelte forskellige lysintensiteter på fire sammenlignelige klasselokaler, resulterede "fokus" belysning (1000 lux) i en højere procentvis stigning i evnen til flydende at læse en tekst højt (36%), end ved normal (500 lux) belysning (17%) (Mott et al., 2012). En stigning i belysningsstyrken (lux) og belysningens farvetemperatur førte begge til øget udbytte ved læsning af tekster (Mott et al., 2012; Hviid et al., 2020). Derudover blev en række andre faktorer, herunder blænding fra vinduer, solindfald og manglende visuel kontrol forbundet med negative effekter på præstationsevnen (Heschong Mahone, 2003).

19 Læsehastighed bliver kun nedsat ved meget svag belysning (Veitch, 1990)

I en undersøgelse, hvor 100 elever i alderen 17-20 udførte en læseopgave i tre forskellige belysningsniveauer (200, 400 og 600 lux), blev der ikke påvist nogen effekt på læsehastigheden (Veitch, 1990). Da det selvfølgelig er umuligt at læse i mørke og der ikke blev påvist negative effekter ved en belysning på 200 lux, vil en eventuel reduktion af læsehastigheden først indtræde ved belysningsniveauer under 300 lux, som er det anbefalede niveau for klasselokaler.

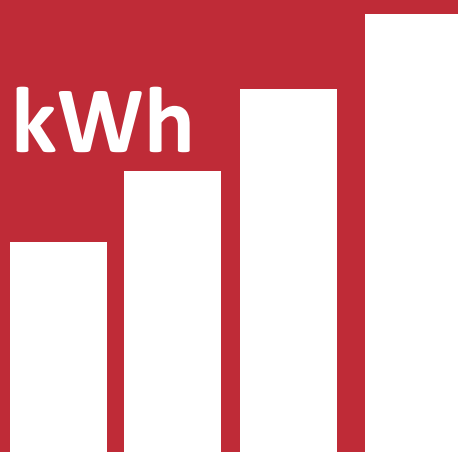
Potentiel fremtidig forskning

20 Hvad vides endnu IKKE:

Hvorvidt mere dagslys, udsyn og højere kvalitet af belysningen i klasselokaler vil føre til mindre fravær, forbedret indlæring og forbedrede eksamensresultater, disse faktorer relative indvirkning på ovenstående, størrelsesordenen af forbedringerne, hvorvidt disse effekter afhænger af temperatur, luftkvalitet eller støj, hvordan de påvirker læreres sundhed, velvære og præstationsevne, hvorvidt læringsudbyttet ville forbedres yderligere, hvis belysningen kunne ændres af lærerne i løbet af dagen og derved tilpasses de forskellige aktiviteter i klasselokalet samt tidspunktet på dagen.

Energibesparelse og kognitiv præstation

Højere kognitiv præstation vil føre til mindre energiforbrug i klasselokaler, så begge mål kan nås på samme tid



21 Højere energieffektivitet øger energiforbruget (Alcott, 2005)

I 1865 konstaterede man mod forventning, at det at øge dampmaskinens effektivitet førte til, at der blev brugt mere kul – ikke mindre, som det ellers kunne forventes. "Jevons Paradox" fremhæver generelt at højere energieffektivitet øger energiforbruget til over det, der kan forventes (Alcott, 2005). Dette skyldes at, når udgiften til en ydelse, der bruger energi bliver mindre, bliver det samtidig økonomisk muligt at bruge mere energi. Den samme effekt kan forventes i energirenoverede klasselokaler – en slags "Jevons rebound", som kan illustreres ved, at mere effektive flymotorer fører til flere flyrejser, at biler der kan køre længere på literen, fører til kørsel over længere afstande, og ved at effektiv LED-belysning der bruger mindre energi, forbliver tændt i mange flere timer end almindelig belysning.

22 Højere energieffektivitet fører til stigende energiforbrug til opvarmning

En vis rebound-effekt må forventes i forbruget af energi til opvarmning og belysning af klasselokaler, svarende til den, der blev observeret efter installation efter energieffektiv opvarmning af boliger i Danmark (Gram-Hanssen & Hansen 2016). Installation af mere energieffektiv opvarmning førte til højere temperaturer i boligerne og halverede således den forventede energibesparelse. Danske husejere foretrak at gå i let sommertøj hele året.

23 Termiske og praktiske præferencer opslugte halvdelen af den forventede energibesparelse

Grunden til at danske husejere foretrak at gå i let sommertøj hele året var, at mindre tøj samt lettere materialer kunne anvendes ved flere forskellige aktivitetsniveauer uden at de fik det for varmt eller begyndte at fryse og uden at de behøvede at tage tøj af eller på (Wyon et al, 1975).

24 Klasselokaler bør være kølige og ikke varme for at optimere den kognitive præstationsevne

Det er dokumenteret, at kognitiv præstationsevne forringes ved højere temperaturer (Lan et al., 2020). Moderat forhøjede temperaturer har vist sig at have negative effekter på den kognitive præstationsevne, selv hvis påklædningen blev tilpasset rummets temperatur for at opnå termisk komfort. Den ofte fremførte antagelse om, at kognitiv præstationsevne ikke påvirkes, medmindre der klages over termisk ubehag, er således ikke sand. Det anbefales derfor ud fra ovennævnte forskningsresultater, at holde klasselokaler kølige for at optimere kognitiv præstationsevne (Wargocki et al., 2019).

25 Ved at opretholde temperaturer, der er optimale for kognitiv præstationsevne, undgår man rebound i energiforbrug

Børn lærer mere og er også mere komfortable i kølige, energieffektive klasselokaler (Wargocki et al., 2019; Bilag 1). Formentlig vil rebound i energiforbrug ikke forekomme, hvis temperatur og belysning i klasselokaler optimeres med henblik på optimal kognitiv præstationsevne. Ved at installere energieffektiv opvarmning og belysning i klasselokaler, vil man derfor reducere energiforbruget uden rebound som det sås ved undersøgelsen af energieffektiv boligopvarmning.

Prioriteter for fremtidig forskning



26 Reduktion af smitterisiko

I en pandemi og for generelt at reducere fravær som følge af sygdom (Mendel et al., 2013) må der søges nye veje for at opnå en større udskiftning af luften i klasselokaler. Avancerede systemer til at distribuere luft i klasselokaler bør udvikles til dette formål (Melikov, 2020). Den reduktion af kildestyrken, der opnås ved at alle elever skal forlade klasselokalet i pauser samt varigheden af og tidspunktet for disse pauser, og herudover andre foranstaltninger som yderligere rengøring af overflader, brug af (fritstående) luftrensere samt UV-behandling af indeluft, bør have førsteprioritet. Dette vil reducere risikoen for at videreføre sygdomme, der smitter gennem luften, herunder influenza.

27 Sammenhæng mellem fysiologiske reaktioner og luftkvalitet inden døre

At klarlægge nøjagtigt hvordan luftens indhold af forurenende stoffer påvirker lungefunktionen, hvordan dette påvirker koncentrationer i blodet og derigennem indlæringen, vil ændre markant regulering af emissioner fra forureningskilder, luftrensningsteknologi og ventilationspraksis (Shiriam et al., 2019; Bako-Biro et al., 2005; Wargocki and Wyon, 2016). Disse potentielle praktiske fordele vil overgå de akademisk interessante elementer i forskningen, da de vil identificere de forurenende stoffer, der har negative effekter, og således gøre det muligt at definere videnskabeligt baserede retningslinjer for måling af indeklime (Salis et al., 2017).

28 Direkte termiske effekter på kognition

Ved brug af adaptiv termisk komfort-modellen som et alternativ til almindelige varmebalancemodeller, fremsætter danske og internationale standarder for termisk komfort den hypotese, at kognition vil være optimal, hvis der ikke klages over termisk ubehag. Nyere forskning (Lan et al. 2020) har imidlertid modbevist ovenstående. Lan et al. (2020) viste, at varme negativt påvirker den kognitive præstation på trods af, at der ikke føles termisk ubehag. Yderligere forskning med henblik på at validere eller afkræfte dette resultat er nødvendig, da klasseværelsets temperatur ellers vil stige over tid, og rebound effekten vil reducere gevinsten ved øget energieffektivitet.

29 Effekt på lærere af klasseværelsets indeklime

Negative effekter som følge af forhøjede temperaturer, dårlig luftkvalitet og støj er blevet påvist blandt voksne som udfører kontorarbejde (Seppanen and Fisk, 2006) og for skolebørn (Wargocki and Wyon, 2016), mens effekten på lærere ikke er blevet undersøgt i samme omfang. Forskning i, hvordan læreres sundhed, trivsel og undervisningsfærdigheder påvirkes af forholdene i klasselokaler samt hvordan dette påvirker børnenes udbytte af undervisningen, er nødvendig og bør prioriteres.

30 Optimering af klasseværelsets ressourceforbrug

Bygning, udstyr, opvarmning, ventilation, bemanding og rengøring af et helt lands klasselokaler medfører både store investeringer og driftsomkostninger (Wargocki and Seppanen, 2006). Disse udgifter modsvarer af det undervisningsmæssige udbytte for de børn, der undervises i klasselokalerne (Madsen et al., 2020; Slotsholm, 2012). Forskning i, hvordan man forbedrer den samlede lønsomhed ved at anvende de resultater, der er beskrevet i denne rapport, er vigtig. Det bør undersøges, hvordan parametre, der definerer forskellige aspekter af klasselokalernes indeklime, påvirker hinanden samt hvordan disse vekselvirkninger påvirker kognitiv præstationsevne. Hidtil har forskningen i dette emne været begrænset – specielt, når vekselvirkningen mellem forskellige indeklimeområder blev undersøgt (Hviid et al., 2020). Med nogle yderligere antagelser vil numerisk modellering af, hvorledes øgede investeringer i temperaturregulering, luftkvalitet, støjreduktion og forbedringer i dagslys og belysning ville gavne undervisningsudbyttet være mulig. Dette bør være første skridt mod at prioritere forskningsindsatsen og adressere den manglende viden identificeret i rapporten samt for at validere de antagelser, der er nødvendige for modelleringen.

Litteraturliste

Alcott, B. (2005). Jevons' paradox. *Ecological Economics*, 54(1), 9-21.

Allen, J. G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J., & Spengler, J. D. (2016). Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: a controlled exposure study of green and conventional office environments. *Environmental health perspectives*, 124(6), 805-812.

ASHRAE (2020) <https://www.ashrae.org/technical-resources/resources>.

Astolfi, A., Bottalico, P., & Barbato, G. (2012). Subjective and objective speech intelligibility investigations in primary school classrooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1),

Bakó-Biró, Z. S., Wargocki, P., Wyon, D. P., & Fanger, P. O. (2005). Poor indoor air quality slows down the metabolic rate of office workers. *Proceedings of Indoor Air 2005*, 1, 76-80.

Barkmann, C., Wessolowski, N., & Schulte-Markwort, M. (2012). Applicability and efficacy of variable light in schools. *Physiology & behavior*, 105(3), 621-627.

Fisk, W., Wargocki, P., & Zhang, X. (2019). Do Indoor CO₂ Levels Directly Affect Perceived Air Quality, Health, or Work Performance?. *ASHRAE Journal*, 61(9).

Geffner, D., Lucker, J. R., & Koch, W. (1996). Evaluation of auditory discrimination in children with ADD and without ADD. *Child Psychiatry and Human Development*, 26(3), 169-180.

Gentile, N., Goven, T., Laike, T., & Sjoberg, K. (2018). A field study of fluorescent and LED classroom lighting. *Lighting Research & Technology*, 50(4), 631-650.

Goodman, J., Hurwitz, M., Park, J., & Smith, J. (2018). Heat and learning (No. w24639). National Bureau of Economic Research.

Gram-Hanssen K. and Hansen, A.R. (2016) The difference between measured and calculated energy use for heating in dwellings (In Danish). Report SBI 2016:09, Aalborg University, Denmark: Danish Building Research Institute (SBI)

Haverinen-Shaughnessy, U., Moschandreas, D. J., & Shaughnessy, R. J. (2011). Association between substandard classroom ventilation rates and students' academic achievement. *Indoor air*, 21(2), 121-131.

Heschong Mahone Group (2003) *Windows and Classrooms: A Study of student performance and the indoor environment*, California.

Hviid, C. A., Pedersen, C., & Dabelsteen, K. H. (2020). A field study of the individual and combined effect of ventilation rate and lighting conditions on pupils' performance. *Building and Environment*, 171, 106608.

Hurtig, A., Sörqvist, P., Ljung, R., Hygge, S., & Rönnerberg, J. (2016). Student's second-language grade may depend on classroom listening position. *PLoS ONE*, 11(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156533>

Hurtig, A., Van de Poll, M. K., Pekola, E. P., Hygge, S., Ljung, R., & Sörqvist, P. (2016). Children's recall of words spoken in their first and second language: Effects of Signal-to-Noise Ratio and Reverberation Time. *Frontiers in Psychology*, 6, 2029.

Jamieson, D. G., Kranjc, G., Yu, K., & Hodgetts, W. E. (2004). Speech intelligibility of young school-aged children in the presence of real-life classroom noise. *Journal of the American Academy of Audiology*, 15.

Klatte, M., Hellbrück, J., Seidel, J., & Leistner, P. (2010). Effects of Classroom Acoustics on Performance and Well-Being in Elementary School Children: A Field Study. *Environment and Behavior*, 42(5), 659-692.

Lan, L., Xia, L., Hejjo, R., Wyon, D.P. and Wargocki, P. (2020) Perceived air quality and cognitive performance decrease at moderately raised indoor temperatures even when clothed for comfort. *Indoor Air* (DOI: 10.1111/ina.12685)

- Li, Y., Leung, G. M., Tang, J. W., Yang, X., Chao, C. Y., Lin, J. Z., ... & Sleigh, A. C. (2007). Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment—a multidisciplinary systematic review. *Indoor air*, 17(1), 2-18.
- Li, D., & Sullivan, W. C. (2016). Impact of views to school landscapes on recovery from stress and mental fatigue. *Landscape and urban planning*, 148, 149-158.
- Ljung, R., Sörqvist, P., & Hygge, S. (2009). Effects of road traffic noise and irrelevant speech on children's reading and mathematical performance. *Noise and Health*, 11(45), 194-198.
- Ljung, R., Sörqvist, P., Kjellberg, A., & Green, A. M. (2009). Poor listening conditions impair memory for intelligible lectures: Implications for acoustic classroom standards. *Building Acoustics*, 16(3), 257-265.
- Madsen et al. (2020) Samfundsøkonomiske gevinster ved forbedret indeklima, Incentive.
- Matsuoka, R. H. (2010). Student performance and high school landscapes: Examining the links. *Landscape and urban planning*, 97(4), 273-282.
- Melikov, A. K. (2020). COVID-19: Reduction of airborne transmission needs a paradigm shift in ventilation. *Building and Environment*.
- Melikov, A. K., Ai, Z. T., & Markov, D. G. (2020). Intermittent occupancy combined with ventilation: An efficient strategy for the reduction of airborne transmission indoors. *Science of the Total Environment*, 744, 140908.
- Mendell, M. J., Eliseeva, E. A., Davies, M. M., Spears, M., Lobscheid, A., Fisk, W. J., & Apte, M. G. (2013). Association of classroom ventilation with reduced illness absence: a prospective study in California elementary schools. *Indoor air*, 23(6), 515-528.
- Mendell, M. J., Eliseeva, E. A., Davies, M. M., & Lobscheid, A. (2016). Do classroom ventilation rates in California elementary schools influence standardized test scores? Results from a prospective study. *Indoor Air*, 26(4), 546-557.
- Mott, M. S., Robinson, D. H., Walden, A., Burnette, J., & Rutherford, A. S. (2012). Illuminating the effects of dynamic lighting on student learning. *Sage Open*, 2(2), 2158244012445585.
- Park, J. (2016). Temperature, test scores, and educational attainment. Unpublished working paper, Boston, MA., 2016.
- Salis, L. C. R., Abadie, M., Wargocki, P., & Rode, C. (2017). Towards the definition of indicators for the assessment of indoor air quality and energy performance in low-energy residential buildings. *Energy and Buildings*, 152, 492-502.
- Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., & Fisk, W. J. (2012). Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. *Environmental health perspectives*, 120(12), 1671-1677.
- Shriram, S., Ramamurthy, K. and Ramakrishnan, S. (2019) Effect of occupant-induced indoor CO₂ concentration and bioeffluents on human physiology using a spirometric test. *Building and Environment*, 149, 58-67
- Seppänen, O. A., & Fisk, W. (2006). Some quantitative relations between indoor environmental quality and work performance or health. *Hvac&R Research*, 12(4), 957-973.
- Slotsholm A/S (2012) Samfundsøkonomiske konsekvenser af bedre luftkvalitet i grundskolen. www.slotsholm.dk
- Studer, P., Brucker, J. M., Haag, C., Van Doren, J., Moll, G. H., Heinrich, H., & Kratz, O. (2019). Effects of blue- and red-enriched light on attention and sleep in typically developing adolescents. *Physiology & behavior*, 199, 11-19.
- Ulrich, R. S. (1984) View through a window may influence recovery from surgery *Science*, 224, 420-421
- Veitch, J. A. (1990). Office noise and illumination effects on reading comprehension. *Journal of Environmental Psychology*, 10(3), 209-217.
- Wargocki, P., Wyon, D. P., Sundell, J., Clausen, G., & Fanger, P. O. (2000). The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms, and productivity. *Indoor air*, 10(4), 222-236.
- Wargocki, P., Seppänen, O., Andersson, J., Clements-Croome, D., Fitzner, K., & Hanssen, S. O. (2006). Indoor climate and productivity in offices. *REHVA guidebook*, 6.
- Wargocki, P., & Wyon, D. P. (2007). The effects of moderately raised classroom temperatures and classroom ventilation rate on the performance of schoolwork by children (RP-1257). *Hvac&R Research*, 13(2), 193-220.
- Wargocki, P., Wyon, D. P., Lynge-Jensen, K., & Bornehag, C. G. (2008). The effects of electrostatic particle filtration and supply-air filter condition in classrooms on the performance of schoolwork by children (RP-1257). *Hvac&R Research*, 14(3), 327-344.
- Wargocki, P., & Wyon, D. P. (2013). Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Building and Environment*, 59, 581-589.

Wargocki, P., & Wyon, D. P. (2017). Ten questions concerning thermal and indoor air quality effects on the performance of office work and schoolwork. *Building and Environment*, 112, 359-366.

Wargocki, P., Porras-Salazar, J. A., & Contreras-Espinoza, S. (2019). The relationship between classroom temperature and children's performance in school. *Building and Environment*, 157, 197-204.

Wargocki, P., Porras-Salazar, J. A., Contreras-Espinoza, S., & Bahnfleth, W. (2020). The relationships between classroom air quality and children's performance in school. *Building and Environment*, 173, 106749.

Wyon, D. P., Fanger, P. O., Olesen, B. W., and Pederson, C. J. K. (1975). The mental performance of subjects clothed for comfort at two different air temperatures. *Ergonomics*, 18(4), 359-374

Wyon, D.P., and Wargocki, P. (2008) Window opening behavior when classroom temperature and air quality are manipulated experimentally (ASHRAE 1257-RP). Indoor Air conference, Copenhagen, Denmark - Paper ID: 119

Zhang, X., Wargocki, P., Lian, Z., & Thyregod, C. (2017). Effects of exposure to carbon dioxide and bioeffluents on perceived air quality, self-assessed acute health symptoms, and cognitive performance. *Indoor air*, 27(1), 47-64.

