



SMART ENERGY BUTIKSCENTRE - SEBUT
FORSKEL-PROJEKT 64018-0043

1.1 Projektdetaljer

Project title	Smart Energy Butikscentre - SEBUT
Project identification (program abbrev. and file)	(EUDP) 64018-0043
Name of the programme which has funded the project	ForskEi
Project managing company/institution (name and address)	Teknologisk Institut, Gregersensvej, 2630 Taastrup
Project partners	<ul style="list-style-type: none"> • A-comfort ApS • DEAS A/S • Exhausto A/S • Bitzer Electronics A/S • Neogrid Technologies ApS • New Nordic Engineering A/S • Aalborg Universitet, Institut for Elektroniske Systemer
CVR (central business register)	5697 6116
Date for submission	December 2019





” I danske butikcentre er der uforløst potentiale for energibesparelser og energifleksibilitet.

Forord

Energiforbruget i storcentre i Danmark udgør ca. 25-30% af det samlede energiforbrug i detailhandelen, og er koncentreret på forholdsvis få lokationer. Det er derfor nærliggende at antage, at der i disse centre er et uforløst potentiale for energibesparelser og energifleksibilitet.

På den baggrund har et konsortium med otte partnere gennemført projektet Smart Energy Butikcentre (SE-BUT) med støtte fra Energinet.dk's ForskEl-program, som administreres af EUDP (Journal nr.: 64018-0043).

Partnerne i SEBUT-projektet er:

- A-comfort ApS
- DEAS A/S
- Exhausto A/S

- Bitzer Electronics A/S
- Neogrid Technologies ApS
- New Nordic Engineering A/S
- Teknologisk Institut, Energieffektivisering og ventilation (Projektleder)
- Aalborg Universitet, Institut for Elektroniske Systemer.

Denne rapport beskriver projektet og er udarbejdet af **Joakim Børlum Petersen** - ph.d. studerende (Aalborg Universitet), **Pierre Vogler-Finck** – R&D forsker (Neogrid Technologies), **Henrik Lund Stærmose** - direktør (Neogrid Technologies) samt **Christian Holm Christiansen** - seniorspecialist og projektleder, **Lasse Skammelsen Trankjær** - konsulent, **Asger Skød Søvsø** - specialist,

Indhold

2	1.1 PROJEKTDETALJER
3	FORORD
5	1.2 KORT BESKRIVELSE AF FORMÅL OG RESULTATER
6	1.3 EXECUTIVE SUMMARY
8	1.4 PROJEKTETS FORMÅL
10	1.5 PROJEKTETS RESULTATER
11	<i>OM STORCENTRE - ADFÆRD, DRIFT OG ENERGIFORBRUG</i>
13	<i>CLOUD-PLATFORM TIL INTEGRATION MED CTS</i>
15	<i>STYRINGSSTRATEGIER</i>
18	<i>PERFORMANCE TESTING</i>
20	<i>KOLDING STORCENTER</i>
24	<i>CITY2</i>
29	<i>KONTORMILJØER</i>
32	<i>POTENTIALER FOR ENERGIBESPARELSER OG INDEKLIMA</i>
34	<i>POTENTIALER FOR ENERGIFLEKSIBILITET</i>
36	<i>VÆRKTØJER</i>
38	1.6 ANVENDELSE AF PROJEKTRESULTATER OG FORMIDLING
40	1.7 PROJEKTKONKLUSION OG PERSPEKTIVERING
42	LITTERATURLISTE



1.2 Kort beskrivelse af formål og resultater

I projektet Smart Energy Butikcentre er der foretaget undersøgelser, tilpasninger og demonstrationer af en række teknologier, der kan medvirke til den grønne omstilling af storcentre. Denne rapport indeholder beskrivelser af strategier til styring af HVAC baseret på MPC og hierarkisk styring, som er udviklet og implementeret i CTS-anlæg via cloud-plattform og gateway. Anvendelse af ventilationsanlæggets køleflade som varmeplade

og løsninger til fremløbstemperaturstyring af køle er ligeledes demonstreret. Elmålere og trådløse indeklima-sensorer er tilpasset og integreret i styringerne for at kunne dokumentere potentialer for energibesparelser og fleksibilitet. Projektets resultater er formidlet i artikler og ved forskellige arrangementer. Yderligere er der udviklet en værktøjskasse med metoder og anbefalinger.

The project Smart Energy Shopping Centres has been concentrated on investigations, adaptations and demonstrations of various technologies facilitating the green transition of shopping centres. This study presents the control strategies for HVAC based on MPC and hierarchical control implemented in BMS via cloud-platform and gateway. Furthermore, the employment of air handling units' cooling coil as heating coil and solutions for

control of supply temperature in cooling systems are demonstrated. Electricity meters and wireless indoor climate sensors are adapted and integrated in controllers to document potentials of energy savings and flexibility. The project results are disseminated in articles and at various event. Moreover, a toolbox is developed including methodologies and guidelines.



1.3 Executive summary

Energiforbruget i storcentre i Danmark udgør ca. 25-30% af det samlede energiforbrug i detailhandelen, og er koncentreret på forholdsvis få lokationer. Det er derfor nærliggende at antage, at der i disse centre er et uforløst potentiale for energibesparelser og energifleksibilitet. På den baggrund har et konsortium med otte partnere med Teknologisk Institut som projektleder gennemført projektet Smart Energy Butikcentre (SEBUT). Med udgangspunkt i Kolding Storcenter og City 2 er der foretaget undersøgelser, tilpasninger og demonstrationer af en række teknologier, der kan medvirke til den grønne omstilling i storcentre.

Et væsentligt resultat er nye energieffektive løsninger og strategier til styring af HVAC baseret på hierarkisk styring. Den foreslåede metode har vist et stort besparelspotentiale på op mod 20% af elforbruget til køling og ventilation. Den er samtidig relativt overskuelig og skalerbar. Metoden er succesfuldt implementeret i CTS-anlæg i Kolding Storcenter med cloud-plattform og gateway. Via et udviklet API til cloud-plattformen er sætpunkt-forwarding af signaler til CTS-anlægget baseret på metoden demonstreret.

Anvendelse af cloud-plattform og gateways har vist nye teknologiske veje til integration og opdatering af styringsstrategier. Det kan fx være relevant for ældre CTS-anlæg, hvor strategier kan opdateres uden at

hardwaren nødvendigvis skal opdateres. En anden anvendelsesmulighed kan være i forbindelse med commissioning, hvor bygherre og dennes rådgivere indirekte kan få adgang til data fra CTS-anlægget evt. suppleret med automatisk fejldetektering.

En anden udfordring, der er udviklet løsninger til, er små varmeplader i ventilationsanlæg. De kan medføre ineffektiv afkøling af fjernvarmevand, som kan være forbundet med store omkostninger. Der er i City 2 med godt resultat demonstreret et shuntarrangement, der muliggør anvendelse af kølepladen som varmeplade. Kølepladen er normalt mange gange større end varmepladen og derfor mere effektiv. I samme center er demonstreret fremløbstemperaturstyring af køleanlægget.

Endelig er der udviklet en elmåler og software til en anlægsstyring, der kan medvirke til at realisere og dokumentere energifleksibilitet i mindre ventilationsanlæg tilsluttet køling. Via cloud-plattform og sætpunkt-forwarding afprøvedes forskellige indeklimastrategier til flytning af elforbrug i et kontormiljø.

Projektets resultater er formidlet i artikler og ved forskellige arrangementer. Yderligere er der udviklet en værktøjskasse med metoder og anbefalinger

—

1.4 Projektets formål

Formål

SEBUT-projektets formål er at udvikle, demonstrere og formidle innovative energifleksible løsninger til storcentre. Det sker gennem en holistisk tilgang hvor følgende elementer indgår:

1. Krav til indeklima og andre energiydelser
2. Styring af varme, køling og ventilation
3. Vedvarende energianlæg og energiforsyninger
4. Lagringsmuligheder
5. Tekniske tiltag til energieffektivisering
6. Udnyttelse af spildvarme

Gennemførelse

Projektet er gennemført efter projektplanen i ansøgningen, der indeholder 7 arbejdsopgaver, se figur 1.

Indledningsvis (WP1) er der gennemført audits i 5 storcentre, hvor energiforbrug og installationer er screenet. For to storcentre, Koldings Storcenter og City2 i Taastrup er der udført en grundigere audit med fokus på at identificere potentielle forbedringer og demonstrationer som er relevante for centrene.

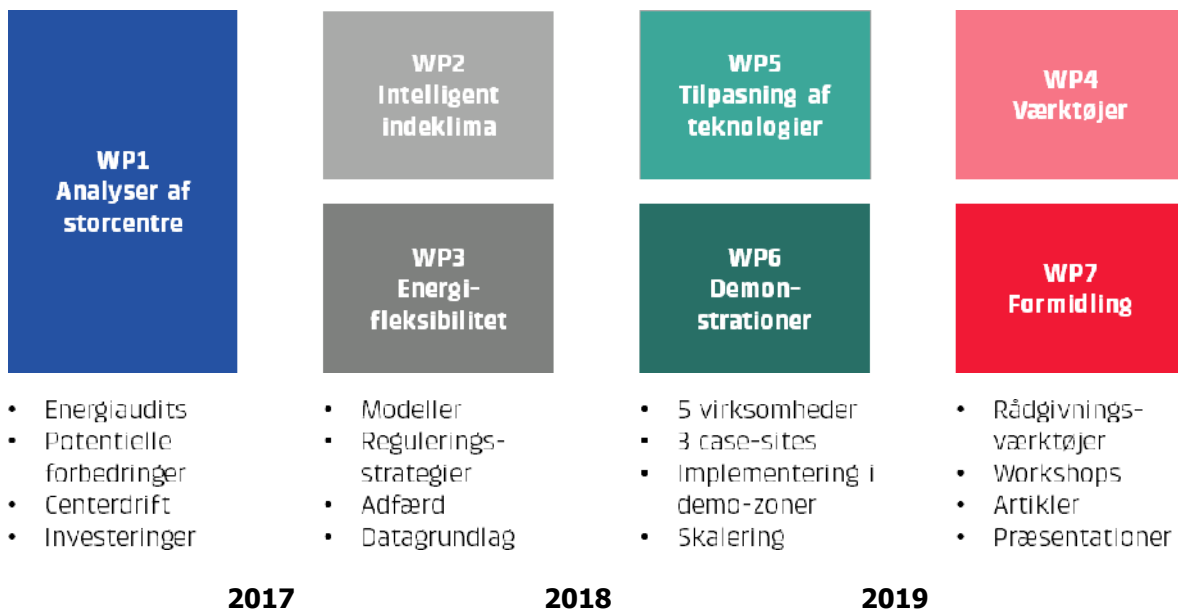
I de to efterfølgende arbejdsopgaver (WP2 og WP3) er der identificeret mindre afsnit i centrene, der kan fungere som demonstrationsområder (i det følgende kaldet demozoner). Der er i demozonerne etableret det nødvendige datagrundlag til at undersøge indeklima, energiforbrug, eksisterende regulering og adfærd. Et vigtigt element heri er installationen af gateways i CTS-systemernes

kommunikationsnet, som kommunikerer med en cloud-platform. Der er desuden installeret indeklimasensorer i butikkerne og ekstra energimålere, hvor det er relevant. I WP2 og WP3 er desuden udviklet modeller for installationer, fleksibilitet og regulering – et arbejde som primært er varetaget af projektets ph.d.- studerende.

I den efterfølgende arbejdsopgave (WP 5) har de medvirkende virksomheder tilpasset deres teknologier på baggrund af de identificerede behov i WP1 til WP3, så de kan indgå i demonstrationer i projektets demozoner (WP 6). Der er etableret demozoner i Kolding Storcenter, City2 i Taastrup samt i et kontormiljø hos en af projektpartnerne. Demonstrationerne har resulteret i 3 case-beskrivelser.

Projektets løsninger og erfaringer er løbende blevet evalueret i workshops med driftspersonale og eksterne leverandører, med henblik på at udvikle og tilbyde forskellige rådgivningsværktøjer (WP4). Projektets resultater er desuden formidlet i videnskabelige og mere populærfaglige artikler og præsenteret ved konferencer og temadage (WP 7).

Opfyldelse af projektets milepæle og tidsramme er løbende rapporteret og diskuteret med bevillingsgiver. I projektets indledende fase afventedes ansættelse af ph.d.-studerende. Det medførte tidsmæssige forskydninger af enkelte milepæle. Sammen med et ønske om at forlænge demonstrationerne ind i fyringssæsonen i den afsluttende fase medførte det en anmodning om 3 måneders forlængelse af projektperioden, som blev bevilget.



Figur 1 Oversigt over SEBUT-projektets arbejdsplaner.

Rapportopbygning

Denne rapport er bygget op på følgende måde:

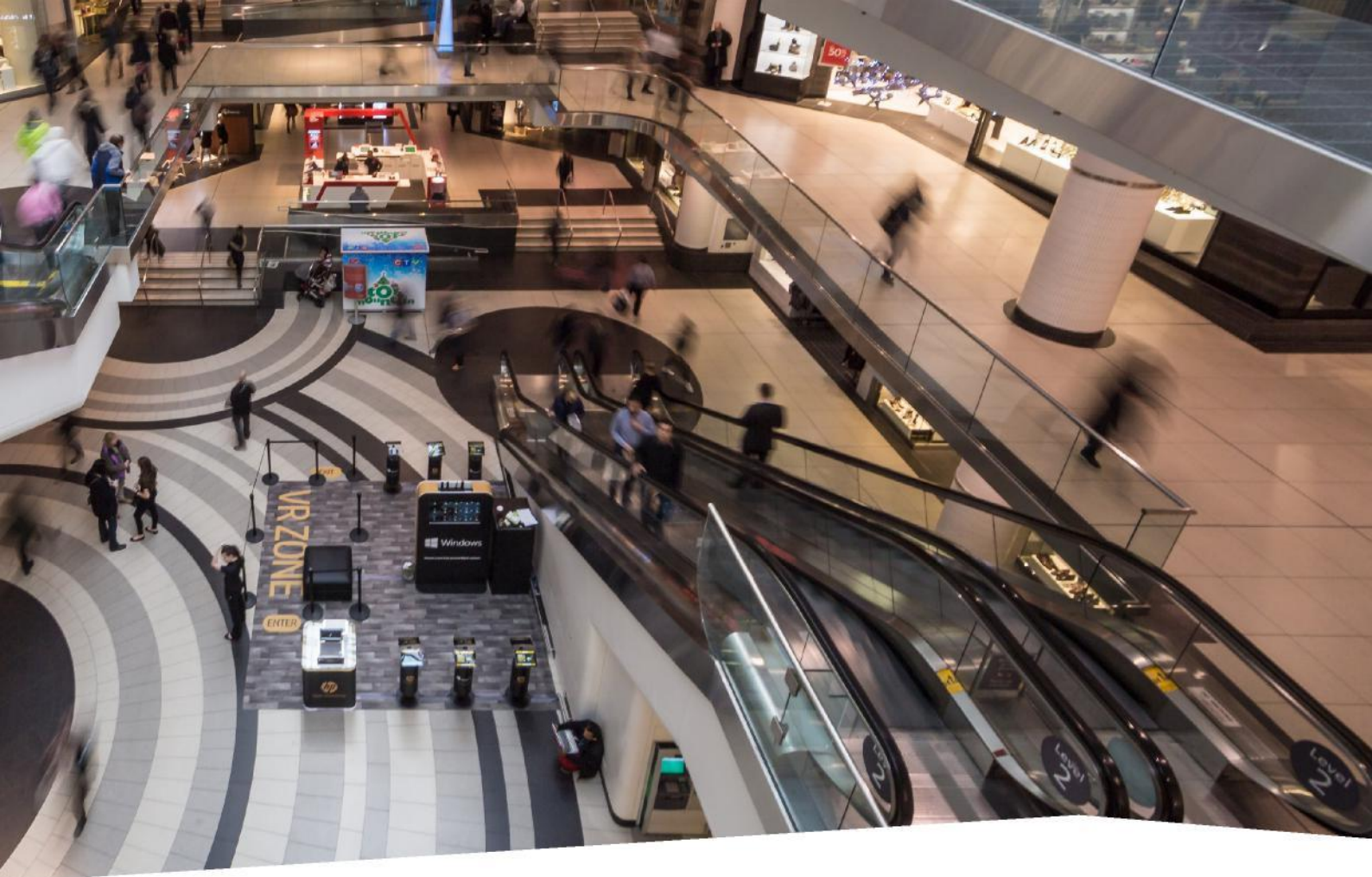
- Afsnittet *Om projektet* omhandler projektets formål, gennemførelse og opbygning.
- *Projektets fundament* beskriver projektets generelle resultater og indeholder en generel beskrivelse af storcentre og de forhold, der er særlige for denne bygningstype. Dernæst følger en beskrivelse af projektets tilgang til CTS-systemet med gateway og cloud-plattform samt forskellige muligheder for styringsstrategier. Afslutningsvis diskuteres performance testing som et redskab til at dokumentere CTS og styringsstrategier.
- *Cases* beskriver 3 cases baseret på projektets løsninger og resultater

- *Potentialer* beskriver potentialer for indeklima, energibesparelser og fleksibilitet identificeret i projektet
- *Værktøjer* beskriver de rådgivningsværktøjer, der er kommet ud af projektet
- *Forankring og formidling* beskriver, hvordan projektets resultater og løsninger kommer i spil.
- *Konklusioner og perspektiver* beskriver hvad der er opnået og hvad der kan bygges videre på.
- *Litteratur* beskriver dels projektets egne publikationer, dels relevant litteratur fra litteraturstudier udført i projektet.

I rapporten er artikler og publikationer nummereret. Der refereres løbende til litteraturlisten således: eks. [1-3]



1.5 Projektets resultater



Om storcentre - adfærd, drift og energiforbrug

Anvendelse

Der er i Danmark flere end 100 større storcentre (>5000 m²) med i alt 2 mio. m² udlejningsarealer og estimeret ca. 1,3 mio. m² fællesareal. Til sammen udgør de ca. 25-30% af det samlede energiforbrug i detailhandlen.

I storcentre lejer butiksindehavere et butikslejemål, hvor de efterfølgende selv står for indretningen af lejemålet. Udlejningsarealerne kan groft set deles op i butikker, supermarkeder, restauranter og andet (f.eks. biografer). Som regel har hver gruppe samme åbningstider. Biografer og spisesteder er dog en undtagelse. Disse har ofte andre åbningstider, som potentielt gør, at det er nødvendigt at holde alle fællesfunktioner åbene og i drift i længere tid.

Der er ofte en stor forskel på beklædningen for kunder og personale. Om vinteren kommer kunderne i varmt overtøj, mens personalet er påklædt ud fra at skulle opholde sig indendørs. Om sommeren er det den modsatte situation. Kunderne kommer i lettere påklædning, mens noget personale er påkrævet en varmere dresscode. Det giver udfordringer med at fastlægge retningslinjer for hvor hvilken temperatur der skal til for at skabe et godt termisk indeklima.

Den operative temperatur i butikkerne skal fastlægges i samarbejde med og efter de enkelte butikkers ønsker. Alt efter hvilken indeklimaklasse der ønskes, kan der tillades et tempera-turudsving på 1°C, 2°C eller 3°C om sommeren og 1,5°C, 3°C eller 4°C om vinteren for hhv. indeklimaklasse A, B og C iht. Standarden DS 1752.

Energiforbrug og drift

Mange af de energiforbrugende installationer, der kan være i et lejemål, vælger butikken selv. Det er primært belysning og her tages der sjældent hensyn til energiforbrug.

Centret og dets driftsorganisation står for at drive de tilhørende HVAC-anlæg, som skal til for at sørge for at indeklimaet er acceptabelt i butikkerne. Der er dog nogle lejere som har et ekstraordinært behov for køling eller ventilation, som løses i form af split-køleanlæg eller emhætter.

Energiforbruget fra de installationer som er installeret decentralt ude i butikkerne, afregnes via egen energimåler/elmåler. Energiafregningen for fællesinstallationer sker som oftest ved brug af fordelingsregnskaber vægtet ud fra det lejede arealer.

Projektet har overvejende taget udgangspunkt i storcentre Kolding Storcenter (KSC) og City2 i Taastrup, der administreres af DEAS A/S. Begge centre er karakteriseret ved mange ventilationsaggregater og omfattende CTS-anlæg, men adskiller sig på kølesiden. I Kolding Storcenter er der en række chillere placeret på tag, der forsyner grupper af butikker med individuelle fancoils – I City2 er der én stor kølecentral, der via køleledning forsyner køleflader i ventilationsaggregaterne.

Menneskelige barrierer og potentialer for energieffektivisering

Som det fremgår af ovenstående afsnit hænger anvendelse, energiforbrug og drift sammen. Energieffektiv drift i butikcentre handler altså om mere end de rent tekniske forhold. Menneskelige faktorer spiller også en afgørende rolle og skaber både barrierer og potentialer for energieffektivisering. Projektet har derfor også et

adfærdsmæssigt perspektiv med fokus på energiadfærd og brugernes indflydelse på energiforbrug og drift.

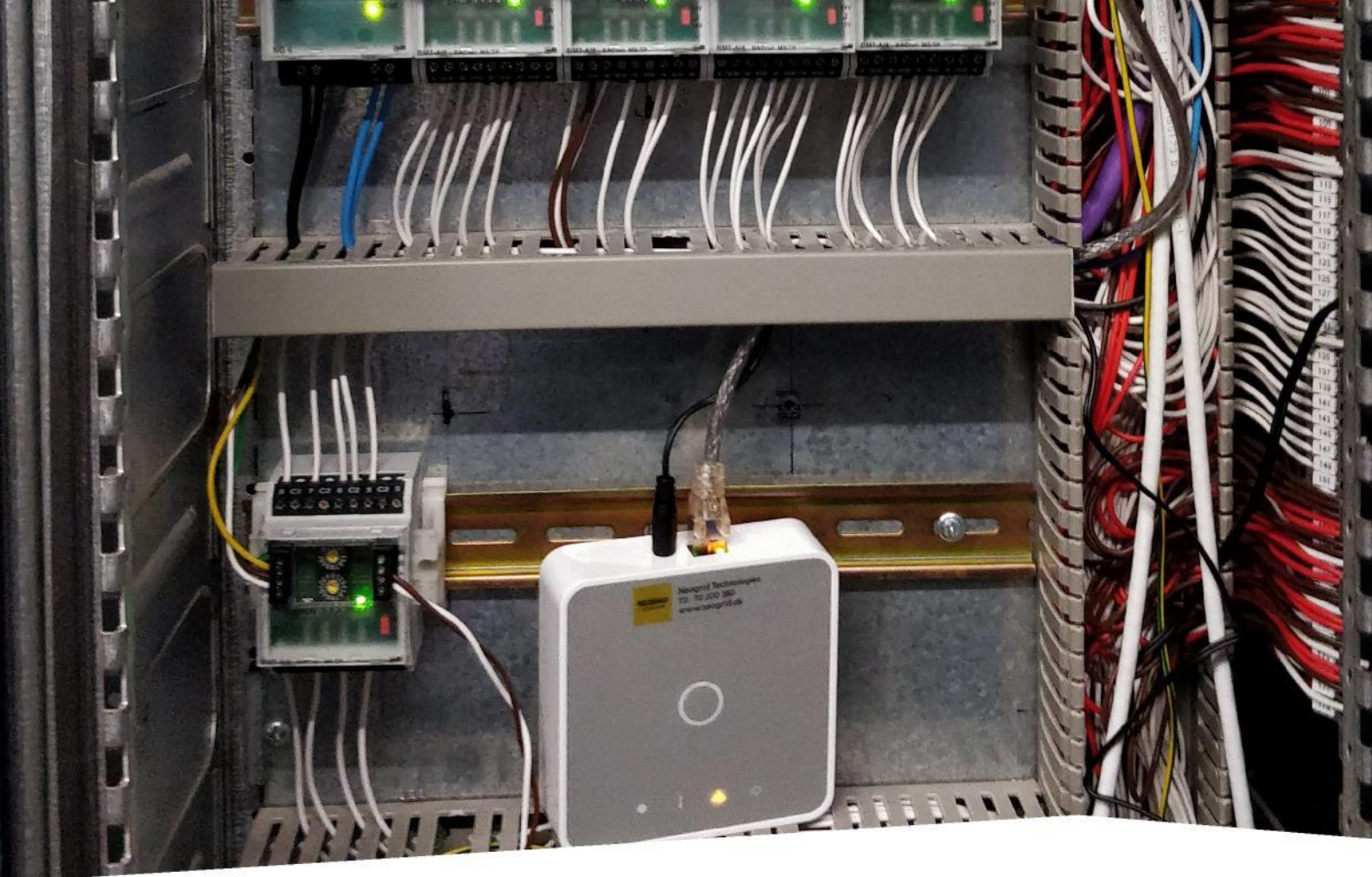
Der er gennemført et litteraturstudie, som primært har taget udgangspunkt i brugeradfærd og præferencer hos forskellige interessenter i butikcentre [13-23]. 'Brugere' er ikke en ensartet gruppe med identiske behov. For butikcentre er de primære målgrupper ejer, lejer og kunder. Hver gruppe er karakteriseret ved forskellig motivation og barrierer for energioptimering. Samtidig anskues butikcentre i forskellige perspektiver. For ejeren er økonomi det afgørende, mens lejerens prioritet er et godt indeklima for ansatte og kunder. Brugere har fokus på brugeroplevelsen [13]. I tabellen nederst uddybes målgruppernes prioriteter.

Driftspersonalets betydning

En brugergruppe som ofte overses er driftspersonale. I projektet er litteraturstudiet derfor suppleret med at udføre antropologiske undersøgelser af driftspersonalets betydning for energieffektiv drift.

Teknologisk Instituts energiantropologer har udført interviews og observationer i både Kolding Storcenter og City2. Det er gennemgående for begge centre at særligt de driftsansvarliges kompetencer og muligheder for at arbejde målrettet med energieffektivisering har betydning, hvis teknologierne potentiale skal udnyttes optimalt. Et stærkt fokus på energieffektiv drift udfordres af de konstante ad hoc-opgaver, som er en stor del af arbejdet som driftsansvarlig. Arbejdet med CTS-systemet kan derfor blive sporadisk og de løbende korrektioner som udføres efter butikernes ønsker bliver svære at bevare overblikket over. Det er derfor afgørende at drift og optimering af CTS defineres som en prioriteret arbejdsopgave, hvis energieffektiv drift skal realiseres.

	Motivation	Barriere	Perspektiv
Ejer	Reducerede energiomkostninger, kundetilfredshed og arkitektonisk kvalitet ser ejerne som de vigtigste områder i forhold til at skulle opgradere butikcentre. Omkostningen ligger langt nede af listen, og bliver vægtet mindre end kvaliteten af indeklimaet.	Ingen beslutningskraft i forhold til de enkelte butikkers forbrug.	Økonomi
Lejer	Kundetilfredshed, indeklima og de ansattes tilfredshed ligger i toppen af butiksejernes prioriteringer. Omkostninger og reduceret energiforbrug følger lige efter.	Hvis kunder og ansatte udtrykker tilfredshed bortfalder motivation for energieffektivisering.	Indeklima
Kunder	Lokation, et bredt udvalg af produkter og billige priser ligger i toppen af vigtige faktorer for kundernes valg af butikcenter. Energieffektivitet og grønne bygningscertifikater ligger i bunden.	Manglende interesse.	Brugeroplevelse



Cloud-plattform til integration med CTS

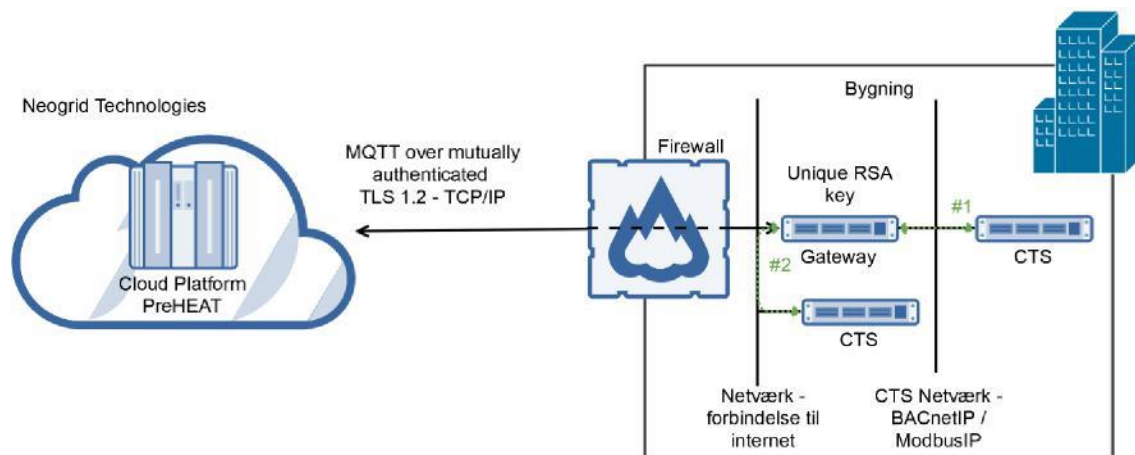
I de fleste CTS-systemer er der mulighed for trend-logning og udveksling af data på et eller andet plan. Mulighederne er bl.a. afhængig af systemernes fabrikat, alder, opsætning og generelle åbenhed og kan variere fra system til system. For at lette integrationen blev det i SEBUT-projektet besluttet at prøve at tilgå CTS-anlæggene udenom den normale CTS-brugerflade.

Løsningen blev at installere en gateway i kommunikationsnettet, der kan kommunikere med cloud-plattformen PreHEAT fra Neogrid Technologies ApS. Anvendelsen af en cloud-plattform giver forskellige muligheder for visualisering af data og for at implementere en overordnet styringsstrategi.

Fysisk infrastruktur til dataopsamling

For at kunne levere visualisering og overordnede styringsstrategier til bygninger med CTS-anlæg, er der behov for, at cloud-plattformen kan komme i indgreb med CTS-systemet, som oftest er placeret lokalt i bygningen. De to systemer forbindes ved hjælp af en gateway, der både sørger for at data kan hentes til cloud-plattformen og returneres fx i form optimale styresignaler.

En af udfordringerne er, at CTS-systemerne oftest kører på lukkede netværk placeret bag firewalls, der skærmer af for alt udefra- og indefra-kommende trafik. Gatewayen skal placeres i det lokale net og skal kunne kommunikere med CTS-systemets hovedstationer (eller understationer) via eksisterende protokoller og sammen med en internetforbindelse, som bruges til at etable-



Figur 2 Neogrids setup til dataopsamling i bygninger med CTS-system.

re en sikker kontakt til cloud-plattformen. Setup'et er afbilledet i Figur 2 ovenfor.

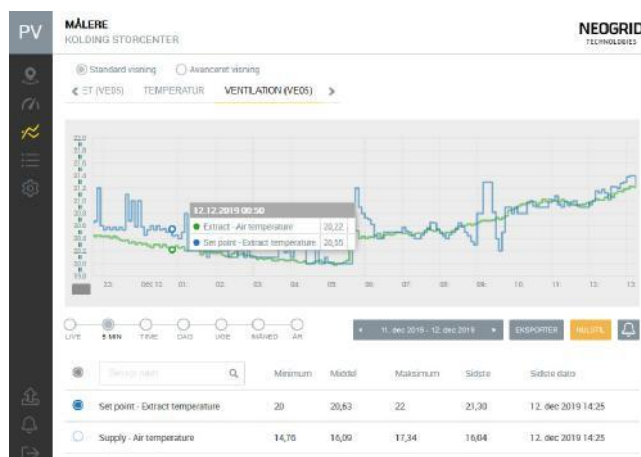
Figuren viser to måder at få indgreb med CTS-systemet:

1. Gatewayen er placeret lokalt i bygningen og har forbindelse til både BACnetIP/ModbusIP-nettet samt den del af netværket, der har adgang til internet-tet. BACnetIP/ModbusIP-nettet er adskilt fra det generelle netværk i bygningen.
2. Kommunikationen til CTS-systemet foregår via det generelle netværk i bygningen. På det generelle netværk, vil der typisk også kunne forbindes til internettet. Gatewayen er placeret på det generelle net.

For at kommunikere med PreHEAT Cloud opretter gatewayen en krypteret MQTT-forbindelse over internettet. Forbindelsen er sikret med certifikater i begge ender, så det kun er udstyr med disse certifikater, der kan få forbindelse.

Visualisering og management platform

Når data er kommet ind i PreHEAT cloud er det muligt at visualisere den via det indbyggede web-interface.



Figur 3 Visualiseringsmuligheder i PreHEAT web-interface.

Web-interfacet supporterer visning af tidsserier af data i forskellige intervaller: Live, 5 minutter, time, dag, uge, måned og år. Et eksempel på brugerfladen er vist på figur 3. Udover visualisering har brugeren også mulighed for at oprette alarmer på signalerne og eksportere data til Excel-regneark for yderligere analyser.

Kortlægning af data

PreHEAT platformen gør det muligt at mappe signaler fra CTS-anlægget over i en datamodel, der beskriver de forskellige parametre i den kontekst de anvendes. Når signalerne er organiseret i datamodellen, kan de lettere forstås af operatører og andre, der skal anvende dem.

Web-API til dataudtræk og avanceret styring

For at supportere yderligere analyser og udvikling af avancerede styreprogrammer, har Neogrid Technologies ApS i samarbejde med Aalborg Universitet udviklet et webbaseret Application Programming Interface (API) og værktøjer til integration med Python og Matlab. API'et tillader dataudtræk til dataanalyseprogrammer, som kan bruges til avanceret dataanalyse f.eks. til performance evaluering eller fejlfinding.

API'et supporterer også forwarding af signaler til CTS-systemet, hvilket gør det muligt, at levere optimale sætpunkter til styringen og bygge en hierarkisk styring, hvor højere niveauer kan beregnes i clouden. Sætpunkt-forwarding har været demonstreret i projektet, hvor det har været anvendt af Aalborg Universitet til demonstrationer af styringsstrategier.

```

setup(self):
shoot = self.model.get_rk4_single_step(self.dt)

N = self.horizon

p = self.opti.parameter(self.model.p.size)

X = OptVar("state", self.model.x, N + 1, self.opti)
U = OptVar("input", self.model.u, N, self.opti)

# Control related state and input
ctrl_state = ca.tools.struct_symMX(self.u_ctrl)
U_ctrl = OptVar("control state", ctrl_state, N + 1, self.opti)
ctrl_derivative = ca.tools.struct_symMX(["d" + s for s in self.u_ctrl])
dU_ctrl = OptVar("control_derivative", ctrl_derivative, N, self.opti)

# Exogenous inputs
self.u_exog = [i for i in self.model.u.keys() if i not in self.u_ctrl]
U_exog = self.opti.parameter(self.model.u.size - len(self.u_ctrl), N)

U_ctrl.entries["T_vent_r"].minimum = 12
U_ctrl.entries["T_vent_r"].maximum = 25
U_ctrl.entries["T_fwd_cool_r"].minimum = 7
U_ctrl.entries["T_fwd_cool_r"].maximum = 25

all_bounded = (
    list(X.entries.values())
    + list(U_ctrl.entries.values())
    + list(dU_ctrl.entries.values())
    + list(Z.entries.values())
)
for variable in all_bounded:
    self.opti.subject_to(
        self.opti.bounded(variable.minimum, variable.symbolic, variable.maximum)
    )

X0 = self.opti.parameter(self.model.x.size)

# Gap-closing shooting constraints
for k in range(N):
    self.opti.subject_to(
        X.opti.variable[:, k + 1]
        == shoot(X.opti.variable[:, k], U.opti_variable[:, k], p)
    )

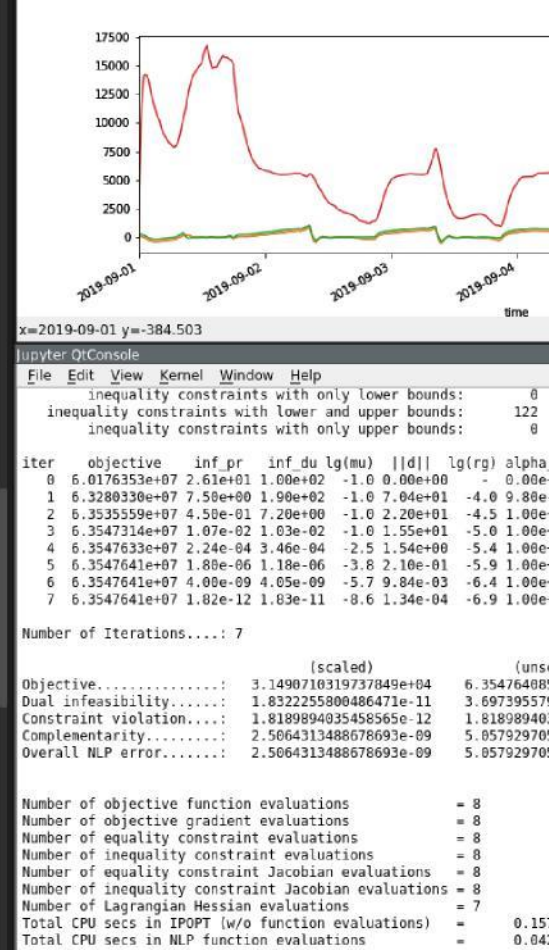
    self.opti.subject_to(
        U_ctrl.opti.variable[:, k + 1]
        == U_ctrl.opti.variable[:, k] + dU_ctrl.opti_variable[:, k]
    )

# Fix controls
self.opti.subject_to(U.subvariable(self.u_ctrl) == U_ctrl.opti_variable[:, 0:-1])

# Fix exogenous inputs
self.opti.subject_to(U.subvariable(self.u_exog) == U_exog)

# Initialize
self.opti.subject_to(X.opti.variable[:, 0] == X0)

```



Styringsstrategier

En række forskellige styringsstrategier er blevet undersøgt af projektets ph.d.-studerende fra Aalborg Universitet. Fælles for dem alle har været ønsket om at de skulle være forholdsvis nemme at realisere/implementere i projektets storcentre. Hidtil har forskning i styringsstrategier til HVAC i bygninger hovedsageligt været baseret på Model Predictive Control (MPC). Denne tilgang har dog vist sig at være mindre hensigtsmæssig givet det store arbejde, der ligger i at opstille og vedligeholde de modeller der kræves til MPC. Det er samtidig en forholdsvis kompleks metode, der kan være svær at gennemskue for dem der skal udføre og anvende styringen i praksis.

Til trods for dette, har store dele af arbejdet med styringsstrategier i SEBUT været modelbaseret. I første om-

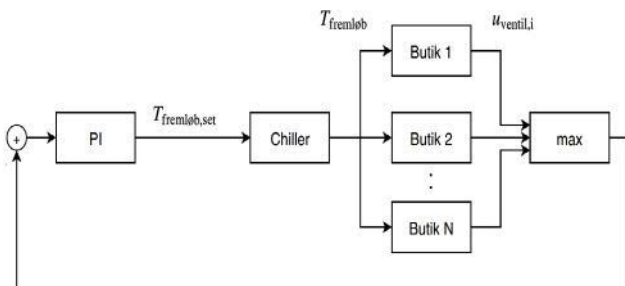
gang for at forsøge at lave en simpel model, der var nem at rekonfigurere og genbruge til forskellige storcentre, men videre også for at kunne designe modelbaserede strategier, som kunne bruges som sammenligningsgrundlag for mindre komplekse metoder. Der er taget udgangspunkt i eksisterende viden på området [7-12]. Strategierne er formidlet i en række artikler, [1-5], og kan sammenfattes i følgende hovedoverskrifter:

- Chiller/kølemaskine fremløbstemperaturstyring for højere effektivitet
- MPC til aktivering af energifleksibilitet
- MPC til at minimere køleforbrug
- Mindre kompleks og lettere realiserbar løsning til mere effektiv drift

Chiller/kølemaskine fremløbstemperaturstyring for højere effektivitet

Denne strategi har til formål at øge effektiviteten af chiller/kølemaskine ved at drifte med højere fremløbstemperatur. Dette kan gøres ved at tilbagekoble ventilåbningssignaler og styre efter den ventil der er tættest på fuldt åben (styre efter hårdeste belastning). Styringen hertil kan være en forholdsvis simpel PI regulator, se figur 4. Denne strategi kan forholdsvis nemt bygges ovenpå eksisterende styring, da den kun kræver mulighed for at styre fremløbstemperatur, samt udlæse ventilåbningssignaler. Potentialet for strategien er undersøgt gennem simuleringstudier.

Strategien har både anvendelse i fancoil baserede HVAC systemer, som Kolding Storcenter, hvor en chiller leverer køling til køleflader i fancoils – her kan ventilåbningssignaler fra fancoils tilbagekobles. Men samme strategi kan også benyttes i City2, hvor fremløbstemperatur fra de centrale kølemaskiner kan styres ud fra udlæsning af ventilåbningssignaler fra de enkelte ventilationsanlæg.



Figur 4 Skitse af simpel PI regulator med tilbagekobling af ventilåbningssignaler fra butikker.

MPC til aktivering af energifleksibilitet

Under arbejdet med styringsstrategier er det også undersøgt hvorledes energifleksibilitet kan aktiveres. Her har udgangspunktet været at bruge MPC og igennem denne sætte krav til effektforbrug/energiforbrug i bestemte tidsrum for at flytte forbruget. Forbruget flyttes ved at udnytte rumtemperatur komfortbåndet. Den fleksibilitet, der kan leveres, er derfor afhængig af temperaturdynamikken (varmetransmission, termisk masse) - altså hvor hurtigt temperaturen i de enkelte butikker ændrer sig, på baggrund af ændring i drift.

Gennem simuleringstudier er undersøgt hvorledes MPC, ved at manipulere med driften af en chiller, der leverer køling til fancoils, kunne sænke elforbruget i én time, uden at overskride fastsatte krav til rumtemperaturen. Potentialet er evalueret sidst i rapporten.

MPC til at minimere køleforbrug

MPC er videre blevet brugt som reference for at udforske mulighederne for at minimere køleforbruget. Præmissen er, at det kan være svært at opstille en mindre kompleks reguleringsstrategi uden først at vide (1) hvad potentialet er, og (2) hvordan dette opnås. Med udgangspunkt i en model af temperaturdynamikken i et HVAC-system svarende til det i Kolding Storcenter, blev en ikke-lineær MPC designet til at minimere brugen af køling.

Det mest slående resultat var at opdage, at manglende koordinering imellem styring af fancoils, ventilation og chiller gør, at der i visse tilfælde bruges en masse energi på at varme luft op i ventilationsanlægget for efterfølgende at køle det ned igen i fancoils. Simuleringstudier viste, at det kunne undgås med den designede MPC, og at der var betydelige energibesparelser at hente. Studierne viste også at besparelserne potentielt ville kunne opnås med en simplere strategi end MPC.

Mindre kompleks og lettere realiserbar løsning til mere effektiv drift

For at opnå samme fordele som brugen af MPC har vist, men uden det samme behov for at bygge en nøjagtig model, er det blevet forsøgt at formulere en styringsstrategi, der introducerer den nødvendige koordinering ovenpå den eksisterende styring. Udover at spare arbejdet med at opstille en model er en af fordelene også, at den lavere kompleksitet gør metoden mere gennemskuelig og derved forhåbentligt lettere at adoptere af operatører.

Grundtanken bag metoden er at forsøge at balancere produktion, Q_{produced} , og efterspørgsel, Q_{demand} , af varme/køling, ved at minimere afvigelsen:

$$\Delta Q_{\text{shop}} = \sum \Delta Q_{\text{shop},i} = Q_{\text{demand}} - Q_{\text{produced}}$$

Når $\Delta Q_{\text{shop}} = 0$ er systemet balanceret, i den betragtning at alle butikkerne har nok varme-/køle-kapacitet til at dække deres behov, resulterende i at butikstemperaturerne kan styres til de ønskede temperaturer. I de fleste tilfælde kan beregningen af Q_{produced} baseres på de ak-

tuelle styre- og målersignaler for ventilationsanlægget og evt. kølemaskine/chiller, som situationen er i Kolding Storcenter. Derimod er det sværere at beregne Q_{demand} , uden at modellere varme-/kølebehovet i de enkelte butikker. For at komme om ved det gøres i stedet brug af de ofte i CTS-systemerne tilgængelige fejlsignaler fra butikernes temperaturstyring, e_i og afvigelsen estimeres som:

$$\Delta Q_{shop,i} = \dot{m}_{vent,nom,i} C_{p,air} \theta_i$$

Hvor $\dot{m}_{vent,nom,i}$ er nominelt flow af luft leveret til den enkelte butik og $c_{p,air}$ er specifik varmekapacitet for luft. Afvigelsen estimeres som et varmeflow og skaleres til den enkelte butik baseret på den nominelle luftmængde der leveres hertil.

Med antagelsen om, at ΔQ_{shop} og $\dot{Q}_{produced}$ kan beregnes, kan ønsket om at minimere ΔQ_{shop} formuleres som:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{produced,r} &= \dot{Q}_{produced} + \Delta \dot{Q}_{shop} \\ \dot{Q}_{produced} &\rightarrow \dot{Q}_{produced,r} \text{ for } t \rightarrow \infty \end{aligned}$$

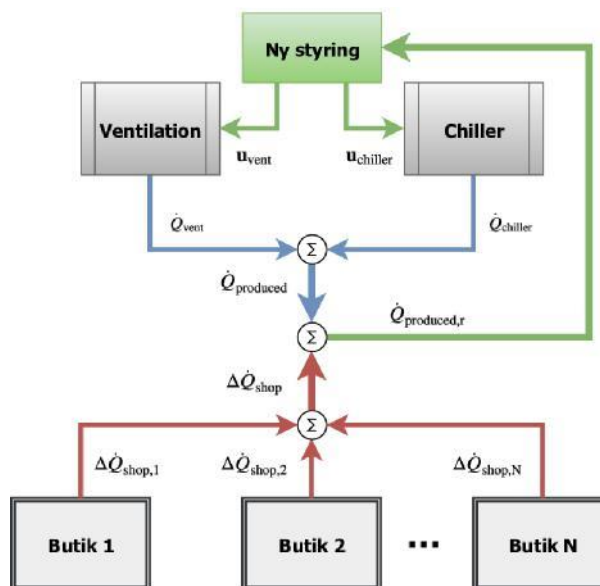
Når $\dot{Q}_{produced,r}$ er beregnet vides, hvad der bør produceres for at butikkerne får dækket deres opvarmnings-/kølebehov. Styringsstrategien er skitseret i figur 5 for en demo-zone i Kolding Storcenter. Herfra er det et spørgsmål om at justere sætninger/driftsindstillinger. I tilfælde af at køling kan leveres til butikkerne på flere måder, tilføjes endnu et lag, der skal sikre, at behovet dækkes "billigst" muligt, når forskellige sætninger kan være i konkurrence om at dække de samme behov.

Her tyes til at opstille et optimeringsproblem, hvori omkostningerne (fx energiforbrug, energipris, CO₂-emissioner mv.) vægtes ved at bruge forskellige kombinationer af sætninger.

Selvom metoden kræver løsning af et optimeringsproblem, er der her tale om et problem med langt lavere beregningsmæssig kompleksitet end for en MPC. Dette især fordi metoden ikke inddrager en dynamisk model, som er beregningsmæssig tung. Det er væsentligt i storcentre med potentielt hundredvis af butikker. Metoden er derfor forholdsvis let at skalere til forskellige størrelser af storcentre og til forskellige udformninger af HVAC, som også har vist sig igennem SEBUT-projektet.

Metoden beskrevet her, er tilpas generisk til at kunne dække både CAV, VAV, decentrale og centrale anlæg.

Der vil altid være en eller flere forbrugere og en eller flere producenter af ventilation/varme/køling – og deres forbrug og produktion bør balanceres for at potentielt hæve systemeffektiviteten, og dette bør gøres ud fra, hvad det koster at dække forbrugernes behov ved at bruge de forskellige producenter.



Figur 5 Ny styringsstrategi til koordinering af behov og produktion i HVAC-anlæg som i Kolding Storcenter med ventilationsaggregat, chiller og fancoils i butikkerne.



Performance testing

Adgangen til data fra CTS og muligheden for at studere data i detaljen har været lidt af en øjenåbner. Der er i de eksisterende systemer fundet forskellige defekter, fejl og uhensigtsmæssigheder, som ikke var blevet afsløret uden SEBUT-projektet. Det betyder, at der er et væsentligt potentiale for forbedringer, hvis anlæggenes performance analyseres og strategierne tilrettes. For nye CTS-anlæg anvendes begreber/metoder som performance testing, funktionsafprøvning og commissioning som alle bidrager til kvalitetssikringen af anlæggene.

I SEBUT-projektets værktøjskasse er beskrevet en række detaljerede procedurer for funktionsafprøvning af CTS-anlæg. Nogle af dem er afprøvet på en del af et nyt CTS-anlæg i City2 og viste bl.a. vigtigheden af at placere følere og sensorer hensigtsmæssigt.

Registreringsskemaer

Registreringsskema til test nr. 1

CTS-anlæg, automatik

Anlægsnummer	Udført af	Dato

Beskrivelse af hvilke forudsætninger og forhold målinger er udført under

Målepunkter (angiv hvor målingerne er foretaget)

Anvendt måleudstyr	
Type	Kalibreringsdato

Målepunkt	Taq nummer	Målt værdi	Værdi ifølge CTS-anlæg	Afvigelse [%]

Figur 6 Registreringsskema til performance testing.

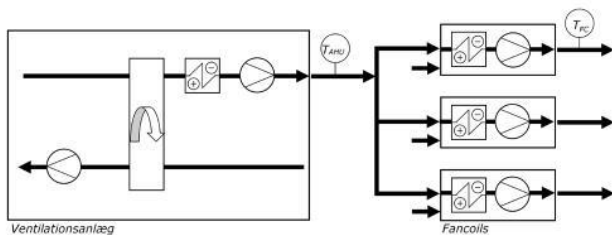
—



Kolding Storcenter

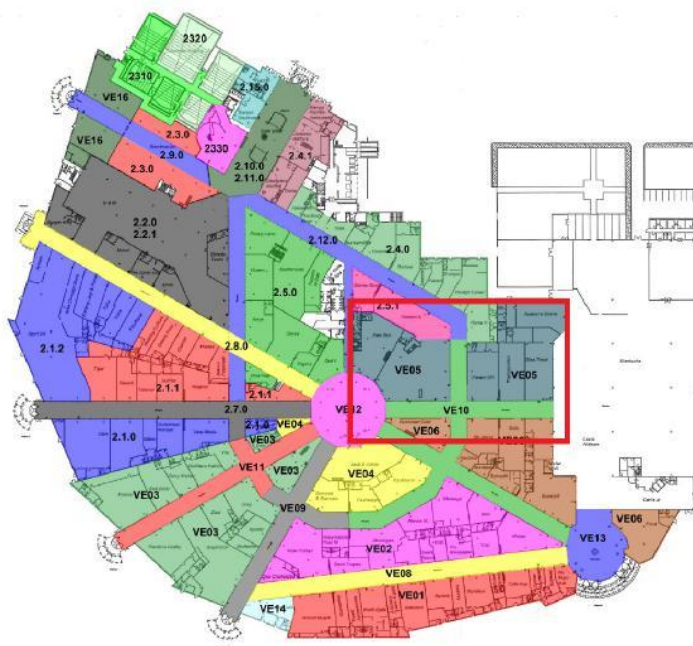
Kolding Storcenter er opført i to faser i 1990'erne. Den første fase har gennemgået en opdatering af installationer og CTS i 2015, den anden har det oprindelige CTS-anlæg.

Centret ventileres af en række ventilationsanlæg med tilhørende køleanlæg. Luften konditioneres yderligere i hver enkelt butik, som alle har egne fancoils, inden den indblæses. De lokale fancoils har både køle- og varme-flader, se figur 7.



Figur 7 Skitse af ventilationsanlæg, der forsyner butikker med friskluft, der konditioneres i fancoils i butikkerne.

Demozone



Figur 8 Skitse af Kolding Storcenter inkl. demozone.

Der er i Kolding Storcenter oprettet en demozone, der består af tre butikker og tilhørende gangareal. Demozonen dækker ca. 5% af centeret og er placeret i den første og opdaterede fase af centret.

Demozonen er etableret for at skabe et miljø, hvor det er muligt at afprøve forskellige styringsstrategier, samtidig med at indeklima, energiforbrug og driftsparametre registreres. Demozonens placering i centret er vist på figur 8. Figuren skitserer Kolding Storcenter med farvemarkering af alle områder dækket af ventilationsaggregater. Den kraftige røde firkant markerer projektets demozone, hvor butikkerne forsynes af ventilationsaggregat VE05 og chiller KU05.

Centret er udstyret med et energistyringsystem, der opsamler data fra hovedmålere og en række bimålere. For at skabe et mere detaljeret datagrundlag, er der etableret følgende supplerende måle-punkter i demozonen:

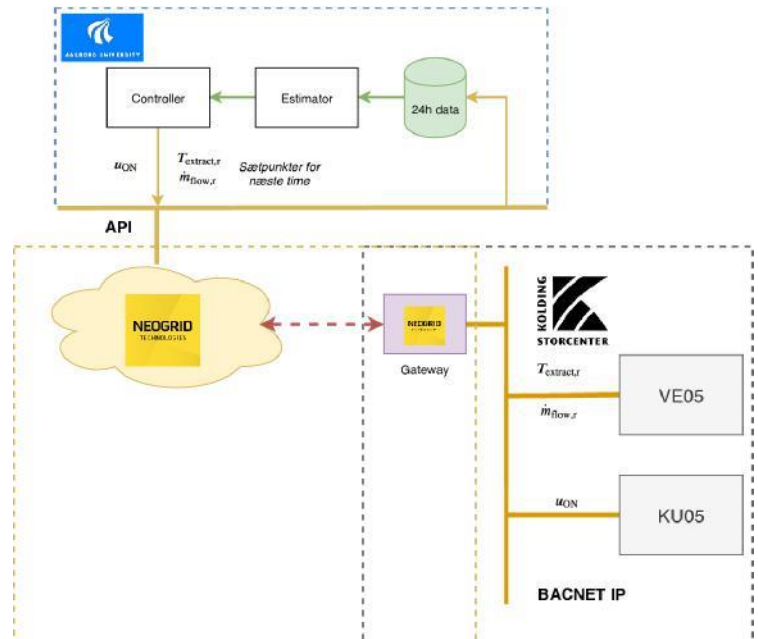
- 19 indeklimaloggere, hvoraf de 16 er fra New Nordic Engineering A/S (nDEC, nSENSOR). Disse er installeret i butikker og på gangareal. Der logges temperatur, CO2 og relativ luftfugtighed
- Elmålere til logning af elforbrug på fancoils
- Energimålere på chiller

Derudover etableredes tidligt i projektet PreHEAT cloud-plattform og tilhørende gateway fra Neogrid Technologies ApS, for i første omgang at opsamle data fra CTS-anlægget og senere for at kunne implementere nye styringsstrategier. Det var i den forbindelse nødvendigt at tilpasse den understation i CTS-anlægget (UC25) som varetager styring af demozonens ventilationsanlæg (VE05) og chiller (KU05), da de sidder på et proprietært TrendLAN-netværk, som gatewayen ikke kan kommunikere med. Tilpasningen bestod i at eksponere på BACnet IP alle ønskede variable og sætpunkter. Mindre tilpasninger i andre understationer (UC69&UC70) var også nødvendige og blev udført af et CTS-firma.

Demonstration

I Kolding Storcenter er afprøvet den mindre komplekse og lettere realiserbare styringsstrategi, beskrevet i denne rapport's afsnit om styringsstrategier. Det har kunnet lade sig gøre ved at bygge software, der igennem API til PreHEAT cloud-plattformen kan udlæse CTS-data samt

angive nye sætpunkter. Kommunikationsdiagrammet for denne demo er illustreret i figur 9.



Figur 9 API, der forbinder AAU's styringsstrategier til PreHEAT cloud-plattformen, så der gennem gateway kan sendes styresignaler videre til ventilationsanlæg (VE05) og chiller (KU05).

Hvordan styringsstrategien er tilpasset demozonen har været afhængig af, hvilke sætpunkter der har været tilgængelige for manipulation. For det konkrete ventilationsanlæg har det været muligt at manipulere med indblæsningsluftmængden og et sætpunkt for udsugningstemperaturen. For chilleren, der leverer køling til demozonens butikker, har det været muligt at vælge driftsindstilling "tændt"/"slukket".

Det har desuden været muligt at udlæse faktiske butikstemperaturer samt ønskede butikstemperaturer, og herved bestemme fejlsignaler – afvigelsen imellem ønsket og faktisk temperatur. Disse fejlsignaler bruges i bestemmelsen af køle-/varmebehovet i de enkelte butikker, som efterfølgende aggregeres til et samlet køle-/varmebehov for hele demozonen.

Givet installationen af elmålere på både ventilationsanlæg og chiller, har det været muligt at bestemme simple empiriske modeller for elforbruget, som funktion af de tilgængelige sætpunkter/driftsindstillinger. Disse

modeller bruges i styringsstrategien som et led i løsningen af optimeringsproblemet, der går ud på at vælge de sætninger, der resulterer i det laveste effektforbrug, hvor ventilationsanlæg og chiller samtidigt og tilsammen leverer det butikkerne ønsker af opvarmning/køling.

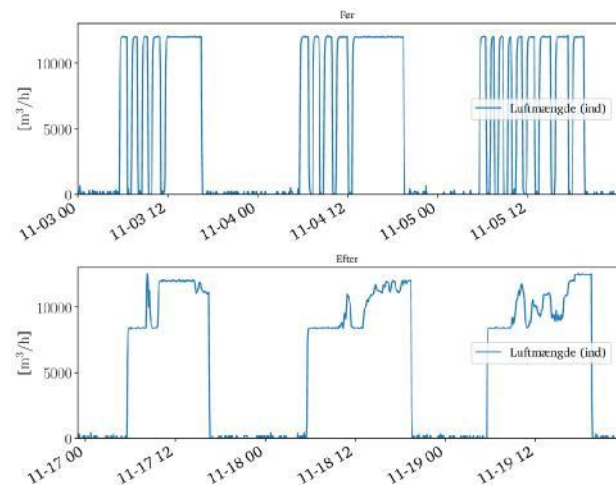
Styringsstrategien er implementeret i programmeringssproget Python og afvikles på en server på Aalborg Universitet. Hvert 5. minut samples der fra platform igennem API. Der hentes data fra demozonen for de sidste 24 timer. Dette kan virke unødvendigt, men da både udetemperatur og butikernes åbningstider resulterer i meget periodisk opførsel, se figur 10, bruges de sidste 24 timers data til at give et bud på butikernes behov ud i fremtiden.

Dette bruges til ikke bare at beregne hvordan ventilationsanlæg og chiller skal køre her og nu, men også for den kommende time. PreHEAT's API tillader skemalægning af sætninger ud i fremtiden, og der sendes således et skema med 5 minutters interval, for sætninger til ventilationsanlæg og chiller. Selvom der 5 minutter senere igen sendes et nyt skema, indfører denne tilgang en vis robusthed mod potentielt tab af forbindelse forskellige steder i kommunikationen, se diagrammet i figur 9.

Som en fall back-strategi er de sidste sætninger, i de sendte skemaer, altid standardværdien for det givne sætning - den værdi der blev kørt med, før afvikling.

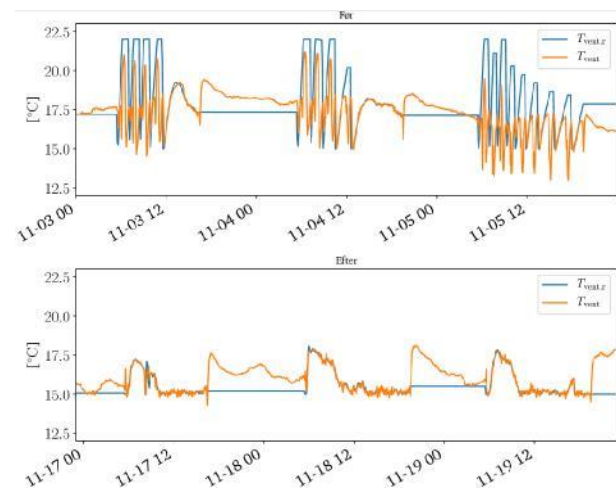
Styringsstrategien er blevet afprøvet i demozonen fra d. 8/11 2019 12:00 til d. 4/12 2019 12:00; næsten en måneds kørsel, uden at driftspersonalet i Kolding Storcenter har oplevet nogle problemer. Herunder præsenteres nogle af de interessante resultater.

På figur 10 ses indblæsningsluftmængden/-flow for to perioder af 3 dages varighed med lignende driftsforhold. "Før", som er 3 dages kørsel før den nye styringsstrategi og "Efter", som er 3 dage hvor den nye styringsstrategi afvikles. To ting er vigtige at bemærke; den nye strategi formår at udrede et problem, hvor ventilatoren tænder/slukker flere gange i løbet af dagen pga. en fejlbetonet indblæsningsstemperaturregulator. Derudover formår den nye strategi at undlade at køre anlægget ved fuld indblæsning hele tiden, men i stedet glidende justere luftmængden efter behovet fra butikkerne, som varierer i løbet af dagen. Indblæsningen er centralt begrænset til at variere mellem 70% og 100%.



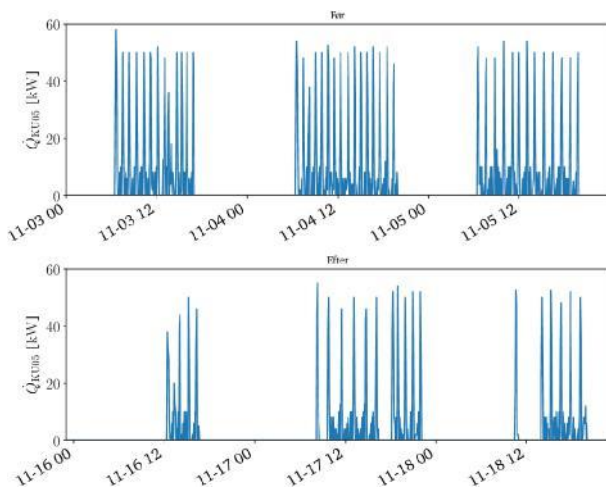
Figur 10 Ventilationsanlæggets luftmængder i indblæsningen "Før" og "Efter" indførelsen af den nye strategi.

På figur 11 ses indblæsningstemperaturen for ventilationsanlægget, samt dennes sætning/reference. Her er det igen tydeligt at se, at den fejlbetonede regulering af indblæsningstemperaturen undgås gennem den nye strategi. Desuden presses indblæsningstemperaturen generelt mod dens nedre begrænsning på 15 grader. Den varierer dog over dagen, hvor den er højere indtil butikkerne åbner, kl. 10:00, hvor kølebehovet i butikkerne stiger.



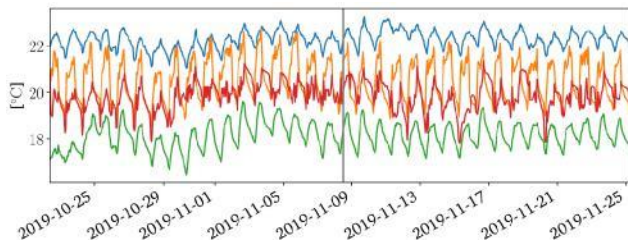
Figur 11 Ventilationsanlæggets indblæsningstemperatur (orange) og sætning/reference (blå) "Før" og "Efter" indførelsen af den nye strategi.

På figur 12 ses udlæsning fra den energimåler, der er blevet monteret på kølevandssiden af chilleren. Her er det også tydeligt at se, at den nye strategi formår at bruge chilleren i mindre grad ved kun at tænde den, når kølebehovet overstiger, hvad der kan leveres med passiv køling fra ventilationsanlægget.

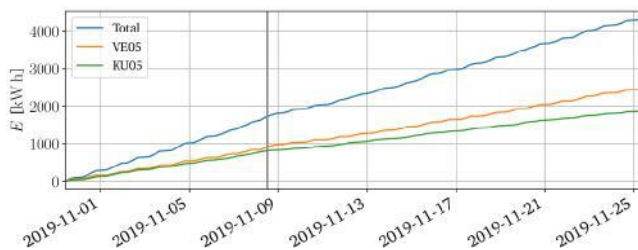


Figur 12 Køleeffekt målt på kølevandssiden af chilleren "Før" og "Efter" indførelsen af den nye strategi.

På figur 13 ses butikstemperaturer før og efter idriftsætning af demoen. Der er ikke fundet nogen indikationer på at indeklimaet forringes - omvendt forbedres det heller ikke; det holdes i samme niveau som før. Dette skyldes især, som det også er synligt, at der er meget forskel på behovet i butikkerne. Nogle vil gerne køle hele tiden, nogle vil gerne varme hele tiden, hvilket er en udfordring at imødekomme, når det er samme ventilationsanlæg, der skal dække deres behov.



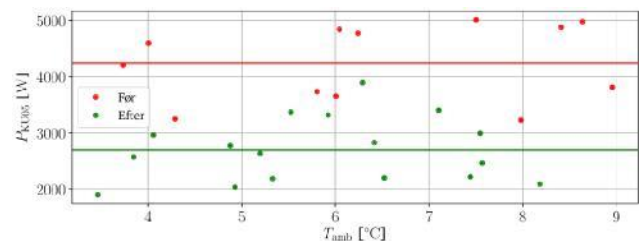
Figur 13 Butikstemperaturer i butikker i demozone. Grå lodret linje indikerer start af test af ny strategi.



Figur 14 Elforbrug fra ventilationsanlæg og chiller (VE05=ventilation, KU05=chiller). Grå lodret linje indikerer start af test af ny strategi.

På figur 14 ses elforbrug, før og efter idriftsætning af demoen; både totalt elforbrug og de individuelle forbrug for ventilationsanlæg (VE05) og chiller (KU05). Ved idriftsætning observeres et knæk på kurven, som er udtryk for et lavere elforbrug.

På figur 15 ses elektrisk effektforbrug for chilleren sammenholdt med udetemperatur. Der er plottet dags-gennemsnit for både perioden før og efter idriftsætning af demoen – dette for at forsøge at isolere effekten af en mulig lavere udetemperatur, efter demoen blev sat i gang. Det ses tydeligt at elforbruget for chilleren er væsentligt lavere med den nye strategi.



Figur 15 Elektrisk effektforbrug for chiller i forhold til udetemperaturen (dagsgennemsnit) "Før" og "Efter" indførelsen af den nye strategi.

New Nordic Engineering har i projektet demonstreret indeklimasensorer i forskellige softwareversioner og udviklet API, så sensorerne kan tilgås fra en cloud-plattform.

Konklusioner

Generelt formår den nye strategi at ændre driften således, at der bruges mere passiv køling fra ventilationsanlægget (blæser kold luft ind udefra) og mindre køling fra chilleren. Før forsøgte luften varmet op og chilleren kørte konstant i dagtimerne. Indblæsningstemperaturen og flowet fra ventilationsanlægget ændres nu også glidende over dagen for at imødekomme det skiftende behov, der er stærkt korreleret med åbningstider.

Elbesparelserne har under hensyntagen til den varierende udetemperatur kunnet måles til ca. 20% totalt (både ventilationsanlæg og chiller). Det er fordelt som ca. 10% på ventilationsanlæg og ca. 30% på chiller. Det vil dog kræve længerevarende tests, og vigtigst også test i andre årstider, for at kunne konkludere på de årlige besparelser, der potentielt kan opnås.



City2

City2, som ligger i Høje Taastrup er kendetegnet ved at være et ældre storcenter (fra starten af 1970'erne), hvor de tekniske installationer i vid udstrækning stammer fra opførelsestidspunktet. I de seneste år er der gennemført en opdatering af storcentrets CTS-anlæg, så det nu er muligt at styre installationerne mere præcist. Desuden er driften af installationerne analyseret med det formål at energioptimere driften med udgangspunkt i de eksisterende installationer. Det har bl.a. betydet, at ventilationsanlæggenes luftmængder er reduceret en del. Men grundlæggende er installationer, og de krav de stiller til forsyningsanlæg som fjernvarme- og køleanlæg, de samme som da installationerne blev etableret. Det betyder bl.a. at køle- og varmegladerne i ventilationsanlæggenes er udlagt efter de temperaturer der var almindelige i 70'erne. F.eks.

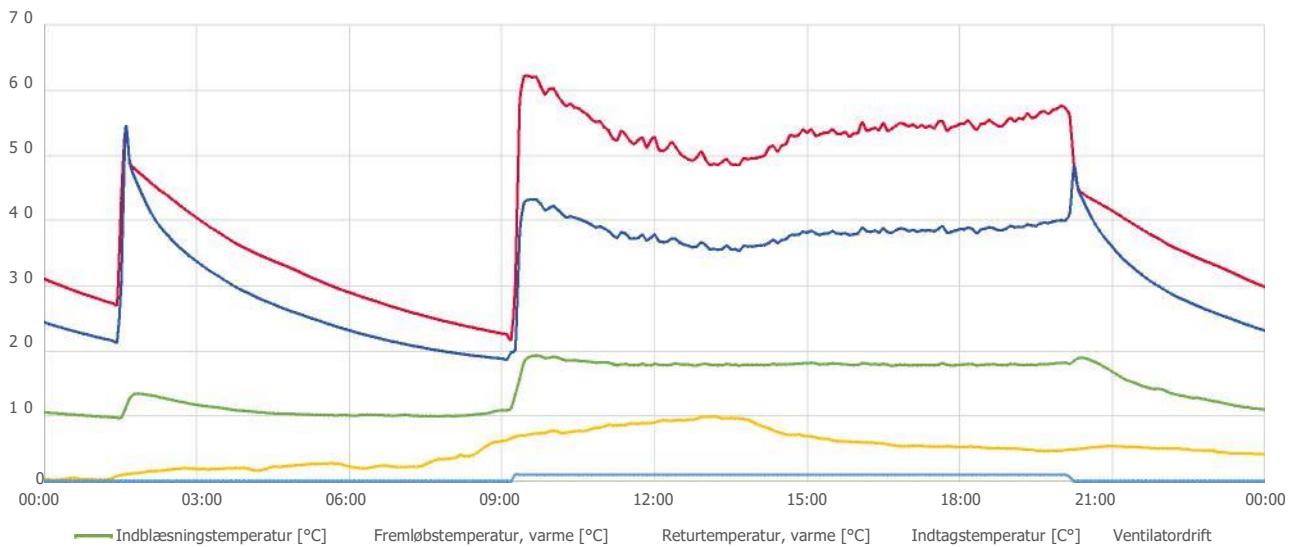
er varmegladerne udlagt efter et temperatursæt på 100/60°C, da varmforsyningen i storcentret oprindeligt var baseret på oliekedler. Varmeforsyningen til storcentret er sidenhen konverteret til fjernvarme.

Demozone

I City2 er der identificeret, prioriteret og gennemført to demonstrationer:

- Kombineret køle- og varmeglade
- Fremløbstemperaturstyring af køleanlæggenes

I begge tilfælde er der etableret PreHEAT cloud-plattformen med tilhørende gateway, som er anvendt til detaljeret dataopsamling fra en demozone ved et teknikrum med 4 ventilationsaggregater (221, 222, 223 og 224) og fra kølecentral med to kølemaskiner.



Figur 16 Temperaturer for varmeblade og luft i ventilationsanlæg 224.

Demonstration af kombineret køle- og varmeblade

Afkølingen på ventilationsanlæggenes varmeblader er generelt meget dårlig, da fladerne som nævnt er udlagt efter 100/60°C, og derfor har et ret lille varmeoverførende areal. Dette er særligt tilfældet i overgangsperioderne (forår/efterår), hvor fremløbstemperaturen fra fjernvarmeforsyningen ikke er ret høj.

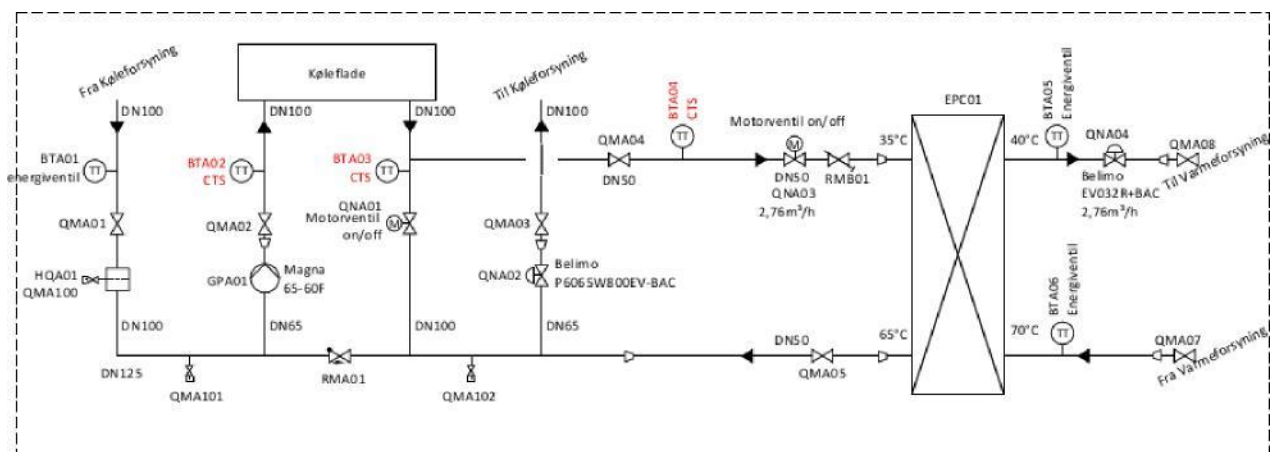
Det er ikke usædvanligt at afkølingen er på 15°C eller lavere i overgangsperioderne, og det resulterer i at kravet til returtemperatur til fjernvarmeforsyningen ikke kan overholdes, og der udløses en afkølingsbetaling.

Figur 16 viser temperaturprofilerne for fremløb, retur, lufttemperatur etc. for et par dage medio marts 2019. Det ses, at fremløbstemperaturen fra blandesløjfen var ca. 55°C og returtemperaturen var ca. 38°C, når ventila-

tionsanlægget var i drift, svarende til en afkøling på ca. 17°C. Udetemperaturen var ca. 5°C.

Alle ventilationsanlæggene for kundeområderne er foruden varmeblade tillige forsynet med en køleblade for luftkonditionering. For et konkret ventilationsanlæg er det derfor undersøgt, om det er praktisk muligt at anvende ventilationsanlæggets køleblade både som varmeblade og køleblade. Der er udviklet et koncept, hvor køle- og varmeforsyningen holdes adskilt, se figur 17.

Det viste koncept er etableret på et ventilationsanlæg med en luftmængde på ca. 18.000 m³/h, der betjener to detailbutikker. Den eksisterende varmeblade har en ydelse på Q_v : 156 kW ved T_{fjv} : 100/60°C og T_{luft} : -8/12°C, og kølebladen har en ydelse på Q_k : 195 kW ved T_{kv} : 7/12°C og T_{luft} : 27/11°C.

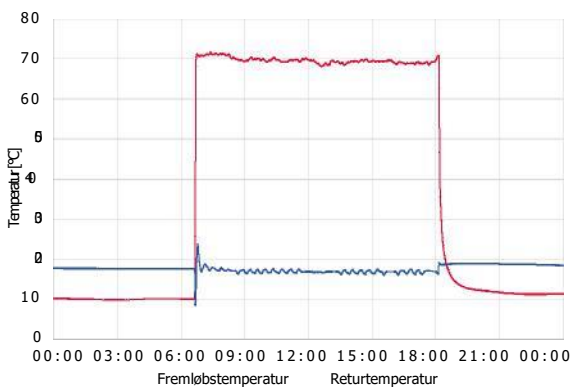


Figur 17 Koncept for køleblade anvendt som varmeblade.



Figur 18 Den færdige demonstrationsopstilling af koncept for køleflade som varmekilde.

A-Comfort A/S har designet og produceret demonstrationsopstillingen, se figur 18, der erstatter de eksisterende blandesløjfer for køle- og varmekilderne. Der er efterfølgende foretaget registreringer af frem- og returtemperatur en dag i november, hvor udetemperaturen var 6 °C. Indblæsningstemperaturen på ventilations-luften var på 17 °C. Resultaterne fremgår af figur 19



Figur 19 Registrering af fremløbs- og returtemperaturer fra demonstrationsopstillingen.

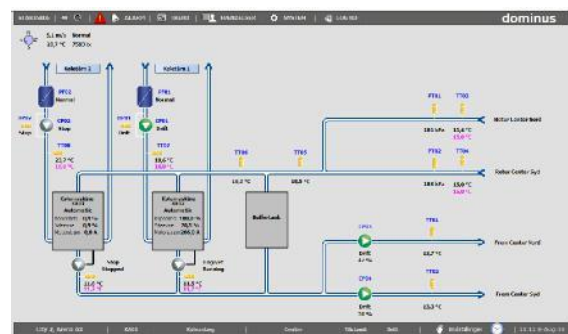
Det ses, at fremløbstemperaturen var ca. 70 °C, men mere interessant er, at returtemperaturen var ca. 17 °C. Det betyder at returtemperaturen er helt nede på niveau med ventilationsanlæggets indblæsningstemperatur. Udetemperaturen den pågældende dag var ca. 6 °C. Dermed kan det konkluderes, at ventilationsanlæggets køleflade som forventet havde potentiale til at sikre umådelig høj afkøling.

Ventilationsanlæggets hidtidige varmekilde er stadig monteret i ventilationsanlægget, men bør på sigt fjernes, da den blot giver unødigt tryktab.

Det er således eftervist, at det afprøvede koncept for etablering af en kombineret køle- og varmekilde fungerer, og kan anvendes i praksis. Det vil givetvis være for omkostningstungt at ombygge køle- og varmforsyningen for eksisterende ventilationsanlæg, med mindre strafafgiften for manglende afkøling er meget høj. Men for nye ventilationsanlæg med vand-/væskebaserede køle- og varmekilder er det både teknisk og økonomisk en meget rentabel mulighed at etablere kombinerede køle- og varmekilder.

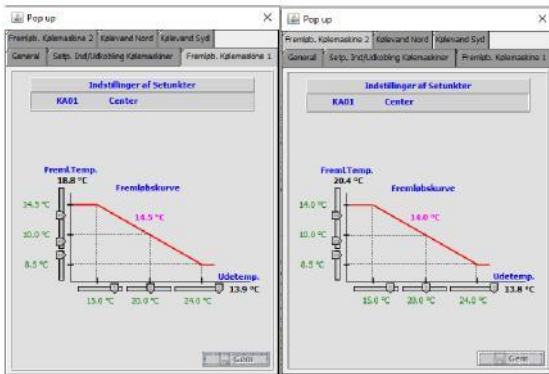
Demonstration af fremløbstemperaturstyring af køleanlæggene

City2 har installeret to større køleanlæg centralt, der anvendes til luftkonditionering af indblæsnings-luften fra storcentrets ventilationsanlæg, når det er varmt i vejret, se figur 20. Det ene køleanlæg er af ældre dato, og data herfra kan kun overvåges på CTS-anlægget. Driften af det andet og nyere køleanlæg kan både overvåges og styres fra CTS-anlæg. For begge anlæg er det dog muligt at indstille fremløbstemperaturen fra køleanlægget fra CTS-anlægget.



Figur 20 Principdiagram for køleinstallation.

Hidtil er fremløbstemperaturen styret efter en konstant værdi på 10-11 °C, uanset det faktiske behov for køling af indblæsningsluften. I praksis afhænger kølebehovet af udetemperaturen, idet kølebehovet øges efterhånden som udetemperaturen stiger. I overgangsperioderne om foråret og efteråret er der et relativt lille kølebehov, mens der om sommeren er et stort kølebehov. I overgangsperioderne er det ikke nødvendigt, at fremløbstemperaturen er 10 °C for at tilføre den nødvendige køling, og det betyder at der er et energioptimeringspotentiale i at tilpasse fremløbstemperaturen til behovet. Køleanlæggenes energiforbrug reduceres med ca. 3% for hver grad fremløbstemperaturen kan hæves. Derfor er der etableret en simpel form for udekompensering af køleanlæggenes fremløbstemperatur i stil med den udekompensering der anvendes til varmeanlæg, se figur 21.

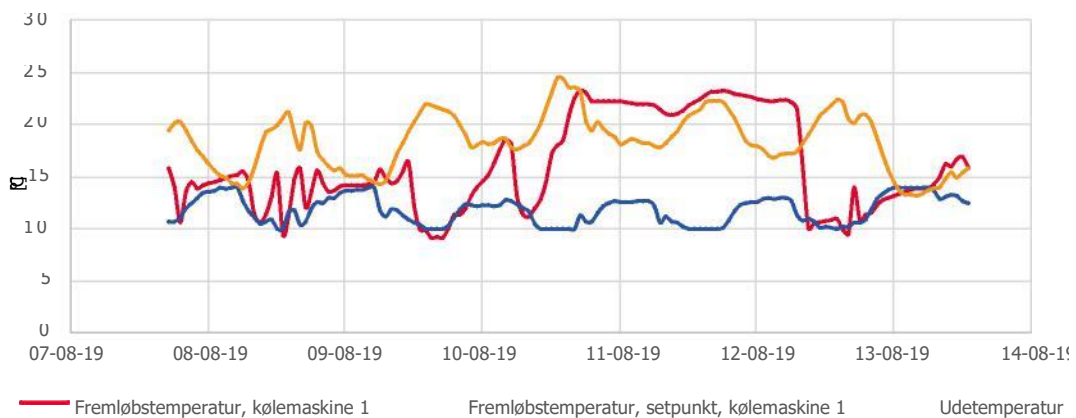


Figur 21 Fremløbstemperaturkurver for køleanlæg 1 og 2.

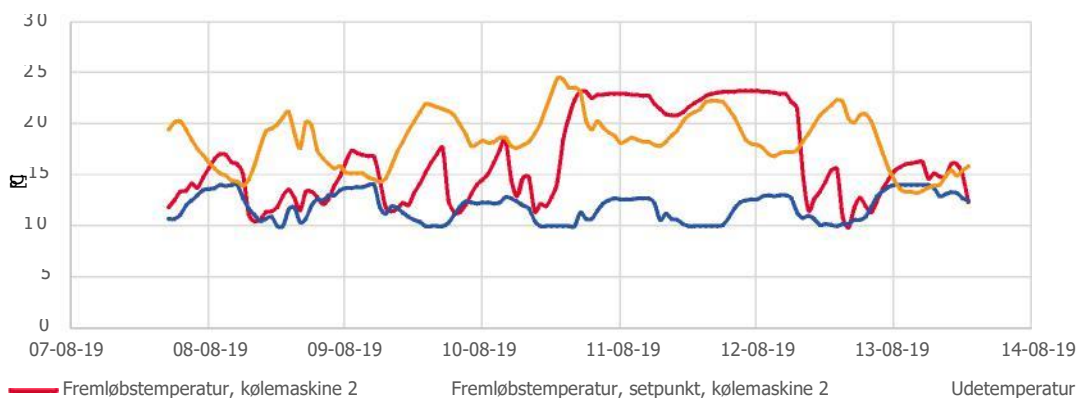
Styringen blev implementeret i maj 2019, men som følge af ombygninger i CTS-anlæggets understationer med deraf følgende tab af driftsdata, er der kun data fra primo august 2019 og frem til at der ikke længere var behov for kølemaskinerne ultimo august. Figur 22 og 23 viser temperaturkurver for hver af de to kølemaskiner.

For begge kølemaskiner ses, at den aktuelle fremløbstemperatur i en vis udstrækning følger sætpunktet for fremløbstemperaturen. Dette gælder imidlertid ikke i perioden 10-12. august, hvor begge kølemaskiner (eller køledistributionssystemet) har svigtet. Desuden ses, at både den aktuelle fremløbstemperatur og styringen heraf i langt overvejende grad er over 10°C, som var den hidtidige fremløbs-temperatur. Den højere fremløbstemperatur betyder, at kølemaskinernes energiforbrug reduceres betydeligt. Det er estimeret, at der realiseres et årligt energibesparelsespotentiale på ca. 5-6%, eller 28 MWh. Da det har været forbundet med en meget begrænset omkostning at bede CTS-firmaet om at programmere de to styringer, er der en virkelig god økonomi i at styre fremløbstemperaturen for kølemaskinerne i forhold til udetemperaturen.

Med afsæt i de i projektet udviklede styringsstrategier, kan styring af fremløbstemperaturen optimeres yderligere og implementeres via gateway og cloud-plattform.



Figur 22 Fremløbs- og sætpunktskurver for køleanlæg 1.



Figur 23 Fremløbs- og sætpunktskurver for køleanlæg 2.

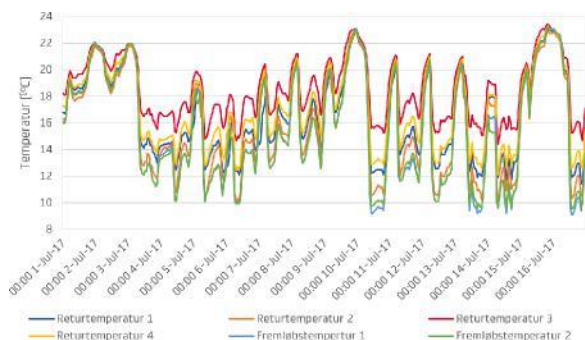
Muligheder for anvendelse af fjernkøling

City2 har to vandkøleanlæg, der frigives til drift når udetemperaturen overstiger 16°C. De 2 køleanlæg har en nominel kølekapacitet på henholdsvis 878 kW og ca. 1.800 kW ved $T_{o,i}/T_{o,u}$: 12/7°C og $T_{k,i}/T_{k,u}$: 30/35°C. Det årlige elforbrug til køleinstallationen er i 2013 registreret til 274 MWh og i 2016 er forbruget registreret til 321 MWh.

Kølingen distribueres fra kølecentralen i et fælles kølevandssystem, idet systemet er opdelt i en kreds der forsyner den østlige del af bygningen, og en kreds der forsyner den vestlige del af bygningen.

Der er foretaget registreringer af temperaturen i kølevandssystemets 2 hovedforsyningskredse i sommeren 2017. Vandtemperaturen var ved den lejlighed henholdsvis $T_{v,f}/T_{v,r}$: 10,8/13,2°C og $T_{v,f}/T_{v,r}$: 10,8/11,6°C. Sætpunktet for kølevandstemperaturen i køleanlæggenes styring var sat til 11°C, dvs. fremløbstemperaturen af kølevandet fra anlæggene er 11°C. Den lille forskel mellem fremløbs- og returtemperaturen for kølevandet ved køleanlæggene skyldes, at reguleringen af kølevandstilførslen i vid udstrækning sker med trevejs-ventiler. Der er desuden foretaget registreringer af temperaturen over to tilfældigt udvalgte køleflader. Vandtemperaturene ind og ud af den ene køleflade var henholdsvis $T_{v,f}/T_{v,r}$: 11,1/17,0°C og $T_{v,f}/T_{v,r}$: 11,2/19,0°C. Disse målinger indikerer, at kuldetabet fra kølevandssystemet er lille, og at kølefladerne er i stand til at sikre en passende opvarmning af kølevandet.

På figur 24 er vist kurver over logninger af fremløbs- og returtemperaturene i en udvalgt sommerperiode, målt ved køleanlæggene. Igen ses det, at forskellen mellem fremløbs- og returtemperaturene er ganske lav, idet temperaturdifferensen mellem fremløb og retur er 1,3°C, 3,0°C, 3,3°C og 5,7°C.



Figur 24 Kurver, der viser forskellen mellem frem- og returtemperaturen målt ved køleanlægget.

Kølevandstemperaturene specificeret for Høje Taastrup Fjernvarmes fjernkølesystem er i udgangspunktet $T_{v,f}/T_{v,r}$: 6/16°C. Hvis der installeres fjernkøling i City2, vil køleforsyningen formentlig ske over en veksler mellem fjernkølesystemet og City2's kølesystem. Derfor antages det, at kølevandsforbrugerne i City2 skal kunne håndtere kølevand ved $T_{v,f}/T_{v,r}$: 7/17°C i en spidsbelastningssituation (en varm sommerdag). Der er ingen tvivl om at fremløbstemperaturen til køleforbrugstederne vil være tilstrækkelig lav med fjernkøling. Udfordringen er om de eksisterende køleflader i gennemsnit vil varme returen på kølevandet op til 17°C. Det kan beregnes, at hvis kølefladernes kapacitet skal bibeholdes, bliver temperatursættet formentlig ca. $T_{v,f}/T_{v,r}$: 7/13°C på vekslerens sekundærside og ca. $T_{v,f}/T_{v,r}$: 6/12°C på primærsiden (fjernkølesiden).

Derfor antages det, at det umiddelbart ikke er muligt at opfylde Høje Taastrup Fjernvarmes tilslutningsspecifikationer for fjernkøling, men dette bør i givet fald undersøges mere præcist gennem in-situ målinger på et stort antal køleflader på en varm dag, hvis fjernkøling bliver et reelt alternativ til de nuværende kølemaskiner.

Der er ikke etableret en energimåler på kølevandssiden for de to køleanlæg. Derfor kendes det årlige kølebehov ikke ligesom kølebelastningen i en spidsbelastningssituation ikke er kendt. Det årlige gennemsnitlige kølebehov kan dog estimeres ud fra energiforbruget til køleanlæggene til at være ca. 3.000 MWh kulde. Desuden kan spidsbelastningen groft estimeres ud fra at den maksimale kølebelastning er ca. 50 W/m² butiksareal og ca. 20 W/m² gangareal i et center som City2. Det betyder, at spidsbelastningen for køleforsyningen kan estimeres til ca. 3.500 kW kulde. Spidsbelastningen optræder kun ganske kortvarigt, og der kan ske en betydelig kuldeakkumulering i bygningskonstruktionerne.

De to køleanlæg har til sammenligning en nominel kapacitet på i alt ca. 2.700 kW kulde. Men da spidsbelastningen som nævnt optræder ganske kortvarigt, er kapaciteten af de nuværende køleanlæg formentlig tilstrækkelig til lige akkurat at holde bygningen nedkølet en varm dag. Ud fra data fra CTS-anlægget ses, at begge kølemaskiner er i drift med maksimal kapacitet nogle få dage om sommeren (2017).



Kontormiljøer

I tilknytning til storcentre er der typisk en række kontorfaciliteter, der anvendes til udlejning eller til egen driftsafdeling. Her varierer indeklimabehovet, ventilationsanlæggene og den tilhørende styring ofte fra de resterende lokaletyper. Generelt i Danmark vurderes etagearealet til kontorer at udgøre mindst 50 mio. m² eller et ca. 15 gange større areal end storcentrene. Der er således et væsentligt større marked for teknologi, der også kan anvendes i kontorer. Den følgende case er baseret på mindre ventilationsaggregater fra Exhausto A/S med anlægsstyring leveret af Bitzer Electronics A/S. I casen blev det besluttet at demonstrere følgende:

- Integration af elmålere i anlægsstyringer, der styrer ventilationsaggregater med tilsluttet køleanlæg
- Overstyring af sæt punkter i ventilationsaggregaters

anlægsstyring ved brug af cloud-plattform og gateway. I den forbindelse er der udviklet en overordnet indeklima- og styringsstrategi, der adskiller sig fra anlæggenes eksisterende styringsstrategi.

- Undersøge dataopsamling med ekstra trådløse indeklimasensorer og vurdere, hvilken værdi, det kan tilføre.

Demozone

Demonstrationen tog udgangspunkt i en demozone etableret hos Exhausto A/S med to forskellige Exhausto ventilationsanlæg. Et VEX250 anlæg med en kapacitet på ca. 3500 m³/h udstyret med en DX køleenhed og vandvarmefflade. Anlægget forsyner et mindre kontor til 2 personer og et større kontorlokale med plads til 4 personer. Det andet anlæg er et nyere VEX150CF med en

kapacitet på ca. 2000 m³/h med en vandbaseret varme-flade og køleflade tilsluttet en separat vandkøleenhed. Anlægget forsyner et kontorlokale til 6 personer og et kontorlokale til 3-4 personer med ekstra plads til et mødebord. I alt forsynes ca. 200 m². De 2 anlæg er styret individuelt, med hver sin Exact2-styring. Der er installeret en gateway tilsluttet PreHEAT cloud-plattformen, som har fat i anlægsstyringerne.

I alle 4 kontorlokaler blev indeklimaet logget over en periode på ca. 6-7 måneder. De i alt 4 indeklimasensorer målte rumtemperatur, CO₂-koncentration og den relative luftfugtighed. Indeklimadata overførtes til PreHEAT via API og en 3G-forbindelse.

Teknologitilpasninger

En væsentlig forudsætning for at potentialet for energibesparelser og energifleksibilitet kan vurderes og senere dokumenteres er, at elforbruget kan måles. Det kan være besværligt og omkostningstungt at etablere elmålere med dataopsamling. Derfor er der i SEBUT-projektet arbejdet med en løsning, hvor elmålinger kan etableres og opsamles via anlægsstyringen på ventilationsanlægget. Der er lavet følgende tilpasninger af teknologien:

- **Elmålere:** Bitzer Electronics A/S har tilpasset et eksisterende produkt til 3-faset elmåling. Måleområdet er 0-40 Ampere, 0-540 Volt og en effekt op til 24 kW. Kommunikation via Modbus RTU.
- **Anlægsstyring:** Bitzer Electronics A/S har udviklet en softwareversion til Exact2-styringen, der indeholder registre, så det er muligt at opsamle data fra 2 elmålere via Modbus. Det giver mulighed for både at måle elforbruget af ventilationsaggregatet og af et tilsluttet køleanlæg og en enkel tilgang til løbende dataopsamling via eksisterende snitflade



For demonstration etableredes i alt 4 elmålere: En måler for hvert ventilationsaggregat, og en måler for hvert køleanlæg. Dataopsamling blev udført gennem den allerede etablerede forbindelse til Exact2-styringen via gateway og PreHEAT-cloud-plattformen.

Simpel styringsstrategi

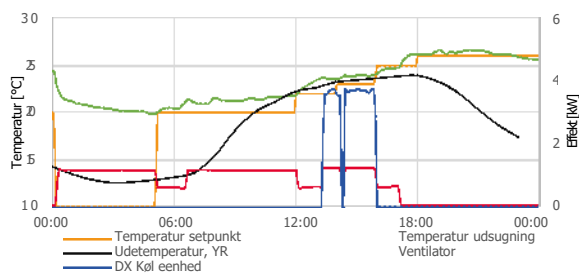
De indledende indeklimate målinger havde eftervist, at der i demonstrationszonen næsten konstant var en komfortabel CO₂-koncentration og luftfugtighed. Der blev derfor defineret en strategi for overstyring af anlægsstyringens sætpunkter, som udelukkende fokuserede på at styre efter at opretholde en ønsket rumtemperatur. Derudover havde strategien til formål at skubbe et energiforbrug og hermed indikere muligheder for energifleksibilitet. Strategiens temperaturgrænseværdier og dermed styringssætpunkter varierede mellem 20 °C og 26 °C, svarende til de operative temperaturer i indeklimaklasse B jf. prEN 15251, som HVAC-systemer designes efter. Fra kl. 06 - 08 var sætpunktet 20 °C og steg trinvist 1 °C hver anden time frem til grænsen på 26 °C kl. 18. Herefter blev sætpunktet fastholdt frem til kl. 24, hvorefter sætpunktet droppede igen i løbet af natten. Anlæggenes eksisterende styring havde deres egen logik med urstyring og faste temperatursætpunkter. På grund af urstyringen var det kun muligt at implementere den simple overstyringsstrategi fuldt ud i dagtimerne.

Demonstration

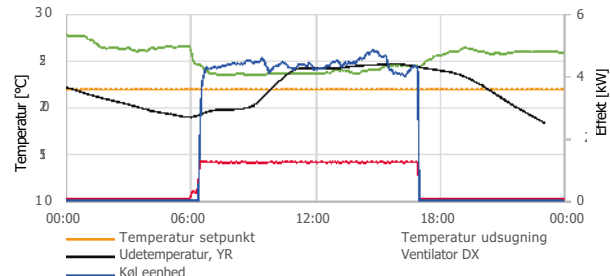
Demonstrationen foregik i sommermånederne, hvor der var kølebehov. Selve overtagelsen af anlægsstyringerne og demonstration af strategien forløb over en periode på ca. 2 uger i august 2019, hvor vejret var særligt varmt. Her lykkedes det at manipulere og overstyre den eksisterende styring via cloud-løsningen og overvåge driftsdata parallelt med indeklimaet. I løbet af demonstrationsperioden var det nødvendigt at styre ventilationsanlæggene forsøgsmæssigt efter skiftende strategier, for at observere hvordan anlæggene reagerede og forstå hvilket indeklima det medførte. Det var ligeledes behov for at justere sætpunkterne med henblik på at reducere mængden af træk- og støjgener hos personalet. Demonstrationen afslørede, at der eksisterede en række indledende udfordringer relateret til at implementere en udefra kommende strategi. Det drejede sig bl.a. om at forstå samspillet/modspillet mellem anlægsstyringernes egen logik og overstyringen af sætpunkter kommende udefra.

På figur 25 ses data for VEX250 fra den 22. august 2019, hvor anlægget styredes efter den foreslåede indeklima- og styringsstrategi. På figur 26 ses det samme aggregat driftet efter den eksisterende styring den 28. august. Udetemperatur var tilnærmelsesvis identisk i løbet af dagtimerne de 2 dage, men betydelig højere den ene nat. Den 28. august blev det eftervist, at til trods for at rumtemperaturen tidligt om morgenen var relativt høj, kunne anlægget hurtigt nedbringe temperaturen til et stabilt niveau. Det krævede, at anlægget kørte med høj effekt på både køleenhed og ventilator. Det viser, at det kan være tilstrækkeligt at aktivere køleenheden og ventilationen umiddelbart kort tid før behovet opstår, hvis man har tilstrækkelig høj kapacitet. Desuden ses det, at temperaturniveauet holdes stabilt over hele arbejdsdagen uden at hverken ventilator eller køleenhed pendler, men det er på bekostning af en konstant høj effekt.

Modsat blev rumtemperaturen den 22. august holdt nede i løbet af natten, ved brug af natkøling. Efter strategiens hensigt resulterede det i, at der ramtes et lavt temperatur-sætpunkt fra om morgenen. Resten af dagen formåede sætpunkt og rumtemperatur at følges ad op til de 26 °C som planlagt. En positiv påvirkning var, at ventilatoreffekten ved de 2 °C sætpunkts-trin som konsekvens blev reduceret løbende. Umiddelbart indikerer valget af strategi, at behovet for aktiv køling på dagen kunne ud-skydes helt frem til kl. 13 og at det kun forekom køling i 3 timer. Dette skyldtes også, at der ikke efter kl. 16 var et kølebehov grundet det høje sætpunkt. Overordnet vurderes det, at indeklimastrategien kan fungere hensigtsmæssigt og at behovet for aktiv køling kan reduceres på en typisk dag.

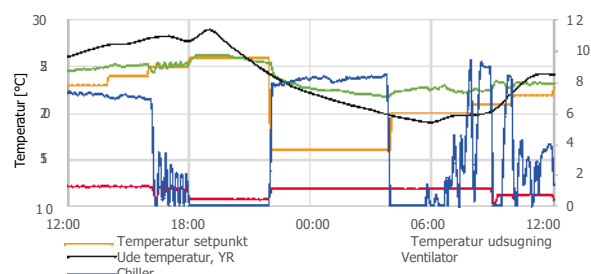


Figur 25 Elmålinger på ventilator og køleenhed, ude- og udsugningstemperatur samt temperatur-sætpunktet på VEX 250 for den 22. august.



Figur 26 Elmålinger på ventilator og køleenhed, ude- og udsugningstemperatur samt temperatur-sætpunktet på VEX 250 for den 28. august.

På en meget varm nat (næsten tropenat) mellem den 28. og 29. august, udførtes et forsøg på VEX150 med aktiv køling om natten, se figur 27. Det fremgår, at aktiv køling kørte hele natten ved høj effekt, indtil sætpunktet ændredes kl. 4 om morgenen. Elforbruget i perioden var ca. 48 kWh. Det fremgår også at kølebehovet holdes i ave den følgende dag uden at der har kunnet laves en fuldstændig kvantificering af den flyttede energi. Selvom det måske ikke kan forsvares med aktiv køling om natten ud fra et energieffektivitetssynspunkt, giver det nogle muligheder for at flytte forbrug og dermed fleksibilitet, som kan indarbejdes i fremtidige styringer. Som et lille kuriosum, så var udetemperaturen i forsøgsperioden så høj, at anlægsstyringen på nogle tidspunkter aktiverede anlæggenes kølegenvinding.



Figur 27 Elmålinger på ventilator og køleenhed, ude- og udsugningstemperatur samt temperatur-sætpunktet på VEX150 registreret over 24 timer mellem den 28 og 29. august. Bemærk, at værdierne på y-akserne er forskellige fra figur 25 og 26, da der er tale om en anden kølemaskine med højere effekt.

Potentialer for energibesparelser og indeklima

Projektets demonstrationer har ledt frem til en række potentielle energibesparelser, som der vil blive redegjort for i det følgende. Energibesparelserne kan udføres uden at forringe indeklimaet og i mange tilfælde også med et bedre indeklima til følge. I det følgende estimeres besparelsespotentialer for storcentre baseret på det samlede areal, der udgør ca. 3,3 mio. m² i Danmark.

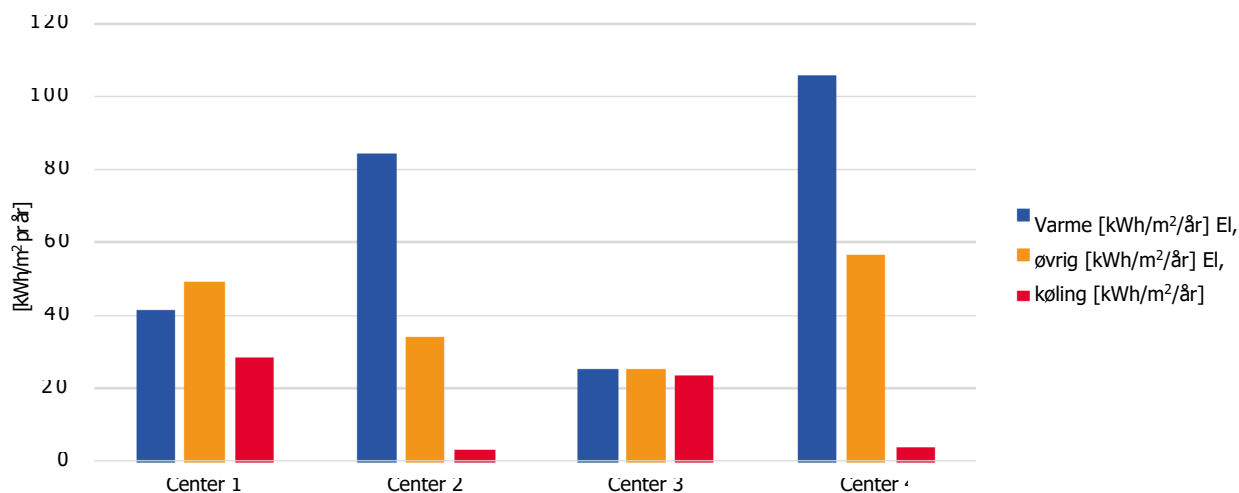
Energiforbrug

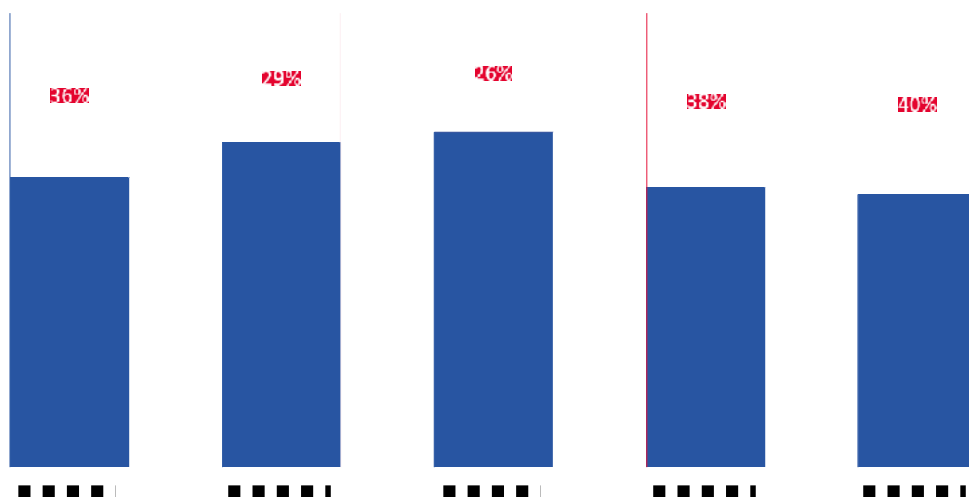
Figur 29 viser energiforbruget til varme og el for et år. Elforbruget er yderligere delt op i forbrug til køling og forbrug til øvrige formål. Butikkernes eget forbrug til el, herunder elforbrug til belysning, er ikke medregnet og arealreferencen er det enkelte centers samlede areal. Varmeforsyningen i storcentre er langt de fleste steder baseret på fjernvarme.

Det fremgår, at der er stor variation mellem centrene. Det årlige elforbrug til køling varierer mellem 3 kWh/m² og 28 kWh/m², med en middelværdi for de 4 centre på ca. 10 kWh/m². Nogle centre har kun køling i sommermånederne, andre har det næsten året rundt. Det skyldes specielt det generelt høje belysningsniveau, der i butikker ofte giver interne varmebidrag i størrelsesordenen 40-60 W/m². På sigt forventes kølebehovet at blive mindre, efterhånden som der skiftes til LED-belysning i butikkerne.

Indeklima

Indeklimaet i de undersøgte storcentre har generelt været acceptabelt, specielt det atmosfæriske indeklima har været i en særlig høj klasse. Det termiske indeklima har dog ofte været svært at kontrollere, og succesraten for





Figur 30 Potentiale for elbesparelser for ventilation i fem storcentre. Potentialet er markeret med rød.

hvor godt det er lykkedes, er ofte afhængig af driftspersonalets erfaringer med systemerne, fremfor teknik og styring. Der er i tidligere afsnit beskrevet hvordan styringen kan optimeres, så der kommer en højere grad af kontrol over det termiske indeklima. En af de store udfordringer i forbindelse med indeklimaet er den høje varmebelastning fra belysningen. Der vil således også være et potentiale for bedre indeklima ved at udskifte belysningen til LED.

Energibesparelser for ventilation

I mange storcentre ventileres der mere end der er behov for. Energiscreening af fem storcentre, har vist at der er et stort potentiale for at reducere elforbruget til ventilation. I de fem undersøgte centre ligger potentialet på mellem 26% og 40%, se figur 30. Det er beregnet ud fra en forudsætning om en atmosfærisk indeklimaklasse A og en temperaturstigning i løbet af dagen på op til 5°C.

Det store potentiale kan realiseres ved at tilpasse ventilationen til behovet. I alle undersøgte storcentre har det været det termiske indeklima som har været bestemmende for ventilationsbehovet. Det gør det muligt at tillade en kontrolleret temperaturstigning om dagen, hvorefter bygningen køles ned udenfor åbningstid med natkøling. Dette giver flere driftstimer, men ved en langt lavere hastighed på ventilatorerne, hvilket udmønter sig i en samlet energibesparelse. I de undersøgte centre ligger elbesparelserne for ventilation på mellem 2 kWh/ m² og 10 kWh/m², med en middelværdi på ca. 5 kWh/m². Antaget at denne middelværdi er repræsentativ og baseret på det samlede centerareal i Danmark, giver det et besparelspotentiale på op mod 16.500 MWh el årligt.

Fremløbstemperaturstyring af køleanlæg

Det antages på baggrund af energiforbruget fra de 4 centre vist i figur 29, at det årlige elforbrug til rumkøling (luftkonditionering) er ca. 10 kWh/m² i gennemsnit. Under antagelse af, at alle butikscentrene har luftkonditionering, er det samlede energiforbrug til rumkøling ca. 33.000 MWh årligt. Der er gennemført en demonstration i City2 med at tilpasse fremløbstemperaturen til kølebehovet, sådan at fremløbstemperaturen reduceres i takt med at udetemperaturen stiger. På den måde kommer køleanlægget i City2 til at have en højere driftstemperatur i gennemsnit i de måneder, hvor det er i drift. Den højere driftstemperatur medfører, at køleanlægget drives lidt mere energieffektivt, idet 1°C højere driftstemperatur giver en energibesparelse på ca. 3%. På baggrund af resultaterne fra City2 vurderes det, at energiforbruget til drift af køleanlæggene kan reduceres med 5-6%, hvilket fører til et samlet energibesparelspotentiale på landsplan på op til ca. 1.800 MWh el årligt. Det er relativt nemt og billigt at installere styring af fremløbstemperaturen for køleanlæg, der styres via et CTS-anlæg, hvilket normalt er tilfældet.

Koordineret og optimeret styring af ventilation og køling

Demonstrationen i Kolding Storcenter har desuden vist et stort besparelspotentiale på op mod 20% på elforbruget, for den udviklede styringsstrategi, der optimerer og koordinerer mekanisk køling og køling med udeluft via ventilationsanlægget. Yderligere udvikling og demonstration skal kortlægge potentialet på årsbasis og for forskellige anlægskonfigurationer.

Potentialer for energifleksibilitet

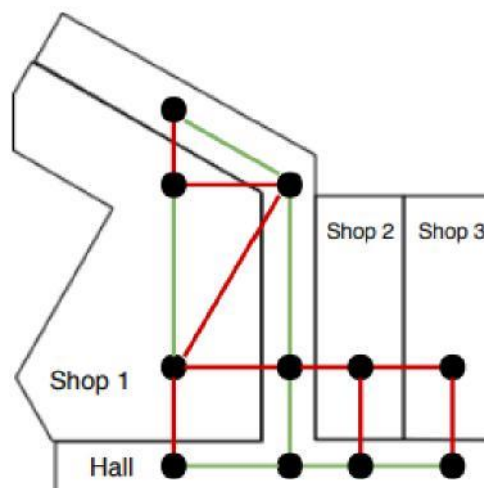
Energifleksibilitet i bygninger og dermed også i storcen-tre, er generelt baseret på at udnytte termisk kapacitet i bygningskonstruktionen. Ved at implementere en styringsstrategi, der tillader et komforttemperaturbånd og variable temperatursætpunkter, introduceres de samme håndtag, som er nødvendige for at aktivere energifleksibilitet. Så SEBUT-setup'et med en overordnet styringsstrategi, der sender styresignaler tilbage til CTS-anlægget kan i lige så høj grad anvendes til energifleksibilitet, som til at realisere energibesparelser.

Flytning af elforbrug

Det er muligt at flytte forbrug (load-shifting) i kortere perioder i et storcenter, så der kan tilbydes forskellige services til et marked for fleksibilitet. Det kan gøres ved at manipulere temperatursætpunkterne, så bygningen er kølet godt ned inden det tidspunkt, hvor der ønskes et reduceret forbrug. I reduktionsperioden manipuleres temperatursætpunkterne, så rumtemperaturen får lov at stige indenfor rammerne af et valgt komforttemperatur-bånd. Efterfølgende skal der igen bruges ekstra energi for at holde eller genoprette den ønskede temperatur. På denne måde kan energiforbruget flyttes og gøres fleksibelt.

Et simuleringstudium baseret på modelprædiktiv regulering (MPC) er gennemført for at fastlægge potentialet for energifleksibilitet [3]. Der er defineret en dynamisk RC-ækvivalent bygningsmodel, som tager udgangspunkt

i demozonen i Kolding Storcenter, se figur 31. Butikker og fællesarealer er repræsenteret ved knudepunkter, der repræsenterer termiske zoner. De farvede linjer repræsenterer forskellige varmemodstande mellem knudepunkterne.



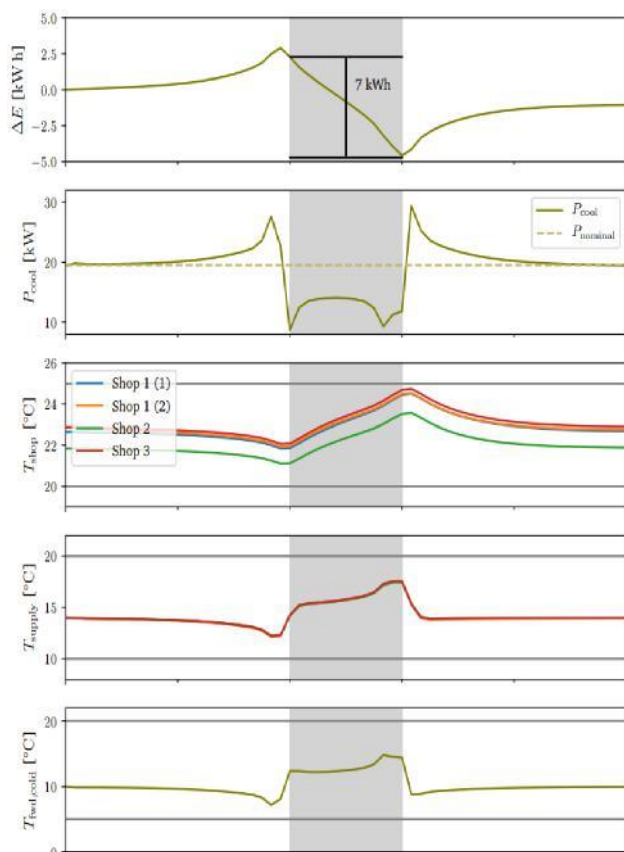
Figur 31 – Skitse af modelopbygningen af demozonen i Kolding Storcenter.

Løbende dataopsamling og on-site målinger har været brugt til at bestemme modelparametrene.

Styringsstrategien er baseret på MPC med tidsafhængige begrænsninger, der direkte manipulerer effekt

eller energiforbrug. Strategien er formuleret, så den kan levere forudgående forceret køling af bygningskonstruktionen i de manipulerede termiske zoner samt holde sig inden for et defineret komforttemperaturbånd. Den undersøgte strategi manipulerer udelukkende med fremløbstemperatur fra demozonens chiller og med sætpunkter i butikkerne. Potentialet for fleksibilitet, hvor der også manipuleres med ventilationsanlægget, er ikke undersøgt i dette arbejde.

Figur 32 viser resultatet af en simulering. Det ses, at rumtemperaturen i butikkerne tvinges ned forud for perioden, hvor der skal leveres fleksibilitet og at det koster energi. Rumtemperaturen holder sig indenfor komfortbåndet i fleksibilitetsperioden (grå vandrette streger). Efterfølgende er der igen behov for at få rumtemperaturen ned, hvilket igen resulterer i et øget energiforbrug.



Figur 32 – Resultat af simulering med modelprædiktiv regulering (MPC). Figuren viser fra neden fremløbstemperaturen fra køleanlægget, indblæsningstemperaturen, rumtemperatur i butikkerne, køleeffekt og reduktion i energiforbruget.

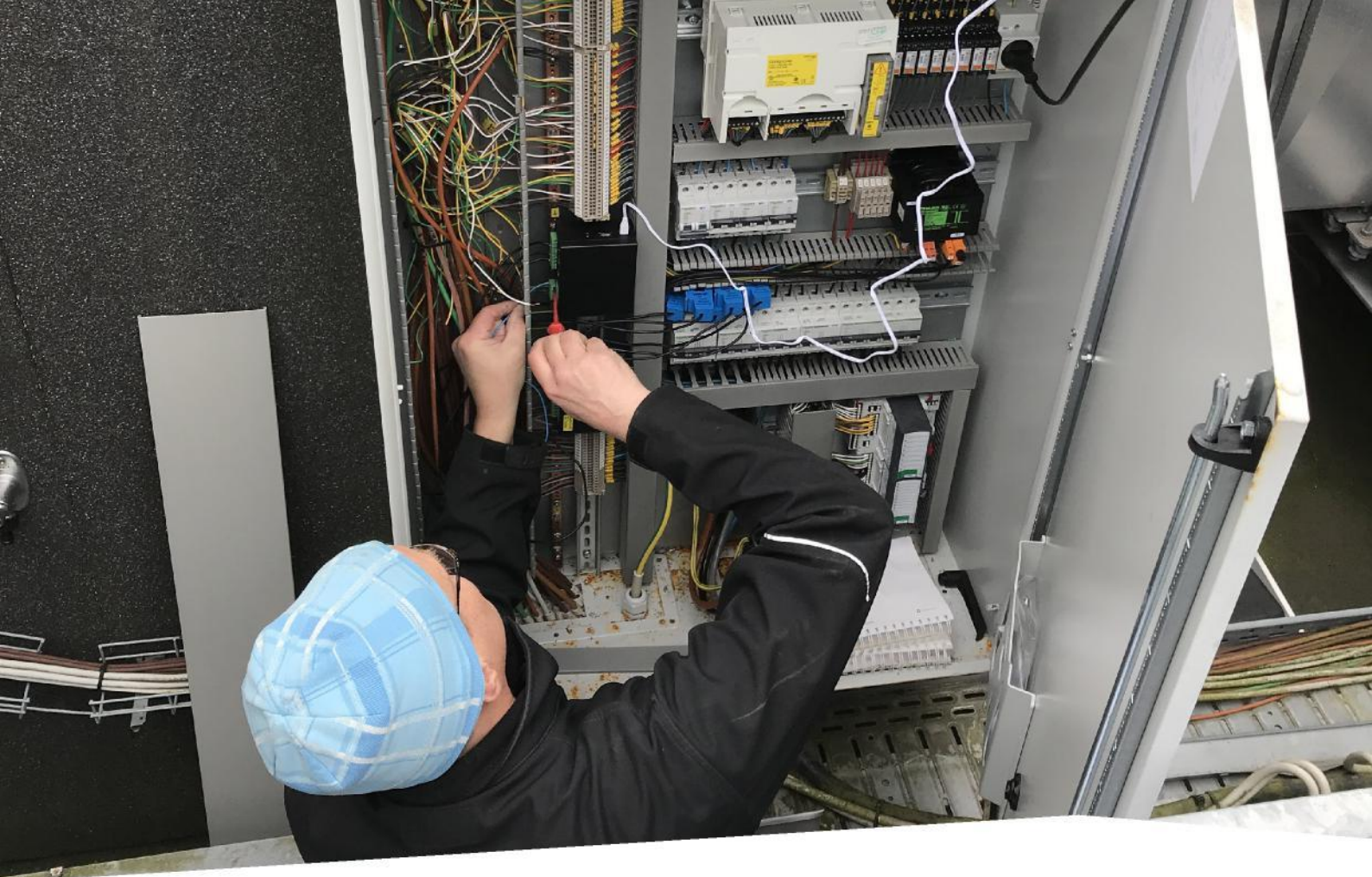
Som det fremgår af resultaterne, er det i demozonen muligt at reducere energiforbruget med 7 kWh i en periode på en time, ved at øge energiforbruget i de omkringliggende timer. Skaleres dette op til hele Kolding Storcenter, fås et potentiale på omkring 100 kW i en time eller ca. 2 W/m². Antages denne effekt anvendt på alle de større centre i Danmark, og antages det at den kan aktiveres simultant (aggregeret), fås et samlet flytbart forbrug på ca. 6.600 kW i en time.

Sprinklerlager

Der kan være andre former for termisk masse end selve bygningskonstruktionen. I forbindelse med nogle butikscentre er der etableret et sprinklerreservoir for at sikre, at der er en tilstrækkelig vandmængde til rådighed i tilfælde af brand. Dette reservoir kan med fordel udnyttes til termisk lagring (kuldelagring) i de perioder, hvor butikscenrets køleanlæg er i drift.

City2 har et sådant sprinklerlager, der er placeret i kælderetagen af bygningen og har et volumen på 500 m³. Sprinklerreservoiret ligger ca. 50 meter fra kølecentralen, og det er derfor indenfor mulighedernes rækkevidde at sammenkoble reservoiret og køleinstallationen. Hvis der regnes med at reservoiret kan udnyttes med en temperaturdifferens på $\Delta T = 5^\circ\text{C}$, svarende til den normale temperaturdifferens mellem frem- og returløb i et kølevandssystem, er det muligt at lagre ca. 2,9 MWh i sprinklerreservoiret. Det svarer til drift af begge køleanlæg ved fuld belastning i ca. én time.

Det antages derfor, at sprinklerreservoirer kan bringes i anvendelse til korttidslagring, og kan medvirke til at udjævne fluktuationer i elnettet på timeniveau. Ved lavere belastning af køleanlægget kan lagringen strækkes længere. Der er ikke vurderet et potentiale på landsplan, da det ikke været muligt at vurdere antallet af storcentre med sprinklerlager og store centrale køleanlæg, som er forudsætningen for at løsningen kan bringes i anvendelse. Som enkeltinstallation udgør sprinkleranlægget i City2 dog en relativ stor kapacitet, sammenlignet med det der kan findes i den termiske masse i bygninger.



Værktøjer

På baggrund af projektets resultater er der udarbejdet forskellige metoder og vejledninger, som er samlet i en særskilt værktøjskasse. Værktøjerne beskrives kort i det følgende.

Rådgivningskoncept for smart energi audit

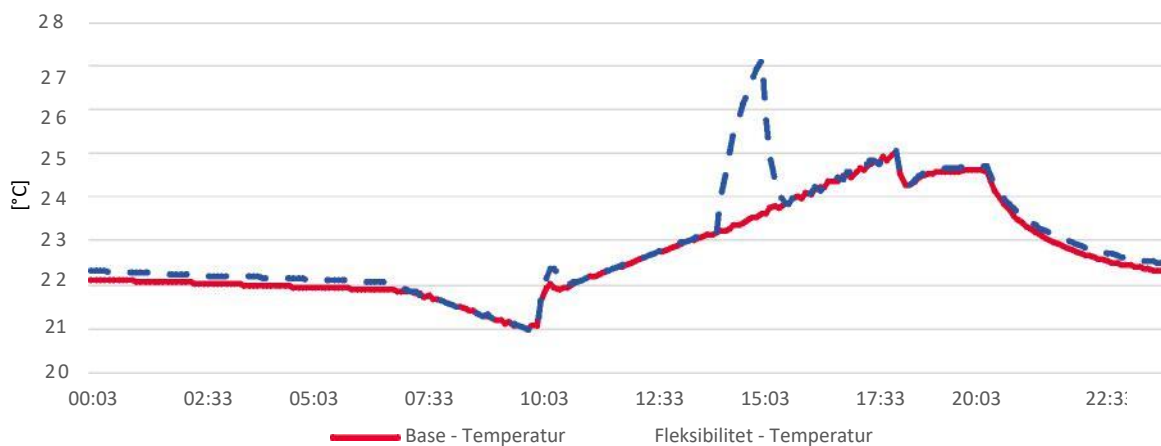
Der er i projektet udviklet et rådgivningskoncept, som trinvist beskriver hvordan der kan opnås et godt indeklima, samtidig med at energiforbruget optimeres og reduceres. Hertil er der udviklet en række skemaer til registrering af de energimæssige forhold i butikcentre. Skemaerne har til formål at kortlægge alle anlæg og relevante emner på ejendommen. Skemaerne skal være med til at give et godt overblik over ejendommen, installationer og energiforbrug.

Disse kan danne grundlag for en målrettet indsats på relevante områder, som udvælges til dybdegående projekter, herunder energi- og indeklimaoptimeringer eller energifleksibilitet.

Katalog med tekniske løsninger

Der er i projektet udarbejdet et katalog med nogle af de generelle muligheder der er for at realisere smart energy løsninger i butikcentre. Kataloget indeholder en række løsninger, som gør det muligt at skabe en grad af energifleksibilitet, herunder termiske lagring, styring ud fra prognoser m.m.

Med til kataloget er der beregningseksempler til de enkelte løsninger, som belyser potentialer.

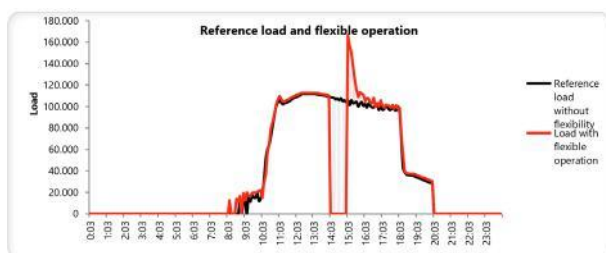


Figur 33 Visualisering af rumtemperatur for referencesituation (base case) og for en case med fleksibel drift.

Metode til vurdering og evaluering af energifleksibilitet

I forbindelse med introduktion af fleksibilitet, kan det være nødvendigt at dokumentere hvor stort et energiforbrug, der er blevet flyttet. I projektet er det demonstreret ved at bygge en digital model af storcenteret i simuleringværktøjet IESVE. Hvorefter der er simuleret to scenarier; et med normal drift (base case), og et hvor ventilation og køling afbrydes mellem kl. 14 og 15. Figur 33 viser rumtemperaturforløbet en enkelt dag for begge de simulerede scenarier.

Energiforbruget af de to scenarier er visualiseret i figur 34. Visualiseringen er baseret på et værktøj til evaluering af energifleksibilitet i bygninger, der er udviklet i IEA-EBC Annex 67 [25].



Figur 34 Visualisering af elektrisk effekt for referencesituation (base case) og for en case med fleksibel drift med værktøjerne udviklet i IEA-EBC Annex 67 [25].

Resultaterne viser at temperaturen stiger i løbet af den time, hvor der introduceres fleksibilitet, hvilket giver et øget energiforbrug i den efterfølgende time, når det termiske indeklima skal genoprettes. Ud fra ovenstående data og værktøj er det muligt at kvantificere, hvor stor en energimængde der er blevet flyttet.

Vejledning til performance testing i butikcentre

Alle nyere større bygninger er forsynet med bygningsautomatik, der skal styre og kontrollere at bygningers installationer performer som planlagt. Installationerne vil typisk være ventilation, varme, køl, lys, naturlig ventilation og solafskærmning. Bygningsautomatik kan også omfatte styring og overvågning af vedvarende energikilder, ligesom energiregistrering via el-, vand- og varmemålere kan være en del af det.

Automatikanlæggets primære opgave er at styre og kontrollere bygningens anlæg, så der opretholdes et tilfredsstillende indeklima. Endelig er det bygningsautomatikens opgave at sikre, at bygningen driftes med lavest muligt energiforbrug ud fra førnævnte kriterier. Krav til indeklima stilles af bygherre og dennes rådgiver. Desuden skal bygherrens rådgiver specificere hvordan driftsstrategien skal være for samdriften af bygningens tekniske anlæg for at opnå det ønskede indeklima med lavt energiforbrug.

Vejledningen beskriver metoder til funktionsafprøvning/performance testing af bygningsautomatik. En vigtig del af denne performancetest skal kontrollere om bygningens anlæg driftes så de ønskede komfortkriterier opfyldes, og om den fastsatte driftsstrategi er korrekt implementeret i bygningsautomatikken, og at dette sker uden unødigt energiforbrug.

Vejledning til energifleksibel drift og optimal styring

Der er udviklet en vejledning til hvordan det er muligt at udvikle og implementere en hierarkisk regulering af installationerne. Mulighederne for optimering kan koges ned til at indføre bedre koordinering af hvad der produceres af varme/køling i ventilationsanlæg og chiller i forhold til behovet i butikkerne



1.6 Anvendelse af projektets resultater og formidling

Forankring

Projektets resultater er forankret i forskningsinstitutionernes generelle vidensopbygning, virksomhedernes udviklingsaktiviteter og bygningsadministrators drift af storcentre.

Igennem det tilknyttede ph.d.-projekt er et samarbejde opstartet med Prof. Andrew Alleyne, University of Illinois Urbana-Champaign, og hans forskningsgruppe. I det år, der er tilbage af ph.d.-projektet er det planen at dette samarbejde fortsætter og særligt vil bygge oven på SEBUT-resultaterne fra demonstrationerne. Internt på Aalborg Universitet er resultaterne formidlet igennem vejledning af studerende, der har arbejdet på et projekt med samme tilgang til indgreb i HVAC-systemer som i SEBUT – i øvrigt med anvendelse af gateway og PreHE-AT-clouden fra Neogrid Technologies ApS.

Teknologisk Institut forankrer løbende projektresultater i teknologisk service som kurser, testfaciliteter og nye

projekter. SEBUT-resultaterne har særlig relevans i forbindelse med Teknologisk Instituts nye DataEnergyLab, hvor producenter kan teste styringsstrategier og sensor. Derudover vil resultaterne indgå i videnopbygning- og formidling på det energiantropologiske område.

A-Comfort ApS., Bitzer Electronics A/S, Exhausto A/S, Neogrid Technologies Aps og New Nordic Engineering A/S har gennem projektet udviklet og tilpasset deres forskellige produkter og fået nye erkendelser i samarbejde med forskningsinstitutionerne, så deres produkter kan understøtte energieffektivitet og fleksibilitet i den grønne omstilling. DEAS A/S har fået konkrete løsninger og sparring til drift af storcentre, der kan anvendes fx ved implementering og performance testing af nye styringsstrategier. Derudover har der været afholdt i alt fire workshops med driftspersonale, CTS- og HVAC-entreprenører og fjernvarmeselskab, hvor projektets resultater har været præsenteret og diskuteret.

Formidlingsaktiviteter

SEBUT-projektet har løbende formidlet projektets resultater på projektets hjemmeside sebut.teknologisk.dk og ved følgende ikke udtømmende liste af aktiviteter:

- November 2017 Konference om intelligent bygningsdrift, Taastrup
- August 2018 IEEE CCTA 2018, Konference og paper, København [2]
- September 2018 HVAC-Magasinet, artikel [1]
- Oktober 2018 IEEE SGC 2018, Konference og paper, Aalborg [3]
- August 2019 IEEE CCTA 2019, Konference og paper [4]
- November 2019 Temadag om intelligent styring af HVAC i storcentre, Taastrup



1.7 Projektkonklusion og perspektivering

Konklusion

I projektet Smart Energy Butikcentre er der foretaget undersøgelser, tilpasninger og demonstrationer af en række teknologier, der kan medvirke til den grønne omstilling af storcentre.

Et væsentligt resultat er nye energieffektive løsninger og strategier til styring af HVAC baseret på hierarkisk styring, som er succesfuldt implementeret i CTS-anlæg i Kolding Storcenter via cloud-plattform og gateway. Den foreslåede metode er mindre kompleks og lettere realiserbar end en også i projektet udviklet strategi baseret på MPC. Det gør metoden mere gennemskuelig og derved lettere at adoptere af operatører. Metoden koordinerer køling og ventilation, og er tilpas generisk til at kunne dække en række forskellige typer anlæg. Via et udviklet API til cloud-plattformen er sætpunkt-forwarding af signaler til CTS-anlægget demonstreret – en løsning, der også kan anvendes til realisering af energifleksibilitet. Der er ligeledes demonstreret en sensorpakke til verificering af indeklimaet.

En anden udfordring, der er udviklet løsninger til, er

små varmeplader i ventilationsanlæg, der kan medføre ineffektiv afkøling af fjernvarmevand, som kan være forbundet med store omkostninger. Der er i City 2 med godt resultat demonstreret et shuntarrangement, der muliggør anvendelse af kølefladen som varmeplade. Kølefladen er normalt mange gange større end varmepladen og derfor mere effektiv. I samme center er demonstreret fremløbstemperaturstyring af køleanlægget.

Endelig er der udviklet en elmåler og software til en anlægsstyring, der kan medvirke til at realisere og dokumentere energifleksibilitet i mindre ventilationsanlæg tilsluttet køling. Via cloud-plattform og sætpunkt-forwarding afprøvedes forskellige indeklimastrategier til flytning af elforbrug i et kontormiljø.

Projektets resultater er formidlet i artikler og ved forskellige arrangementer. Yderligere er der udviklet en værktøjskasse med metoder og anbefalinger

Perspektivering

Demonstrationen af den hierarkiske styringsstrategi har vist et stort besparelsespotentiale på op mod 20% af elforbruget til køling og ventilation. Der er derfor store perspektiver i yderligere udvikling og demonstration, der kan kortlægge potentialet på årsbasis og for forskellige anlægskonfigurationer. Der er en forventning om, at ph.d.- projektet, der er initieret i SEBUT kan bygge videre på de udførte demonstrationer med henblik på at kunne realisere potentialet.

Anvendelse af cloud-plattform og gateways har også vist nye teknologiske veje til integration og opdatering af styringsstrategier. Det kan fx være relevant for ældre CTS-anlæg, hvor strategier kan opdateres uden at

hardwaren nødvendigvis skal opdateres. En anden anvendelsesmulighed kan være i forbindelse med commissioning/funktionsafprøvning, hvor bygherre og dennes rådgivere indirekte kan få adgang til data fra CTS-anlægget evt. suppleret med automatisk fejldektering.

De øvrige tiltag har også forskellige potentialer, der kan bygges videre på. I den forbindelse ligger der et energifleksibilitetspotentiale for køling i større vandreservoirer som fx det 500 m³ sprinklerreservoir, der er lokaliseret i et af butikscentrene. Som enkeltinstallation udgør det en relativ stor kapacitet, sammenlignet med det der kan findes i den termiske masse i en bygning.

LITTERATURLISTE

PROJEKTETS PUBLIKATIONER

[1] A. S. Søvsø, B. P. Slott og J. B. Petersen (2018)

"Energieffektiv og -fleksibel styring af storcentre," HVAC-Magasinet nr. 11

[2] J. B. Petersen, J. Dimon Bendtsen og J. Stoustrup (2018)

"Multi-Zone Modeling and Energy Efficient Control of Shopping Center Cooling," 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), Copenhagen

[3] J. B. Petersen, J. D. Bendtsen, P. Vogler-Finck og J. Stoustrup (2018)

"Energy Flexibility for Systems with large Thermal Masses with Applications to Shopping Centers," 2018 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm), Aalborg

[4] J. B. Petersen, J. D. Bendtsen og J. Stoustrup (2019)

"Nonlinear Model Predictive Control for Energy Efficient Cooling in Shopping Center HVAC," 2019 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), Hong Kong

[5] C. H. Christiansen, J. B. Petersen og H. L. Stærmose (2020)

"Demonstration af smarte løsninger til storcentre" HVAC-Magasinet nr. 1

[6] PreHEAT API

<https://neogrid-technologies.gitlab.io/neogrid-api/>

LITTERATUR OM STYRING OG REGULERING

[7] A. Afram, F. Janabi-Sharifi, A. S. Fung, and K. Raahemifar (2017)

"Artificial neural network (ANN) based model predictive control (MPC) and optimization of HVAC systems: A state of the art review and case study of a residential HVAC system," Energy and Buildings, vol. 141, pp. 96–113

[8] V. Chandan and A. G. Alleyne (2014)

"Decentralized predictive thermal control for buildings," Journal of Process Control, vol. 24, no. 6, pp. 820–835

[9] M. Killian and M. Kozek (2016).

"Ten questions concerning model predictive control for energy efficient buildings," Building and Environment, vol. 105, pp. 403–412

LITTERATURLISTE

[10] P. H. Shaikh, N. B. M. Nor, P. Nallagownden, I. Elamvazuthi, and T. Ibrahim (2014)

"A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 409–429

[11] D. Sturzenegger, D. Gyalistras, M. Morari, and R. S. Smith (2016)

"Model Predictive Climate Control of a Swiss Office Building: Implementation, Results, and Cost–Benefit Analysis," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 24, no. 1, pp. 1–12

[12] F. Tahersima, J. Stoustrup, H. Rasmussen, and S. A. Meybodi (2012)

"Energy Flexibility for Systems with large Thermal Masses with Applications to Shopping Centers," 2018 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm), Aalborg

LITTERATUR OM ENERGI, INDEKLIMA OG ADFÆRD

[13] M. Haase, K. S. Skeie, R. Woods, S. Mellegård & R. D. Schlanbusch (2015)

"Typical functional patterns and socio cultural context," *Re-conceptualize shopping malls from consumerism to energy*, Bolzano

[14] R. Woods, K. S. Skeie & M. Haase (2016)

"The influence of user behaviour on energy use in european shopping centres," *Sustainable Development*, 25(1), 11-24. doi:10.1002/sd.1638

[15] A. B. Ridderhaugen & T. Ridderhaugen (2015)

"Adfærdsbarrierer ved valg af lyskilder i detailhandlen," *Decision Design for Energisparesekretariatet under Energistyrelsen*

[16] M. Lombana & G. L. Tonello (2017)

"Perceptual and emotional effects of light and color in a simulated retail space," *Color Research and Application*, doi:10.1002/col.22127

[17] Ministry of power, India (2011)

"First Ever BEE Five Star Label for a Shopping Mall," *Scheme for BEE Star rating for shopping malls*, <https://beeindia.gov.in/sites/default/files/BEE%20Star%20Rating%20-%20Shopping%20Mall.pdf>

LITTERATURLISTE

[18] Siemens (2011)

"Sello Shopping Mall - putting energy savings back into your facility. Energy Performance Contracting increases comfort and yields substantial savings in operating costs," <https://www.downloads.siemens.com/download-center/Download.aspx?pos=download&fct=getasset&id1=A6V10356050>

[19] S. Stensson, M. Axell, P. Fahlén, J. Eriksson, & S. Roos (2009)

"Lighting powers in shops and their effect on the energy performance of a shopping mall," Paper presented at the IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009, 1260-1267

[20] D. Mukherjee (2014)

"A green mall by the riverside", The Telegraph (India)

[21] J. Von Grabe (2016)

"How do occupants decide their interactions with the building? from qualitative data to a psychological framework of human-building-interaction," Energy Research and Social Science, 14, 46-60. doi:10.1016/j.erss.2016.01.002

[22] S. Siegmund, K. Reiter & A. Ampenberger (2017)

"Visual, emotional and energy effects of a new lighting concept," Re-conceptualize shopping malls from consumerism to energy, Bolzano

[23] K. B. Janda (2011)

"Buildings don't use energy: People do," Architectural Science Review, 54(1), 15-22. doi:10.3763/asre.2009.0050

[24] European Commission (2017)

"Cost-competetive deep renovation of shopping centres: technologies and drivers for EU policies", Brussels

[25] T. Weiß, D. Rüdissler og G. Reynders (2019)

"Tool to evaluate the Energy Flexibility in Buildings – A short manual", IEA-Annex 67 publication and Excel-spreadsheet, IEA-EBC Annex 67