



EKSEMPLER PÅ ENERGIFLEKSIBILITETSPOTENTIALER I BORNHOLMS HOSPITAL

– Case 2: Integration af vedvarende energi i
komplekse bygninger



Region
Hovedstaden

Denne rapport er udarbejdet af DTU som en del af Case 2 i FUTURE projektet. Notatet beskriver udvalgte eksempler fra Bornholms Hospital, som vi har besluttet at undersøge nærmere samt de data og informationer, der er nødvendige for at vurdere værdierne af de foreslåede tiltag.

Projektleder



Projektet er støttet af



Region
Hovedstaden



Projektet støttes af den Europæiske Regionaludviklingsfond og Interreg ÖKS samt Region Hovedstaden, Region Sjælland og Region Skåne.

Forfattere

Per Nørgård, DTU

Publiceret af

FUTURE

Layout forside og bagside

Kasper Laulund Kjeldsmark (Gate 21)

2021

FUTURE FREMTIDENS INTELLIGENTE ENERGI- OG RESSOURCESYSTEM

FUTURE-projektet består af syv visionære casesamarbejder på tværs af de tre regioner i Greater Copenhagen. De syv cases tester og demonstrerer forskellige teknologier, værktøjer eller forretningsmodeller indenfor vedvarende energi eller udnyttelse af ressourcer:

- Case 1: Fleksibel energilagring i individuelle bygninger
- **Case 2: Integration af vedvarende energi i komplekse bygninger**
- Case 3: Forbedret energihusholdning gennem balanceret varme og køling i sygehusbygninger
- Case 4: Energioptimering gennem smarte grids i bygninger
- Case 5: Cirkulære løsninger, der integrerer energi, ressourcer og affald
- Case 6: Resttekstiler som en del af fremtidens byggeri
- Case 7: Intelligent brug af produktdata, der forbedrer og fremmer genbrug i cirkulære samfund

Vedvarende energi

Projektet vil:

- Udnytte, integrere og lagre vedvarende energi bedre, så vi får et mere fleksibelt energisystem
- Fremme energieffektive løsninger i bygninger

Derfor skal vi designe løsninger og infrastruktur, der kan bygge bro mellem behovet for forsyningssikkerhed på den ene side, og det faktum at vedvarende energikilder ofte fluktuerer.

Ressourceudnyttelse

Projektet vil:

- Øge ressourceeffektiviteten og skabe en cirkulær omstilling af samfundet. Vi skal forlænge levetiden af materialer, genanvende affald og rester så de indgår i nye kredsløb.
- Begrænse produktionen af jomfruelige materialer og dermed også energiforbruget

Derfor demonstrerer projektet, hvordan man lokalt kan styre produkt- og materialestrømme, så man fremmer en mere intelligent materialeanvendelse

Læs mere her:

<https://www.gate21.dk/future/>

Indhold

Introduktion	5
Ekspertbaseret metode til identifikation af potentiel energifleksibilitet i komplekse bygninger	6
Metoden	7
Bornholms Hospital	11
Nødgeneratorer	13
Fleksibilitetsmulighed	13
Potentiale	13
Køkkenkølekompessor	15
Fleksibilitetsmulighed	16
Målinger og eksperiment	17
Potentiale	17
BOH's centrale kølesystem	18
Målinger og eksperiment	21
Potentiale	22
Udvidet termisk kapacitet	24
Potentiale	25
Bygningernes termiske kapaciteter	26
Måling og eksperiment	26
Potentiale	29

Introduktion

Formålet med FUTURE Case 2 'Integration af vedvarende energi i komplekse bygninger' er at udvikle og demonstrere metoder og værktøjer til at identificere og analysere energifleksibilitetspotentialer i komplekse bygninger. Energifleksibilitet skal her forstås som bygningernes energisystemers evne til at levere energifleksibilitet til de eksterne energisystemer – det offentlige elsystem og fjernvarmen. Energifleksibiliteten kan enten være i form af fleksibilitet i tid, hvor energiudvekslingen med energisystemet er uændret set over længere tid, men hvor energiudvekslingen kan flyttes kort tid (fx i nogle timer), eller i form af skift mellem forskellige energikilder (el / fjernvarme). Energibesparelse er således ikke (direkte / nødvendigvis) omfattet af energifleksibilitet, hvorimod omkostningsbesparelser for en given energitjeneste er.

Energifleksibilitet er en udveksling mellem (mindst) to parter – den der tilbyder fleksibilitet, og den der kan anvende fleksibiliteten (systemoperatøren). Med mindre energifleksibiliteten er påtvungen, vil en energifleksibilitet kun blive realiseret hvis begge parter har fordel af den – typisk, hvis begge kan spare penge. Levering af en energifleksibilitet vil altid være forbundet med en vis ulempe – fx ekstra omkostninger, ekstra besvær eller forringet energiservice, mens det er systemoperatøren, der har fordel af fleksibiliteten. Værdien af energifleksibiliteten skal overstige (værdien af) ulemperne, for at den potentielle energifleksibilitet bliver nyttiggjort. Systemoperatøren (modtageren af energifleksibiliteten) skal således være parat til på en eller anden måde at dele værdien af energifleksibiliteten med leverandøren af fleksibiliteten, hvis leverandøren skal være interesseret.

Der findes forskellige forretningsmodeller for handel af energifleksibilitet. To af problemerne med at handle med energifleksibilitet er, at det er vanskeligt at kvantificere energifleksibilitet, og at det for en given energiudveksling kan være vanskeligt at adskille udvekslingen af energifleksibilitet fra den totale energiudveksling. Den simpleste model er at anvende varierende priser for energiudvekslingen afhængig af fx tidspunkt, effekt og energi. På den måde undgår man at skulle udskille energifleksibiliteten fra den samlede energiudveksling.

Energifleksibilitet

Den stigende produktion fra variable vedvarende energikilder (sol, vind, bio, vand) betyder at energifleksibilitet bliver lige så vigtig og værdifuld som energieffektivitet. Da sol og vind varierer voldsomt, vil den nødvendige produktionskapacitet for at sikre forsyningen – og den tilhørende produktion – afhænge af fleksibiliteten i energisystemet. Jo mindre fleksibilitet i systemet, desto større del af den potentielle produktion kan ikke udnyttes. Allerede i dag kan hele den potentielle produktion ikke udnyttes, og vi oplever negative priser på elmarkedet.

Fleksibiliteten kan være i form af fleksibilitet i tid og sted eller fleksibilitet i kilde, og kan fx realiseres gennem variabel service, produktion, lagring, konvertering og eksport / import.

Komplekse bygninger

En kompleks bygning eller et komplekst bygningskompleks forstås i denne sammenhæng som en bygning eller en samling af nabobygninger, hvori der indgår komplekse energitjenester og -løsninger.

Ekspertbaseret metode til identifikation af potentiel energifleksibilitet i komplekse bygninger

Med Bornholms Hospital som case har FUTURE projektet udviklet og afprøvet en metode til at identificere mulige energifleksibilitetspotentialer i et hospitals energisystem.

Et hospitals energisystem og -løsninger er typisk etableret gennem tilføjelser og indpasninger af nye komponenter over tid i takt med hospitalets udvidelser og udviklinger. Når et nyt hospital etableres, designs energiløsningerne typisk til at kunne løse de aktuelle behov, og hvor energifleksibilitet og udvidelser ikke er tænkt ind. Det betyder at hospitalets energisystem efterhånden kommer til at bestå af mange forskellige løsninger, der kan være vanskelige at få til at fungere godt og effektivt sammen. Det er derfor vigtigt at både energieffektivitet, energifleksibilitet og udbygninger er tænkt ind i det grundlæggende design af et hospitals energisystem.

I takt med udviklingen af bygningernes lavere energiforbrug, de avancerede bygningsstyringer og den øgede elektrificering af energisektoren, opstår der nye muligheder. Bygningernes lavere energiforbrug opnås gennem kombinationer af øget isolering, større lufttæthed, større lavenergi vinduesarealer, lavenergibelysning, bedre varme- og luftskiftestyringer med varmegenvinding. De nye bygninger vil derfor i stigende grad også have behov for at holde indetemperaturen nede. De nye indeklimaløsninger omfatter bl.a. bygningsintegrerede rumtemperaturløsninger, styret luftskifte, varmegenvinding, kombinerede varme og køleløsninger, og lavtemperatur nærvarmeløsninger. Den øgende elektrificering giver mulighed for at anvende elektrisk drevne varmepumper. De nye løsninger giver mulighed for mere decentrale løsninger. Og de avancerede bygningsstyringer



Projektteamet samlet på Bornholms Hospital (foto: Per Nørgård, 2018).

giver mulighed for øget energifleksibilitet – uden at gå på kompromis med de primære funktioner – herunder komforten.

Da energiløsningerne i hospitaler er meget komplekse og forskellige, har vi vurderet at værdien af resultaterne fra en modellering og simulering af et hospitals energisystem i den nødvendige detaljeringsgrad ikke står i rimeligt forhold til den nødvendige indsats.

Metoden

Vi har derfor udviklet og afprøvet en ekspertbaseret metode. Den går i alt sin enkelhed ud på at et ekspertteam sammen gennemgår hospitalets energitjenester og energiløsninger for at identificere, kvantificere og vurdere potentielle muligheder for at opnå energifleksibilitet.

Metoden omfatter følgende trin:

- 1) Udpege en ekspertteam og beskrive deres kommissorium
- 2) Skabe et overblik
- 3) Inspektion af udvalgte tekniske systemer / løsninger / komponenter
- 4) Identificere potentielle energifleksibilitetsmuligheder (kandidater)
- 5) Designe og gennemføre supplerende måleprogrammer til kvantificering af potentialerne
- 6) Vurdere værdi, konsekvenser og omkostninger
- 7) Udarbejde konkret forslag til udviklingsprojekter, inklusiv forretningsmodeller

I metoden indgår følgende elementer:

- Dialog og inspektion
- Gennemgang af dokumentation og data
- Udarbejdelse af simplificerede diagrammer
- Identifikation af elementer / komponenter med relativt store fleksibilitetspotentialer
- Design og gennemførelse af eventuelle supplerende målinger
- Diskussion af værdi og konsekvenser af fleksibiliteten og hvordan den eventuelt kan realiseres, herunder omkostningerne

Ekspertteam

Teamet består af personer med teknisk kendskab til hospitalets energiløsninger og personer med forstand på energifleksibilitet. Teamet skal sammensættes af personer med indsigt i:

- Bygningens overordnede energibehov, energiløsninger og udviklingsplaner
- Driften af bygningens energisystem, herunder bygningens digitale overvågnings og styringssystem
- Implementering af automatiserede løsninger
- Potentiel energifleksibilitet

Teamets kommissorium aftales.

I BOH-casen deltog en maskinmester fra BOH, en tekniker fra leverandøren (Schneider) af det centrale overvågnings- og styringssystem, en rådgivende ingeniør fra Balslev, en specialkonsulent fra Region Hovedstaden, Center for Ejendomme, og en forsker fra DTU, Center for el & energi.

Overblik

Ekspertteamet danner sig først et overblik af bygningens energibehov og energiløsninger ud fra dokumentation og data (nøgletal, overordnede tegninger af energisystemet, det digitale bygningsstyringssystem), herunder:

- kortlægger hospitalets behov for energitjenester;
- beskriver hospitalets energisystemdesign;
- gennemgår hospitalets energiløsninger;
- beskriver den overordnede styring.

Energitjenesterne kortlægges både kvalitativt (type og vigtighed af tjenesten) og kvantitativt (hvor meget, hvornår og forudsigelighed).

Energisystemdesignet beskrives og kvantificeres, herunder de interne energiinfrastrukturer og tilslutninger til offentlige / fælles energisystemer.

Energiløsningerne karakteriseres både kvalitativt (dynamisk drift, mulighed for udnyttelse af varmetabet) og kvantitativt (belastningsgrad, effektivitet).

Den overordnede styring af hospitalets energisystem beskrives, herunder de overordnede styringsparametre, overvågningen og reguleringen.



Ekspertteamet inspicerer energiinstallationerne på Bornholms Hospital (foto: Per Nørgård, 2018).

Identifikation af energifleksibilitetspotentialer

Potentielle energifleksibilitetspotentialer identificeres gennem dialog og inspektion ud fra dokumentationen, data og eksperternes forskellige og supplerende viden om de forskellige komponenter og delsystemer, deres energiforbrug og deres fleksibilitetspotentialer.

Et fleksibilitetspotentiale fra en komponent eller et delsystem forudsætter

- at løsningen har en energibuffer,
- at den tilhørende energitjeneste kan sikres gennem forskellige energikilder, eller
- at energitjenesten er fleksibel med hensyn til kvaliteten eller tidspunktet.

Kombinationen af dokumentation, dialog og fysisk inspektion er vigtig. Dokumentationen angiver omfang og kontekst; den åbne dialog bringer alle kompetencer og muligheder i spil; og den fysiske inspektion giver de eksterne eksperter mulighed for at få øje på nye muligheder.

Fleksibilitetspotentialerne beskrives og kvantificeres så vidt muligt.

Yderligere data

Der vil typisk være behov for yderligere data og mindre eksperimenter og målinger til at kvantificere mulighederne.



Måling af kølekompressores elforbrug på Bornholms Hospital (foto: Per Nørgård, 2018).

Teamet planlægger og gennemfører mindre tests og målinger, hvor dele af energisystemet fx manuelt tvangsstyres og reaktionen registreres.

I BOH-casen har vi fx målt reaktionen i elforbruget fra kompressorer, dels i det centrale kølesystem og dels til kølerummene i centralkøkkenet ved manuelle ændringer af specifikke temperatur setpunkter.

Realisering af fleksibilitetspotentialer

Ud fra de indsamlede data og oplysninger, de supplerende tests og analyser, vurderer teamet det realistiske fleksibilitetspotentiale, værdien af potentialer, hvad der skal til, for at realisere potentialer, og hvad det skønnes at koste.

For de cases, hvor det giver mening, skal der efterfølgende udarbejdes egentlige projektforslag, inklusiv forretningsmodeller. Dette vil typisk ligge uden for ekspertsteamets kommissorium.

Bornholms Hospital

Et hospital vil typisk være et komplekst bygningskompleks. FUTURE Case 2 benytter Bornholms Hospital (BOH) i Rønne som eksempel på energitjenester, energiløsninger og energifleksibilitet i et komplekst bygningskompleks. BOH hører under Region Hovedstaden. BOH anvender energi til regulering af indeklimaet, til belysning og til elektrisk apparatur. Hospitalet har en række funktioner (fx i operationsafsnittet), som er kritisk afhængige af stabil energiforsyning. Hospitalet er tilsluttet det offentlige elnet (BOEF) og fjernvarmenettet i Rønne (RVV). Hospitalet har egen elproduktion med solceller. Hospitalet anvender desuden en nærliggende sø (Zahrman Sø) som kølekilde. Og endelig har hospitalet selv to dieselmotorbaserede nødgeneratorer til nødforsyning af elektricitet.

Det Bornholmske elnet er elektrisk forbundet til Sydsverige. BOEF ønsker dog at være i stand til at køre elsystemet på Bornholm i ø-drift i tilfælde af problemer med forbindelsen til Sverige. Og Bornholm ønsker også at være grøn – herunder med et grøn energisystem Bornholm har derfor etableret en del vind- og solkraft, og har derfor brug for fleksibilitet i elnettet.

RVV producerer varme til Rønne og el til elsystemet baseret på importeret træflis. Driften er overordnet styret af varmebehovet. RVV har etableret en stor vandbaseret termisk lagertank ved kraftvarmeværket i Rønne. RVV har derfor ikke umiddelbart brug for yderligere termisk fleksibilitet, og RVV kan desuden levere fleksibilitet på el-siden.

Det betyder at RVV ikke har interesse i termisk fleksibilitet fra BOH, men at BOEF er interesseret i elfleksibilitet fra BOH. BOH køber allerede i dag el til varierende priser. Det er dog endnu ikke lykkedes os at få nærmere oplysninger om disse priser. Analyserne vil derfor indtil videre blive baseret på NordPool Spot marked priser (DK2).



Infotavle ved hovedindgangen til Bornholms Hospital (foto: Per Nørgård, 2018).



Soleceller på gavlen af hovedbygningen på Bornholms Hospital (foto: Per Nørgård, 2018).

Vi har (i første omgang) identificeret og udvalgt 4 eksempler fra BOH med tydelige og betydelige el-fleksibilitetspotentialer, som vi ønsker at analysere nærmere:

- 1) Smart prøvedrift af BOH's nødgeneratorer.
- 2) Smart drift af kølekompressoren til centralkøkkenets kølerum til fødevarer.
- 3) Smart drift af det centrale kølesystem.
- 4) Udnyttelse af bygningernes termiske kapaciteter.

Eksemplerne er udvalgt på baggrund af en fælles screening af potentielle el-fleksibilitetsmuligheder.



RVV's termiske lagertank i Rønne (foto: Per Nørgård, 2018).

Nødgeneratorer

BOH har 2 diesel-generatorer (placeret i Byg N), som er tilsluttet på kunde-siden af afregningsmåleren med el-selskabet (BEOF). Disse fungerer som nødforsyning ved strøm-svigt. Begge generatorer kan køre i ø-drift eller synkronisere op mod det offentlige net, og dermed køre nettilsluttet. De to generatorer har mærke-effekter på hhv 760 kVA (G1) og 1900 kVA (G3) (dog begrænset til 1700 kVA), og har et (oplyst) forbrug på ca 0,3 l/kWh @ 500 kW.

De to generatorer skal testes minimum hver 14'ende dag. De bliver derfor begge generatorer startet op hver 14'ende dag (dog ikke samtidig), hvor de kører i nettilsluttet drift i ca 1 time med en belastning som er mindre end hospitalets samlede forbrug – typisk 3-500 kW. Produktionen fra generatorerne reducerer således forsyningen fra el-selskabet tilsvarende.

Fleksibilitetsmulighed

Da generatorerne under alle omstændigheder skal startes op med mellem-rum, kan BOH eventuelt tilbyde BEOF at starte generatorerne op på tidspunkter, hvor det har størst værdi for BOF – fx på tidspunkter, hvor BEOF har brug for ekstra produktions-kapacitet i denne størrelses-orden.

Yderligere afklaring (input til analysen):

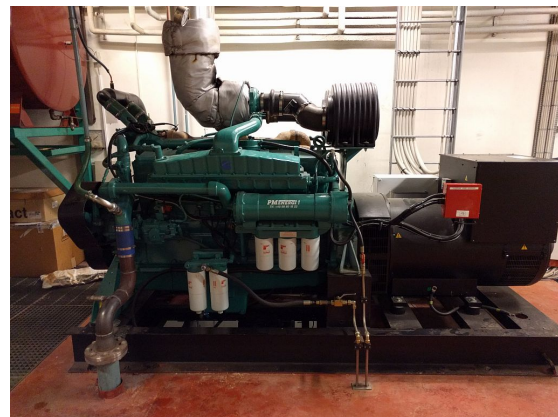
- Hvad er de formelle krav til test af nødgeneratorerne – hvor ofte (er der en vis fleksibilitet), hvad skal testes (er der fx en checkliste)?
- Personalekrav i forbindelse med test-drift af generatorerne? Kan test-driften fjernstyres / automatiseres?
- Er BEOF interesseret i denne mulighed – og i givet fald, i hvilke ydelser? Er BEOF villig til at betale for disse ydelser?
- Hvordan kommunikeres i givet fald behovet fra BEOF til BOH? Hvor lang tid i forvejen? Er BOH forpligtet til at opfylde et behov / ønske fra BEOF? Vil det kræve ekstra standby personale hos BOH? Kan generatorerne fjernstyres – fx fra BEOF?
- Hvad koster en kWh produceret fra diesलगeneratorerne?

Potentiale

Mange kritiske infrastrukturer – som fx hospitaler og datacentre – har større nødstrømsforsyninger, som kan forsyne de kritiske funktioner gennem længere tid. Disse er typisk baserede på diesel-generatorer på nogle MW. Disse bliver normalt testet ca en gang om måneden med produktion i ca en time. Da disse nødgeneratorer er designet til automatisk, ubemandet opstart, kan testen også



*Nødgenerator G3 på 1900 kVA
(foto: Per Nørgård, 2018).*



*Nødgenerator G1 på 670 kVA
(foto: Per Nørgård, 2018).*

foretages i ubemandet drift. Det er derfor oplagt at foretage disse testskørsler med produktion af diesel-generatorerne på tidspunkter, hvor det giver mest værdi for elnettet. Det kræver at der er et signal til rådighed, som den automatiske styring af diesel-generatoren kan reagere på.

Der findes i størrelsesordenen 1000 diesel-generator baserede nødgeneratoranlæg i Danmark med en samlet kapacitet i størrelsesordenen 1 GW.

Køkkenkølekompressor

En kølekompressorenhed forsyner køle-elementerne (fordampere) i 4 køle- ($5-10^{\circ}\text{C}$) og 2 fryserum (-21°C) i centralkøkkenet (i Byg F) med flydende CO_2 under højt tryk (ca 40 bar).

Kompressorenheden indeholder i alt 4 kompressorer – 2 store og 2 små. De små kompressorer øger trykket af retur CO_2 'en fra fordampere i frostrummene, mens de store kompressorer øger trykket fra retur CO_2 'en fra kølerummene samt fra de små kompressorer (se diagram). Varmen fra den komprimerede CO_2 afleveres primært til hospitalets centrale, vandbaserede kølesystem. Hvis det centrale kølesystem ikke har tilstrækkelig kapacitet, køles CO_2 'en med en udendørs luftkølet køler med styrede blæsere. Den af kølekompressoren producerede varme genanvendes således ikke. Den flydende CO_2 lagres i en tank ved ca 40 bar, hvorfra fordampere i køle- og frostrummene forsynes.

Kompressorernes elektriske effekter er på hhv 14,5 kW og 1,5 kW. Kompressorerne er individuelt frekvensstyrede. Driften af kompressorerne styres af trykket på lavtrykssiderne af kompressorerne. Trykket i



Køkkenkølekompressorenhed
(foto: Per Nørgård, 2018).

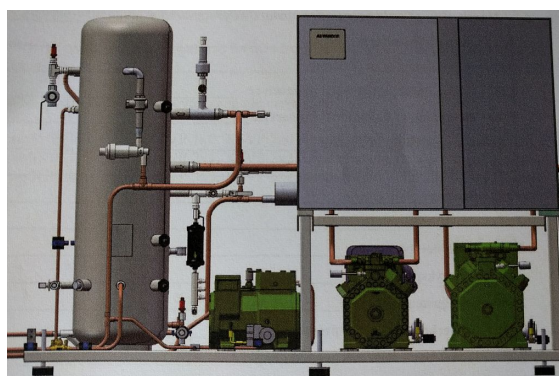
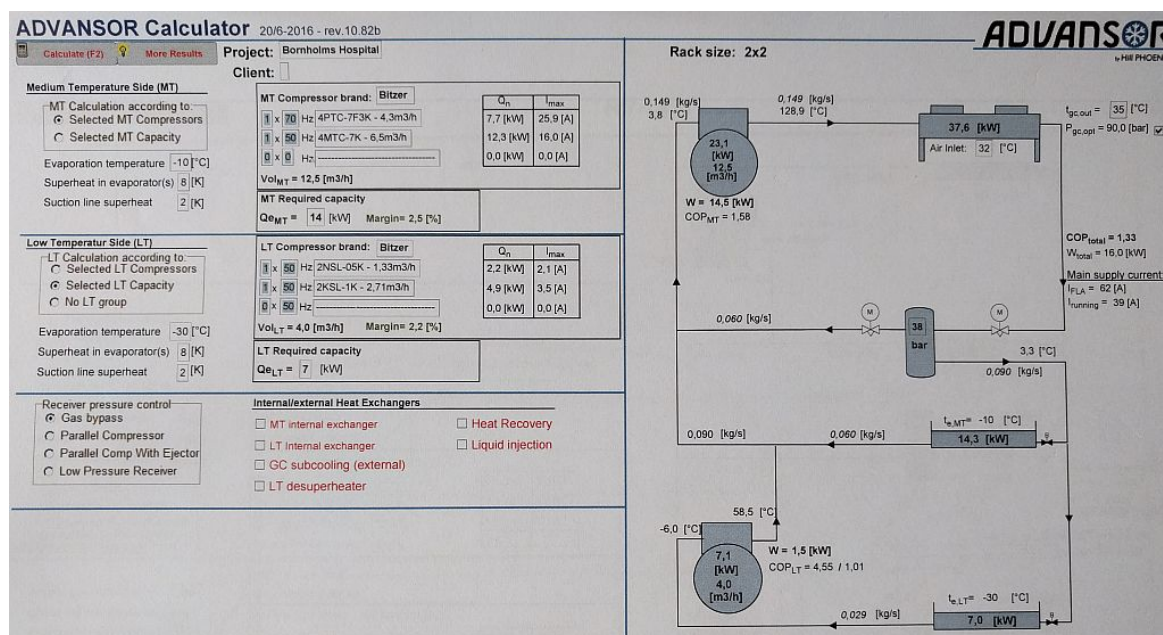


Illustration af komponenterne i
køkkenkølekompressorenheden
(foto: Per Nørgård, 2018).



Screen dump af skærbillede af status af driften af køkkenkølekompressoren.

tanken bestemmes af CO₂'ens damptryk ved den givne temperatur – og er altså uafhængig af niveauet af det flydende CO₂ i tanken.

Køkkenet er i drift kl 5-15 hver dag.

Fleksibilitetsmulighed

Både køle- og frostrummene bruges til opbevaring af fødevarer. Der er derfor krav til temperaturerne i rummene. Temperaturerne af de enkelte rum reguleres af individuelle styringer ved rummene. Styringerne måler temperaturerne i rummene og styrer CO₂-flowet til fordamperne i rummene i forhold til et givet setpunkt for temperaturen.

Ifølge diagrammet ligger kompressorenhedens elektriske forbrug i størrelsesordenen 20 kW. Vi har gennemført målinger af enhedens elforbrug over nogle dage. Målingerne indikerer et elforbrug på nogle få kW. Målingerne bør derfor gentages og kontrolleres.

Kølingen af frostrummene (-21°C) formodes at være årsag til hovedparten af kompressorenhedens energiforbrug. Temperaturerne i frostrummene skal blot holdes inden for et givet temperaturinterval. Ved at ændre setpunktet for temperaturen i frostrummene inden for dette interval kan kompressorenhedens elforbrug forskydes i tid.

For at få en indikation af omfanget af denne fleksibilitet skal vi kende kravene til temperaturerne i frostrummene samt hvor meget forbruget kan flyttes i både effekt og tid.



Den lokale styringsenhed af temperaturen i Kølerum 1 (foto: Per Nørgård, 2018).

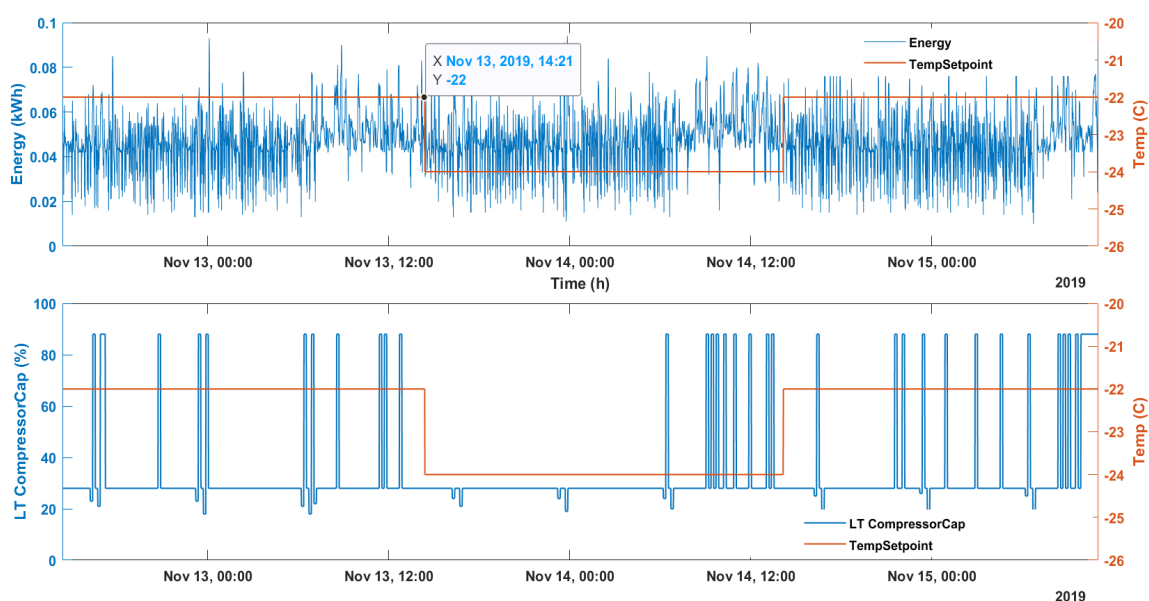
Målinger og eksperiment

Vi har gennemført målinger af kompressorenhedens samlede elforbrug med høj tidsopløsning (1 min) over nogle dage – først uden at ændre på driften, og derefter hvor temperatursetpunktet for frostrummene blev ændret et par grader over et døgn. Det er ud fra målingerne tydeligt, at der er aktivitet i køkkenet fra tidlig morgen til ud på eftermiddag, hvor elforbruget blev mere regelmæssigt. Vi valgte derfor at ændre setpunkttemperaturen for frostrummene sidst på eftermiddagen, så reaktionen på ændringen blev mest tydelig.

Vi gentog eksperimentet et par gange, men kunne ikke registrere nogen signifikant ændring i elforbruget. Det lykkedes os aldrig at finde ud af, hvorfor vi ikke så en reaktion i elforbruget.

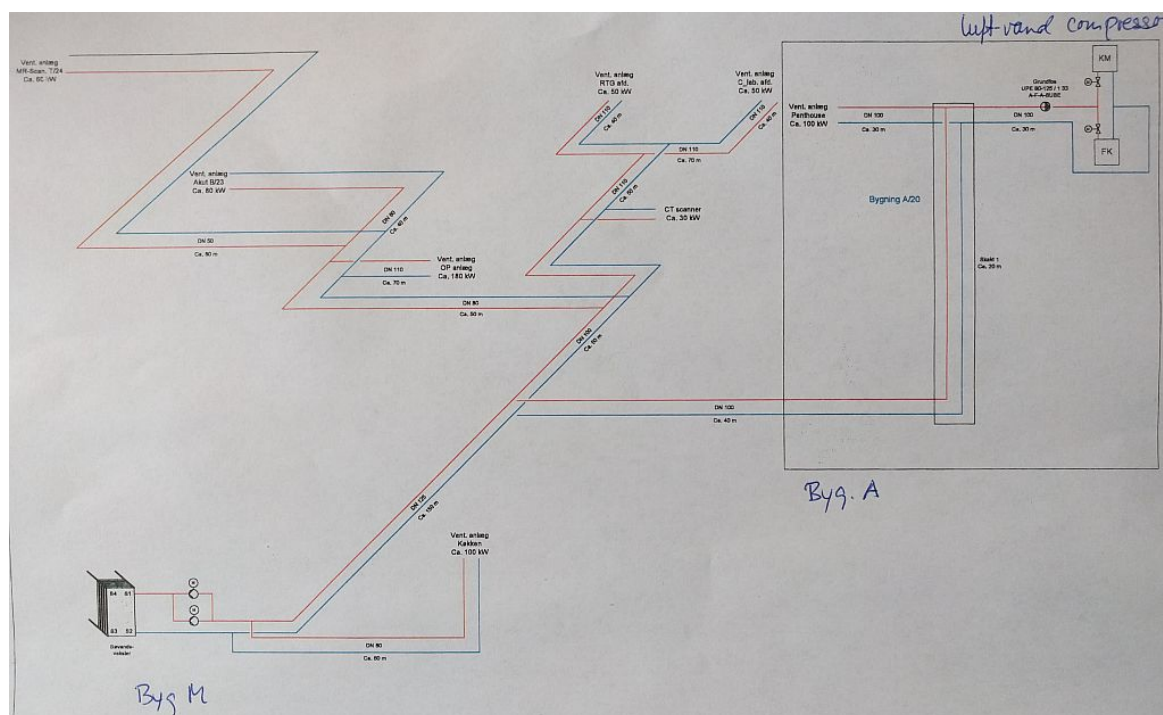
Potentiale

Alle større køkkener har større køle og frostrum, som typisk køles med centrale, elektrisk drevne køleanlæg. Kølingen til både køle og frostrum kan typisk uden at det påvirker temperaturen i madvarerne forskydes i adskillige timer i tid. Disse køleanlæg vil typisk have et elektrisk forbrug på få kW. Til gengæld er der rigtig mange af dem. Det betyder, at det skal være meget simpelt at tilbyde denne fleksibilitet, for at være interessant. Det er det ikke i dag. Men det kan forventes at blive standard i fremtiden for denne type anlæg, og dermed simpelt at tilbyde.



Tidsserieplot af elforbrug og belastning af LT kompressoren over tre dage i november 2019, hvor temperatursetpunktet for frostrummet blev ændret fra de normale -22°C til -24°C i et døgn.

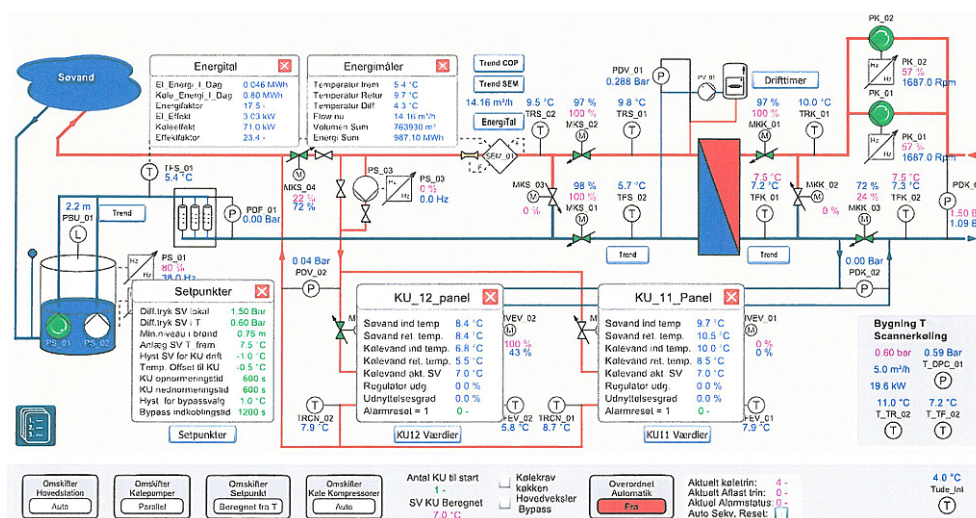
Eksempler på energifleksibilitetspotentialer i Bornholms Hospital



Skitse af BOH's centrale, vandbaserede kølesystem med Søvandskøleanlægget nederst til venstre og Frikøleanlægget øverst til højre.

BOH's centrale kølesystem

Bornholms Hospital (BOH) har et centralt, vandbaseret kølesystem til køling af kritiske funktioner i hospitalet. De mest kritiske er scannerrummene, hvor rumtemperaturen skal holdes under 25°C. Denne temperatur er derfor en nøgletemperatur i driften af kølesystemet. Kølebehovet er naturligvis størst i perioder med varmt vejr (sommer) og mindst i perioder med koldt vejr (vinter), og kølebehovet er større om dagen end om natten – både pga den lavere udetemperatur om natten og pga af den større aktivitet om dagen end om natten.



Kopi af skærbillede fra 2019-03-05 af styring og overvågning af BOH søvandskøleanlæg.



*Zahrmann Sø, ca 100 m fra Bornholms Hospital, som benyttes som kilde til køling på hospitalet.
(Foto: Per Nørgård, DTU, 2018)*

Der er to kølekilder til dette system: udeluften og vandet fra en nærliggende sø. Både udeluften og søvandet kan både benyttes direkte via varmevekslere og køles ekstra ned vha eldrevne varmepumper. Temperaturerne i kølekilderne er højest om sommeren, hvor kølebehovet er størst.

Prioriteringen af driften er:

- 1) Køling med udeluften (Frikøleanlægget)
- 2) Køling med søvandet direkte
- 3) Køling med søvandet via varmepumperne

De tre driftsformer kan kombineres. Driften er i dag semi-automatisk. Kombinationen af de tre driftsformer og set-punktet for fremløbstemperaturen for det centrale kølevand vælges manuelt. Den automatiske drift forsøger at opretholde den valgte fremløbstemperatur.

Set-punktet for fremløbstemperaturen vælges efter erfaring således at man er sikker på at overholde kravet i scannerrummene. I eksemplet i diagrammet er set-punktet for fremløbet 7,5°C. Det gav en returtemperatur på 10°C. På skærmbilledet er også angivet frem- og returløbs-temperaturerne i scannerrummene – hhv 7,2°C og 11°C.

Søvandskøleanlægget indeholder to varmepumpeanlæg (KU_11 og KU_12 i diagrammet), hver med 4 kompressorer. Hver kompressor har tilsyneladende en elektrisk effekt på ca 4 kW. Når søvandsvarmepumperne er koblet ind (driftsform 3), forsøger den automatiske styring at holde den valgte fremløbstemperatur ved at koble varmepumpernes kompressorer ind og ud efter behov. Dermed opnås en meget lille variation af fremløbstemperaturen.

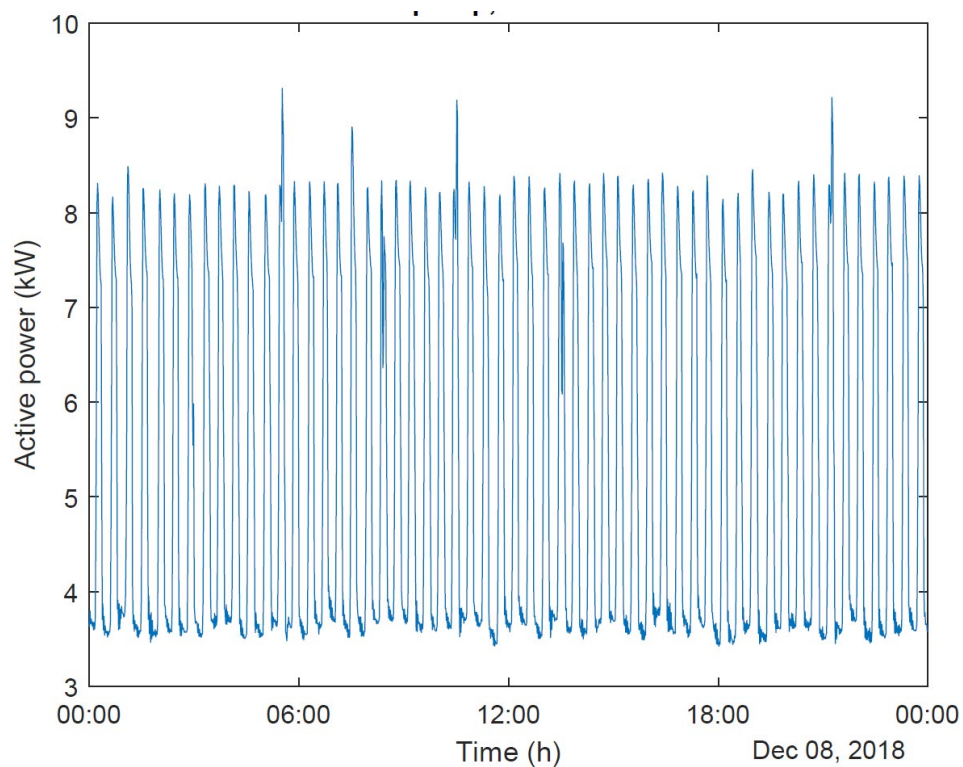


Køleanlægget til ekstra køling af søvandet består af to ens anlæg, hver med 4 kølekompressor og varmevekslere mellem søvandet og det centrale kølesystem. (Foto: Per Nørgård, DTU, 2018)

Da det for det første ikke er fremløbstemperaturen, der er den kritiske temperatur, og der for det andet, på grund af systemets termiske kapacitet, er stor træghed i systemet, vil driften af kompressorerne, så længe der er overskudskølekapacitet, kunne forskydes i tid.

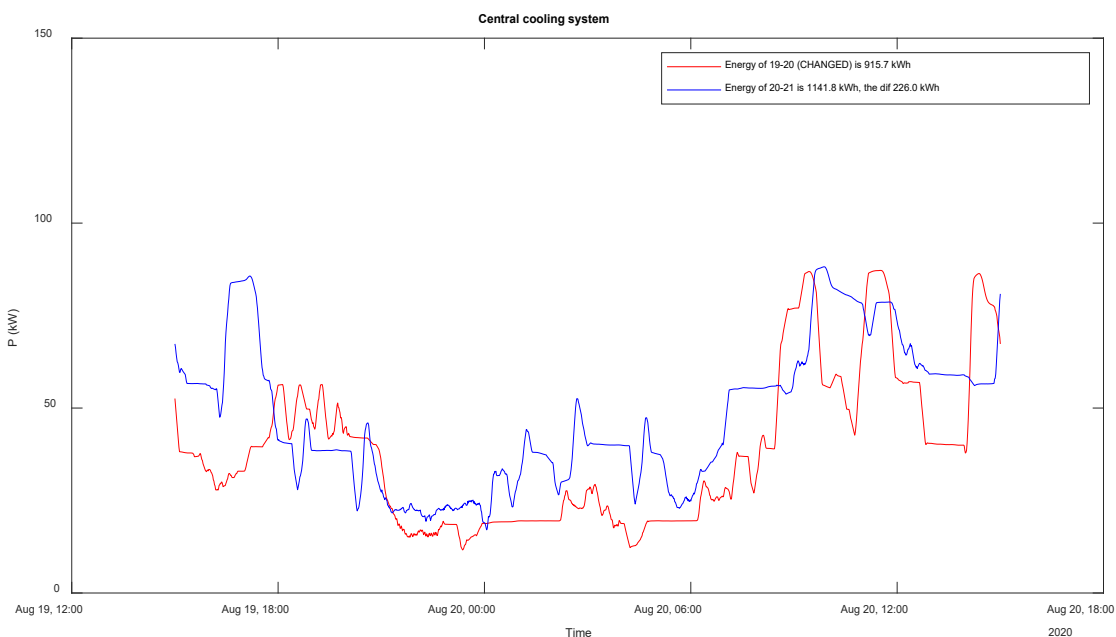
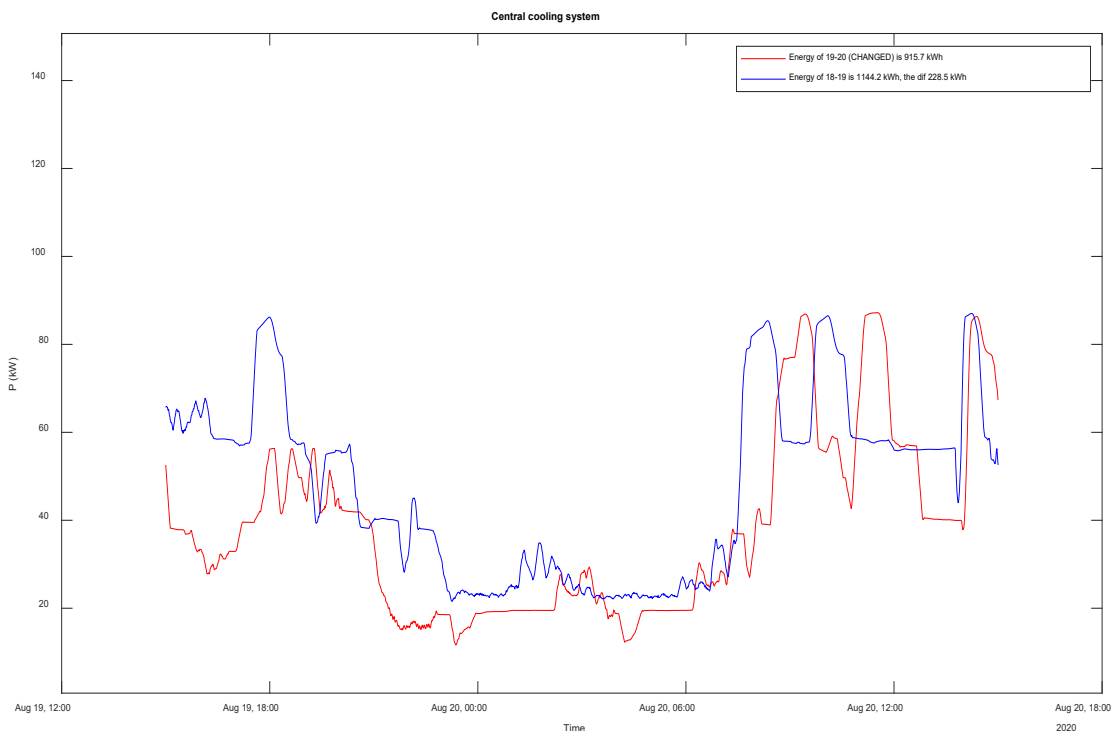
Målinger og eksperiment

Søkøleanlæggets samlede elforbrug blev målt med stor tidsopløsning (1 min), mens setpunktet for temperaturen af kølevandet fra Søvandskøleanlægget ud til hospitalet blev ændret fra de normale 7,5°C til 9,5°C over et døgn. Det resulterede i et reduceret elforbrug på ca 20%. Eksperimentet viser dog nærmere et effektivitetspotentiale end et fleksibilitetspotentiale.



Plot af de to varmepumpeenheders samlede elforbrug 2018-12-08. En kompressor er i konstant drift, mens en anden kompressor kobles ind og ud flere gange inden for en time.

Eksempler på energifleksibilitetspotentialer i Bornholms Hospital



Plot af Søvandsskøleanlæggets samlede elforbrug over tre døgn i august 2020, hvor temperatursetpunktet blev ændret fra 7,5°C til 9,5°C over et døgn (fra kl 14 til kl 14 næste dag). Den røde kurve er for setpunkt 9,5°C, mens de blå kurver er for hhv dagen inden (øverst) og dagen efter (nederst).

Potentiale

De øgede krav til bygningers energieffektivitet og de tilhørende krav til isolering, tæthed og styret ventilation af bygningerne, medfører øgede behov for køling af indeluften i bygningerne. Kølingen vil typisk blive leveret af elektrisk drevne varmepumper (kølemaskiner). Da der især vil være behov for

køling i dagtimerne, og da det er forholdsvis simpelt og billigt at lagre kulde i isolerede eller nedgravede vandtanke, er det oplagt at benytte kuldelagring til dels at begrænse den nødvendige kapacitet af kølemaskinerne og dels til at kunne tilbyde fleksibilitet til elnettet. Placering af kuldelagre tæt ved kølebehovet kan desuden begrænse den nødvendige kapacitet af køledistributionsnettet. Det sidste kunne være relevant for BoH, da BoH's kølekapaciteten netop bl.a. er begrænset af kapaciteten af distributionsnettet. Det vil sandsynligvis være billigere at etablere lokale kuldelagre end at udbygge kapaciteten af distributionssystemet.

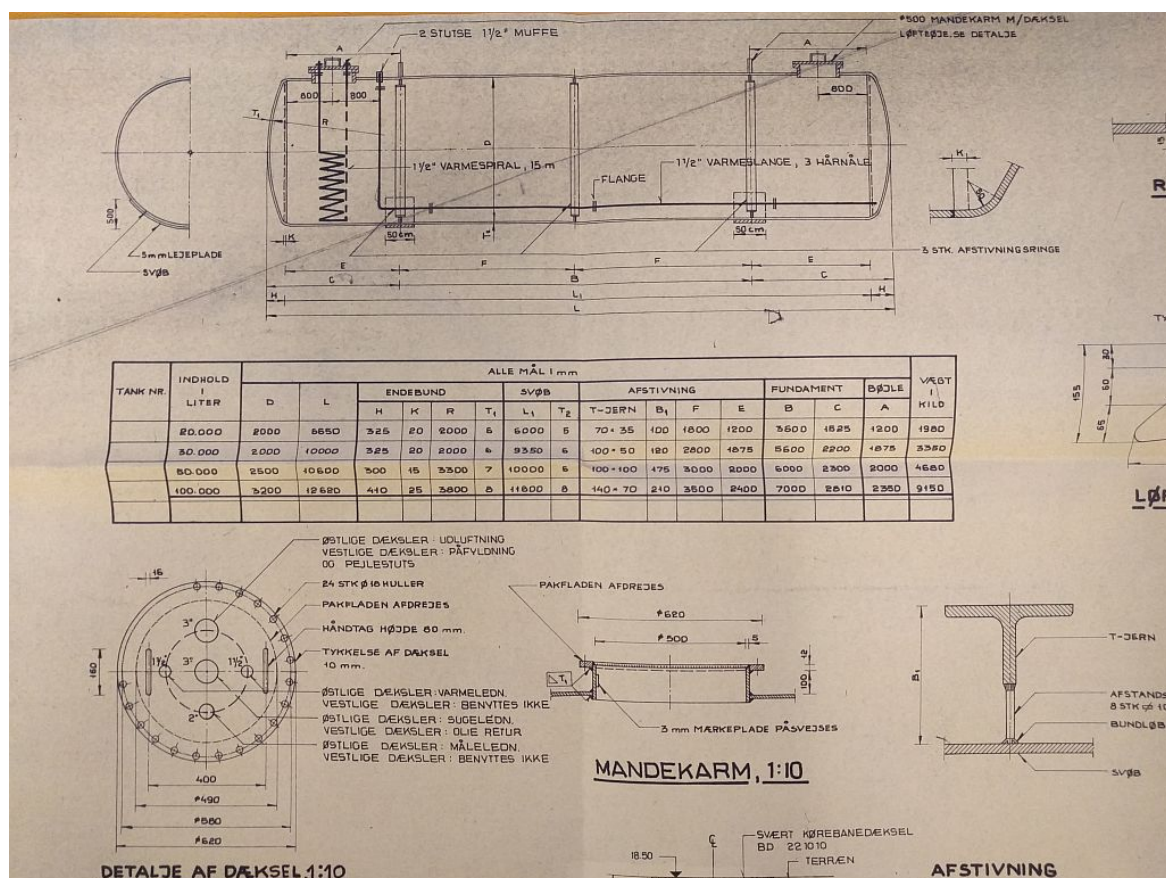
Udvidet termisk kapacitet

Sommeren i 2018 var meget varm, og kølekapaciteten i BOH's centrale kølesystem var for lille i dagtimerne, hvor de mindst kritiske kølefunktioner i perioder måtte frakobles, mens der om natten var overskudskapacitet. En mulighed for at kunne udnytte og lagre overskudskapaciteten om natten til om dagen vil give mulighed for fuld udnyttelse af varmepumpernes kølekapacitet.

BOH har to ubenyttede underjordiske ståltanke – hver på 100 m³. Tankene har tidligere været benyttet til brændstof til hospitalets nødgeneratorer, men er i dag tomme og rensede. Disse tanke kunne med fordel tilkobles det centrale kølesystem som termisk lager. Da tankene er nedgravede i jorden og da jordtemperaturen typisk er konstant ca 7°C året rundt, vil varmeudvekslingen med den omgivende jord være begrænset, selvom tankene ikke er termisk isolerede. Generelt vil lager-tankene i perioder med overskudskølekapacitet give mulighed for øget fleksibilitet i tid for driften af varmepumperne.

DTU har regnet lidt på mulighederne i og effekten af denne løsning.

Varmekapaciteten for vand er ca 4200 J/kg C. Det kræver således en køleenergi på ca 235 kWh for at køle 200 m³ vand 1 grad ned. Hver kompressor har en elektrisk effekt på ca 4 kW. Under forudsætning af en COP-faktor for varmepumperne på 3, har hver kompressor således en kølekapacitet på ca 8 kW. I en situation hvor overskudskølekapaciteten er 32 kW (svarende til kølingen fra 4 kompressorer), vil det tage ca 7 timer at køle de 200 m³ vand 1 grad ned. Tilsvarende kan de 200 m³ vand levere en tilsvarende køleenergi tilbage til systemet med en resulterende gennemsnitlig opvarmning af vandet i tankene på 1 grad.



Tegning af (en af) ståltankene.

Eksempler på energifleksibilitetspotentialer i Bornholms Hospital

Hospitalets maksimale kølebehov via det centrale kølesystem skønnes at være ca det samme som varmepumpernes maksimale køleeffekt – altså ca 65 kW.

Potentiale

Se forrige afsnit.

Bygningernes termiske kapaciteter

De termiske kapaciteter i bygningerne kan udnyttes til at tilføre enten mere eller mindre varme eller køling i en kortere periode (fx en time), uden at det går væsentligt ud over komforten i bygningen. Dette kan udnyttes til at tilbyde energifleksibilitet.

Opvarmningen af bygningerne sker med fjernvarme og radiatorer med individuelle termostatventiler. Flow og fremløbstemperatur kan reguleres centralt og automatisk. Dette benyttes bl.a. til natsænkning af rumtemperaturerne.

Rumkøling sker gennem afkølet ventilationsluft. Da ventilationen også skal sikre almindelig udluftning – herunder acceptabelt CO₂-niveau og luftfugtighed – kan andre faktorer end temperaturen være afgørende for hvor meget / længe ventilationen kan reduceres. Ventilationen kan reguleres centralt og automatisk.

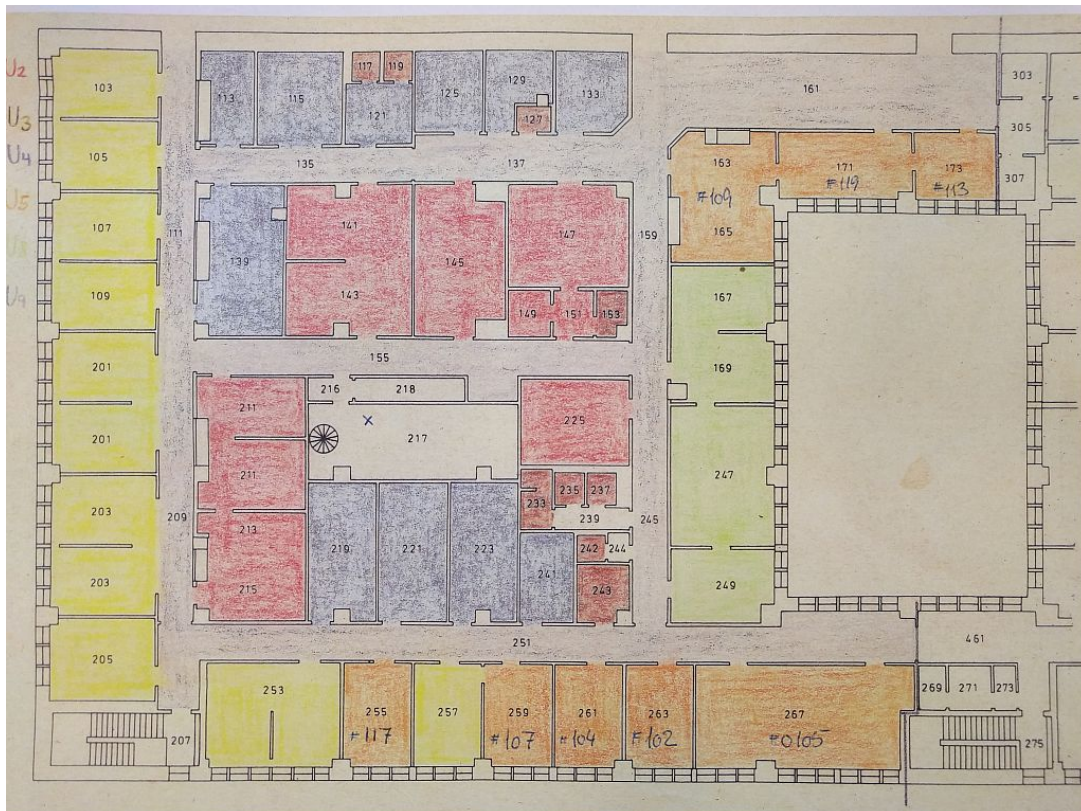
Måling og eksperiment

For at måle bygningens termiske kapacitet blev der i juni 2020 installeret 20 trådløse indeklimateksensorer (måler bl.a. temperatur og CO₂-niveau ca hvert minut) i forskellige rum i et afgrænset område af Bygning B. Målinger blev gennemført i sommeren 2020 (hvor der var et kølebehov) og igen i februar 2021 (hvor der var et varmebehov).

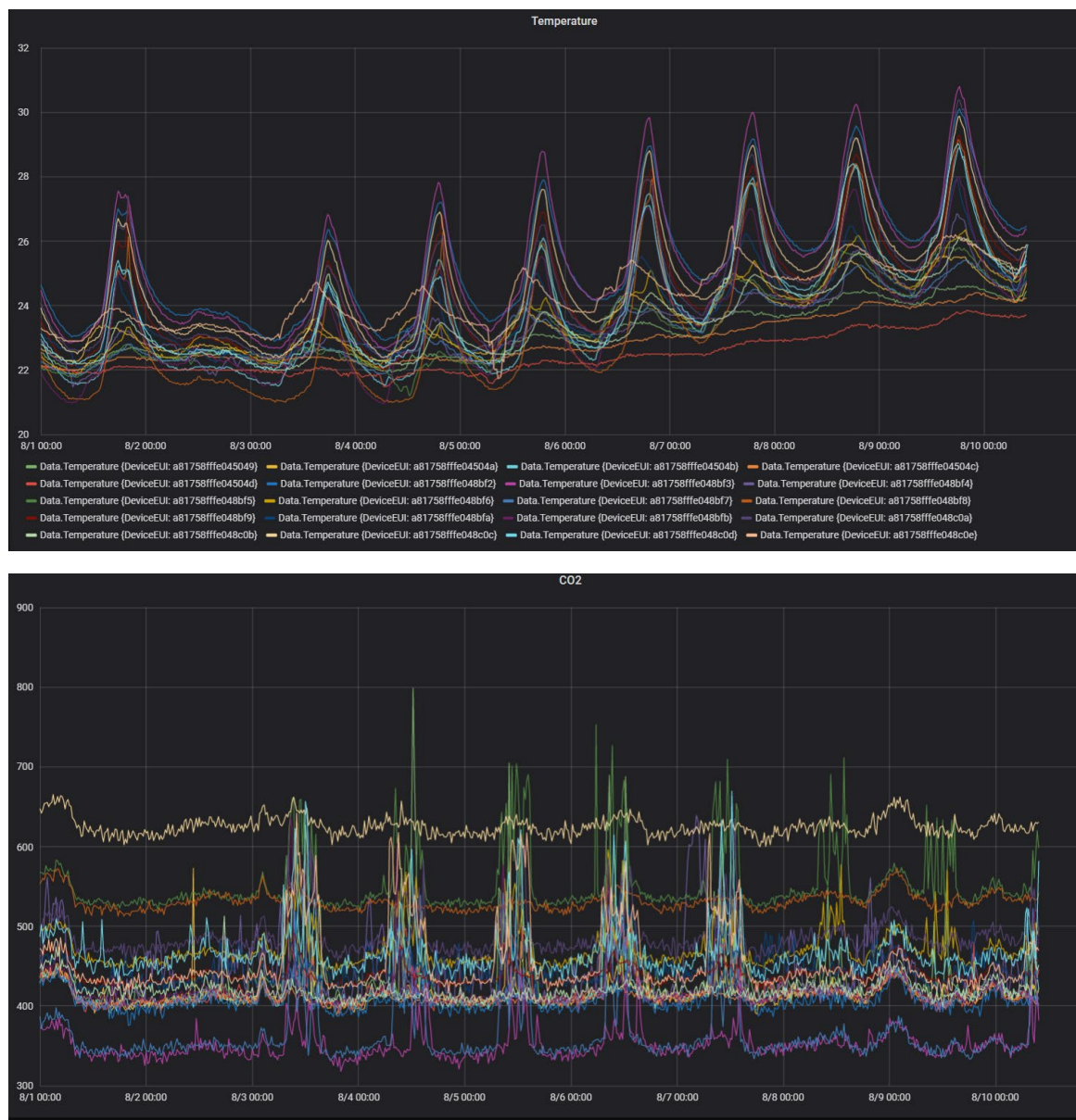
Under målingerne i sommeren 2020 blev ventilationen afbrudt i kortere perioder (ca en time). Målingerne i sommeren 2020 gav desværre ikke brugbare resultater til at sige noget om bygningens termiske kapacitet. Til gengæld var det tydeligt at CO₂-niveauet hurtigt blev kritisk i rum med flere personer, når ventilationen var afbrudt.

Målingerne i februar 2021 blev gennemført med generel natsænkning af rumtemperaturerne. Det var meningen helt at afbryde for varmforsyningen til den relevante del af bygningen. Dette lykkedes desværre ikke. Hvis natsænkningfunktionen faktisk medføre en total afbrydelse af varmetilførelsen (indtil den lavere temperatur er opnået), kan de gennemførte temperaturmålinger sige noget om, hvor hurtigt temperaturen i bygningen ændrer sig, hvis varmetilførslen afbrydes i en kortere periode, som dermed indikere energifleksibilitetspotentialet for varmetilførslen.

Eksempler på energifleksibilitetspotentialer i Bornholms Hospital

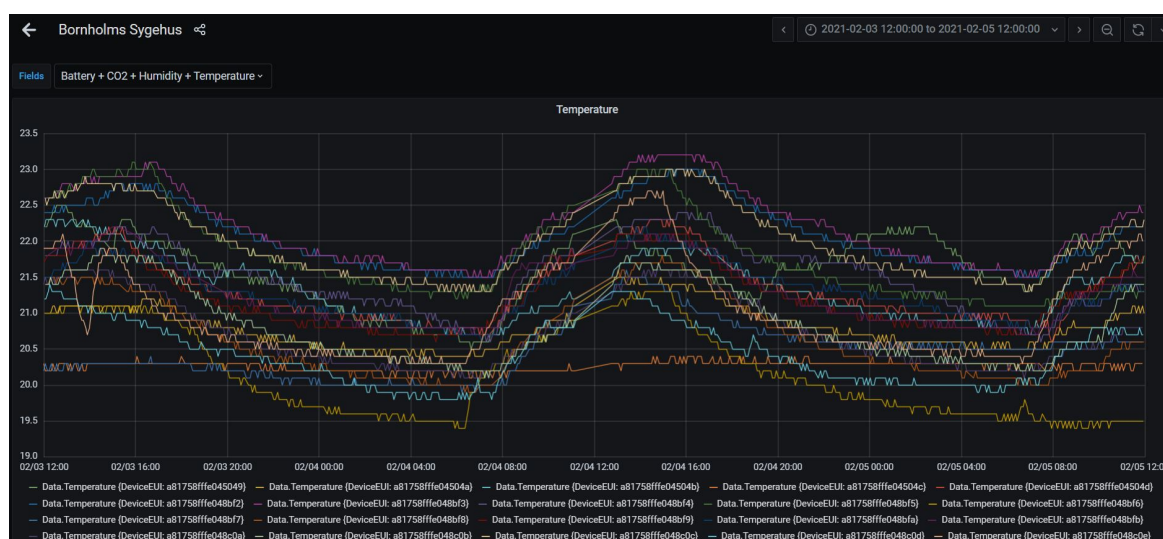
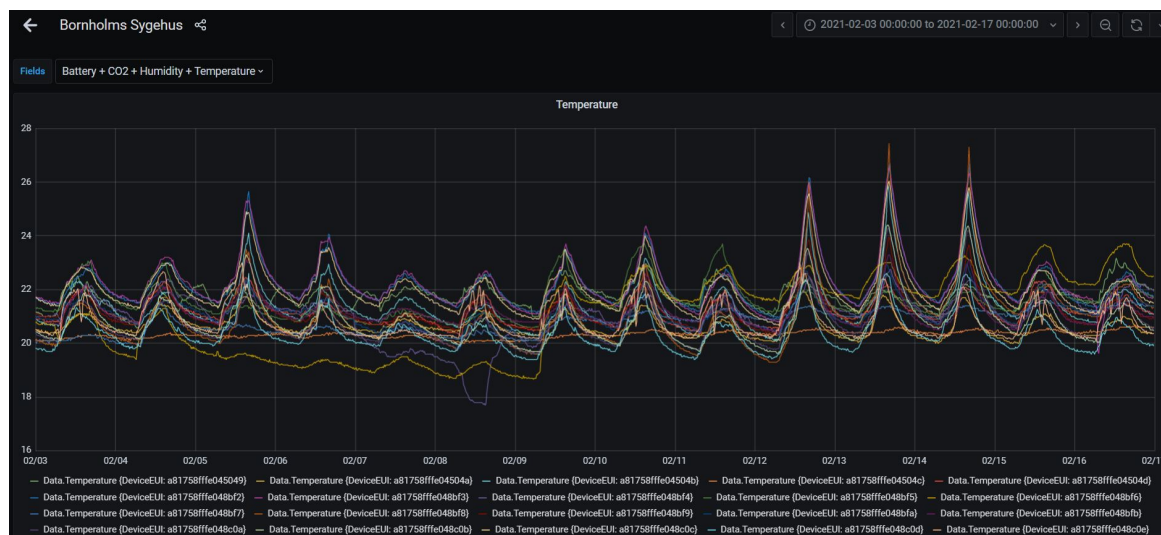


Eksempler på energifleksibilitetspotentialer i Bornholms Hospital



Rumtemperatur- og CO2-målinger fra de 20 indeklimasensorer i august 2021.

Eksempler på energifleksibilitetspotentialer i Bornholms Hospital



Rumtemperaturmålinger fra de 20 indeklimasensorer i februar 2021. Øverst: For en 14 dages periode. Nederst: For 2 døgn.

Potentiale

I større bygningskomplekser er indeklimaet i bygningerne typisk styret fra centrale og intelligente anlæg med detaljerede overvågninger af aktuelle indeklima. Det er derfor oplagt at udnytte disse centrale og intelligente styringer til også at levere energifleksibilitet til de eksterne energisystemer – elnettet og fx fjernvarmen. Den største udfordring for at kunne tilbyde denne form for fleksibilitet er eksterne signaler at styre efter. Den simpleste form er dynamiske energipriser. Dette tilbydes dog endnu ikke i form og omfang, der gør denne regulering interessant.

I dag udgør energiforbruget til opvarmning i Danmark ca 1/3 af det samlede energiforbrug. Det meste af dette forbrug kan – uden at det medfører væsentlige ulemper – forskydes nogle timer i tid. Potentialet for at tilbyde energifleksibilitet i tid er derfor meget stort.



FUTURRESSOURCER
ENERGI