

Teknisk rapport for OPSYS 2.0-projektet

EUDP-journal nr.: 64108-0581

Udarbejdet af:

Neogrid Technologies ApS
Aalborg Universitet
Wavin A/S
Bosch A/S
Teknologisk Institut

Marts 2023



Indhold

1. Indledning.....	4
2. Teknologisk grundlag	5
2.1. Vandbårne varmeanlæg	5
2.2. Varmepumper	7
2.2.1. Varmt brugsvand	8
2.2.2. Cirkulationspumper, buffere og omløb	10
2.2.3. Den nyeste udvikling af varmpumper hos Bosch	14
2.3. Solcelleanlæg	16
2.4. Batterianlæg	17
3. OPSYS 2.0-konceptet	19
3.1. Wavin-manifold og -styring	20
3.2. Bosch-varmpumpe	22
3.3. Neogrid-PreHEAT-boks	22
3.3.1. Udviklingsforløb	23
3.3.2. Dashboard	27
3.4. Overstyring af varmpumpe	28
3.5. Regulator	29
3.5.1. Management (øverste lag)	30
3.5.2. Distributionslag (mellemste lag)	31
3.5.3. Fysiske lag (nederste lag)	31
3.6. Modelprædiktiv regulering	31
3.6.1. Principper	32
3.6.2. Modelbeskrivelser	33
4. Forsøg og målinger	35
4.1. Kalundborg	36
4.1.1. Plantegning	36
4.1.2. Installationer	36
4.1.3. Instrumentering	39



4.1.4.	Resultater og driftserfaringer	39
4.1.5.	Sækning af varmepumpens fremløbstemperatur	43
4.2.	Demonstrationsresultater	45
4.2.1.	Komfort	45
4.2.2.	Produktionsmønstre.....	47
4.2.3.	Kontrolløsning for solrige dage	50
4.3.	Roskilde	52
4.3.1.	Målinger på batterianlæg i bolig med solceller	54
4.4.	Testrig på Teknologisk Institut	65
4.4.1.	Kort beskrivelse af testrig	65
4.4.2.	Udfordringer på testtrigen	67
4.4.3.	Forsøg med batteristyring/elektrisk system	67
5.	Henvisninger	70



1. Indledning

Varmepumper forudses at komme til at spille en stor rolle i omstillingen af det danske energisystem fra afhængighed af fossile brændsler til primært vedvarende energi. Varmepumper har to roller:

- På grund af varmepumpers høje effektivitet kan de reducere energiforbruget til opvarmning af huse.
- Varmepumper kan styres sådan, at de kan aftage mere el, når der er meget vedvarende energi (VE) i nettet, og omvendt kan de bruge mindre el i perioder med lidt VE i nettet. På den måde kan varmepumper hjælpe med til at stabilisere elnettet og dermed muliggøre en større andel af VE.

Imidlertid viser en undersøgelse, der er foretaget af Teknologisk Institut for Energistyrelsen, at selvom den nominelle COP (fundet ved standardlaboratorietest) er meget høj, så er det kun omkring 16 % af varmepumpeinstallationerne i danske huse, der har en tilfredsstillende effektivitet. Hovedårsagen til den dårlige effektivitet er en for høj fremløbstemperatur fra varmepumpen på grund af forkert indregulering af varmesystemets kredse, og at varmekurven (udetemperaturkompensering) for varmepumpen er sat for højt for at mindske risikoen for klager.

OPSYS-konceptet, som foreslås i dette projekt, bygger på, at volumenstrømmen til varmeafgiverne og fremløbstemperaturen fra varmepumpen hele tiden optimeres, hvilket vil gøre det muligt at opgradere dårlige varmepumpeinstallationer til gode varmepumpeinstallationer. OPSYS-konceptet vil blive integreret i en boks, der både kan bruges til at renovere eksisterende varmepumpeinstallationer og sikre høj effektivitet for nye varmepumpeinstallationer.

I dag kan en varmepumpe stoppes i perioder, hvor der kun er lidt VE i nettet og strømmen er dyr, men det er ikke muligt aktivt at lagre varme og dermed forlænge det tidsrum, hvor varmepumpen kan slukkes. Dette kan gøres med OPSYS-konceptet, hvor varmeafgiverne styres, så rumtemperaturen kan øges (indenfor komfortbåndet) før en periode med lidt VE i nettet, således at der lagres varme i bygningens interne konstruktioner. Varme, som afgives, når varmepumpen efterfølgende slukkes, gør det muligt for varmepumpen at være slukket i en længere periode. En anden mulighed er at lagre varme i en vandbeholder, f.eks. brugsvandstanken, ved at øge temperaturen af denne før en periode med lidt VE i nettet. På den måde kan OPSYS-konceptet tilbyde energifleksibilitetsservices til elnettet, som kan være med til at stabilisere dette. OPSYS-konceptet kan også anvendes til at øge egetforbruget af PV (solcelle) -strøm fra et eget PV-anlæg, ved at varmepumpen kører mere, når der er overskud fra PV-anlægget, og varme lagres i bygningen eller brugsvandstanken. OPSYS-konceptet kan dermed øge den økonomiske fordel ved at have et PV-anlæg, da en mindre andel af produktionen skal sælges til nettet til en ufordelagtig tarif.

OPSYS-konceptet kan således hjælpe med til at muliggøre omstillingen af det danske energisystem fra fossile brændsler til vedvarende energi, da OPSYS-konceptet kan reducere energiforbruget til opvarmning, øge egetforbruget af PV-strøm og tilbyde energifleksibilitetsservices til elnettet.



2. Teknologisk grundlag

I dette afsnit er der en kort beskrivelse af state-of-the-art for de tekniske anlæg, som danner grundlag for, at OPSYS 2.0-styringskonceptet kan fungere. Herunder de styringsmuligheder, der i dag findes for de vigtigste anlægskomponenter, og som OPSYS 2.0-styresystemet enten skal integreres med eller erstatte.

2.1. Vandbårne varmeanlæg

Varmeanlæg i bygninger kan have mange forskellige udformninger og styringsstrategier, og dette afsnit er et forsøg på at skabe et overblik over de mest almindelige. Kendskab til anlæg og styring er selvsagt afgørende for succesfuld integration af OPSYS 2.0-styringen. Der er kun set på vandbårne anlæg, da integration af luftbårne anlæg og direkte elvarme ikke er en del af projektets formål (selvom styringen godt vil kunne tilpasses disse sjældnere opvarmningsformer).

Traditionelt kan vandbårne anlæg opdeles i følgende kategorier:

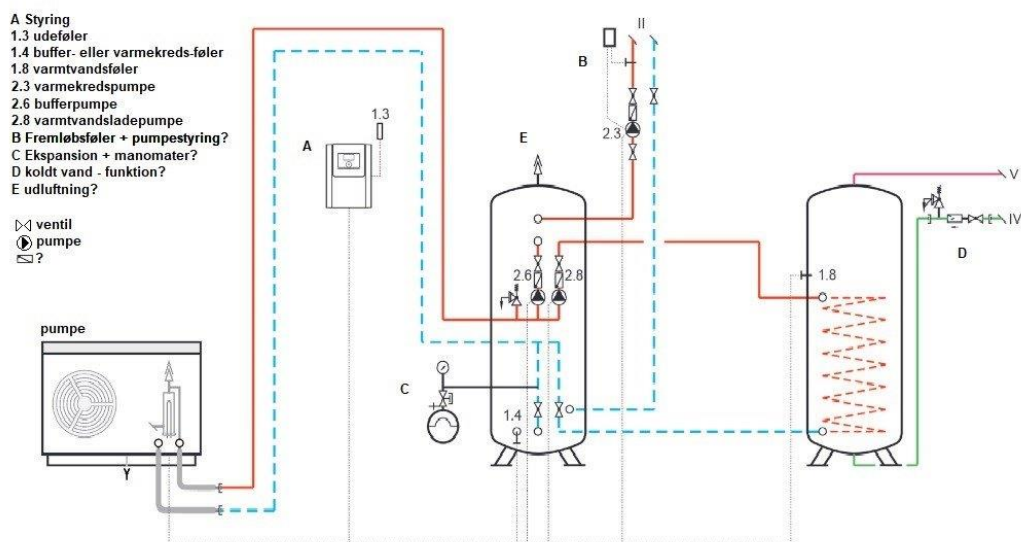
- 1-strengt / radiator
- 2-strengt / radiator eller blandet radiator+gulvvarme
- 2-strengt / gulvvarme
- Eventuel suppleringsvarmeplade i ventilationsanlæg.

I forhold til varmepumpedrift er det tostrengede gulvvarmesystem at foretrække, da der kan opnås en lav fremløbstemperatur og dermed den bedste COP. Gulvvarme er i reglen dimensioneret til lav fremløbstemperatur af hensyn til komfort og gulvmaterialer. Ved ren gulvvarme med blandesløjfe bør der bygges om eller indstilles til nul opblanding. Ellers vil varmepumpen køre med en højere temperatur end nødvendigt – og dermed med en forringet COP.

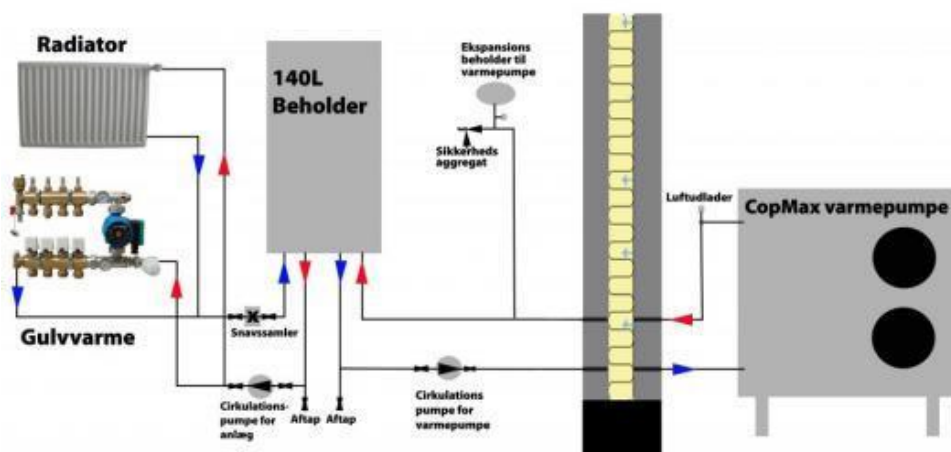
Ved 2-strengsanlæg uden omløb vil cirkulationen kunne blokeres. Ved varmepumper udstyres kredsen derfor med omløb eller kobles til som sekundær pumpekreds med egen styring af cirkulationspumpe. Omløbet kan være indbygget i VP-unitten eller etableres eksternt – eventuelt som en bufferbeholder.

Ved 1-strengsanlæg findes der pr. definition altid omløb, så cirkulationen ikke stopper, selvom alle radiatorventiler lukker i. De vil derfor godt kunne kobles direkte til en given varmepumpe.

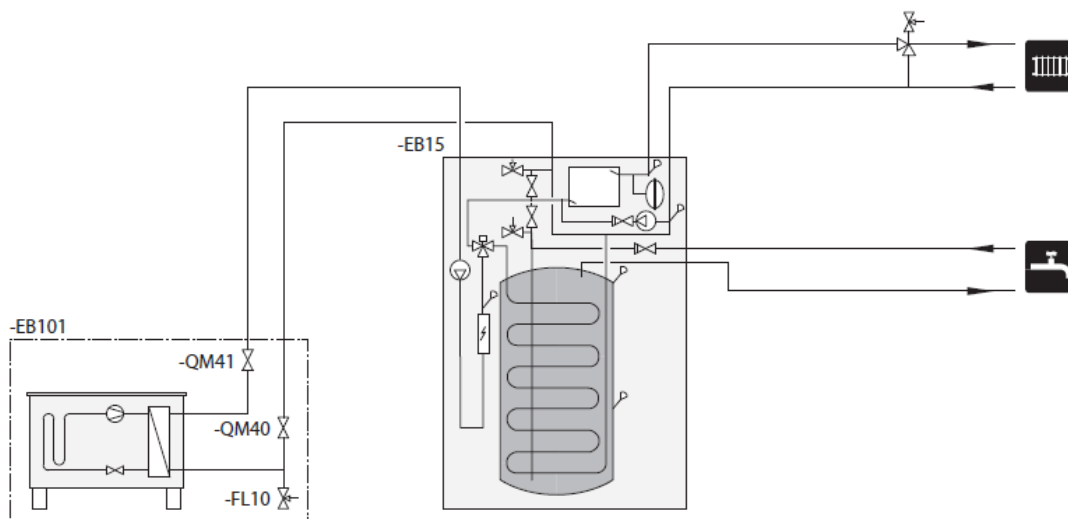
Eksempeldiagrammer:



Figur 1 Anlæg med parallel buffertank, som oplades fra varmepumpen uafhængigt af den sekundære varmekreds. Se-parat pumpe til opladning af varmtvandsbeholder udenom bufferen, så temperaturen kan hæves ved BV-opvarmning (Stiebel Eltron). https://www.stiebel-eltron.de/content/dam/ste/de/de/products/downloads/Planungsunterlagen/Planungshandbuch/Planungshandbuch_WPL%2015-25_de.pdf



Figur 2 Eksempel med blandekredse til gulvvarme og hydraulisk afkoblet fødnings af varmeafgivere fra buffertank (CopMax).



Figur 3 Vølund L/V-varmepumpe med lille seriebuffer i fremløb og trevejsventil for brugsvandsprioritering.

2.2. Varmepumper

Følgende typer væskekoblede varmepumper til boliger kan findes på markedet:

- Rene rumvarmepumper med jord eller luft som varmekilde
- Rene brugsvandvarmepumper (Boligventilations-VP med VV-beholder)
- Sammenbygning af ovenstående i fælles kabinet (f.eks. Nilan)
- Kombi-varmepumpe til rumvarme og varmt vand m/u indbygget varmtvandsbeholder.

Kobling til varmeanlæg kan være udført som:

- Direkte kobling til varmeanlæg, evt. med buffer i serie
- Indirekte kobling til varmeanlæg (hydraulisk afkobling via parallel buffer eller omløb).

Cirkulationspumpen til varmeanlægget kan være indbygget i varmepumpen eller være ekstern. Se Af-snit 2.2.2. om cirkulationspumper, som er et emne for sig.

Nødvendigheden af en bufferbeholder i varmekredsen er et emne, som kan diskuteres, og der er mange forskellige holdninger i omløb. Hvis huset har tung gulvvarme, vil det alt andet lige være med til at temperaturstabilisere, så varmepumpen kan få de lange driftstider, der er afgørende for en god SCOP. Især ved inverter-varmepumper kan effekten (måske) reduceres tilpas meget, så man undgår for mange start/stop. Dette er under forudsætning af, at der – så længe kompressoren kører – opretholdes et pænt stort flow i mindst en gulvvarmekreds. Det er netop dette, OPSYS 2.0 tilstræber ved at modificere den måde, gulvvarmen bliver styret på.



Styring af varmepumper

Af en oversigt indsamlet i DREAM-projektet¹ fremgår det, at der er flere forskellige grader af styringsmuligheder for varmepumper på det danske marked (hvor et udsnit af forhandlere er spurgt). Der er stor forskel på graden af åbenhed og muligheden for at manipulere med varmepumpens indstillinger. Producenterne er naturligvis bekymrede for, at en ekstern overstyring vil kunne beskadige vigtige komponenter eller forringe driften og dermed medføre klager.

Den "laveste fællesnævner", når det gælder generel styring på tværs af fabrikater, er muligheden for at sende et start/stop-signal samt eventuelt at kunne justere sætpunktet for fremløbstemperaturen. Dette kan ofte gøres via to eksterne kontakter og er da defineret som SG-ready².

Alt efter model er der mulighed for at tildele SG-kontakterne forskellige funktioner, som altså programmeres på forhånd. Det er derfor ikke muligt at skrue gradvist op eller ned for en temperatur – typisk varmtvandsbeholderens eller fremløbstemperaturens sætpunkt.

I OPSYS-projektet blev det påvist, at man kan sende et spændingssignal til den sensor, der måler udetemperaturen, og dermed snyde varmepumpen til at tro, at det er koldere eller varmere udenfor, end det reelt er. Varmepumpen vil derfor reagere ved at justere fremløbstemperaturen alt efter varmekurvens hældning. Udfordringen ligger i at gøre denne løsning universel, idet der findes mange forskellige sensortyper, og der kommer flere til – herunder digitale (onewire) sensorer.

Tabel 1 Sammenhæng mellem spænding og "målt" udetemperatur for Bosch-varmepumpe

	Volt DC															
	4,30	4,20	4,10	4,00	3,90	3,80	3,70	3,60	3,50	3,40	3,30	3,20	3,10	3,00	2,90	2,80
u. temp	-12,0	-9,0	-6,0	-4,0	-1,5	0,5	2,5	5,0	6,5	8,5	10,5	12,5	14,0	16,0	18,0	19,5

Det synes at være den sikreste generelle løsning at acceptere, at der ikke er mulighed for detailstyring, men at der overordnet kan styres via SG-kontakterne. Bosch og Neogrid kan dog sagtens lave en mere avanceret og bilateral løsning.

2.2.1. Varmt brugsvand

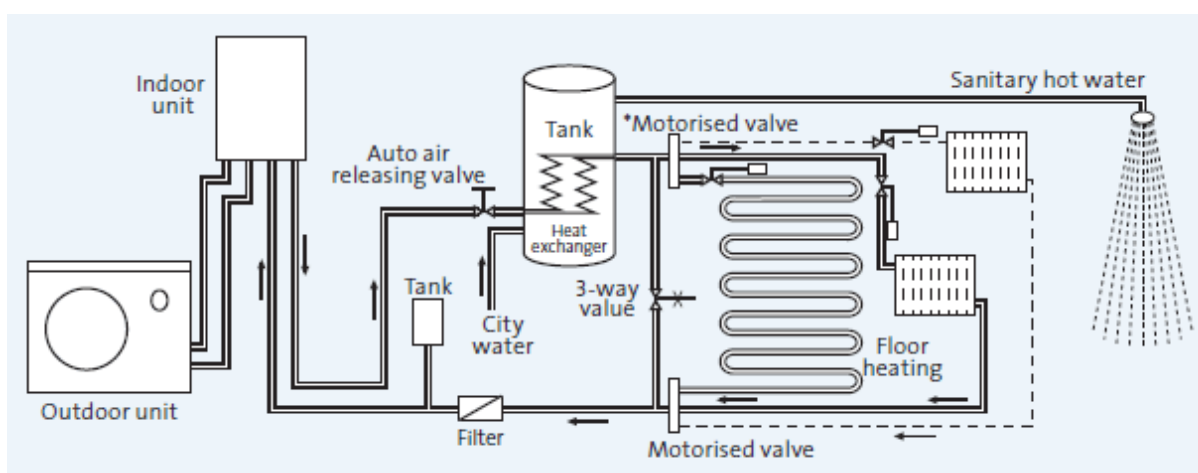
De fleste varmepumper har brugsvandsprioritering, så rumopvarmningen stopper i tilfælde af, at der er behov for brugsvandsopvarmning. Der er dog nogle få systemer, hvor vandet fra varmepumpen først går

¹ DREAM –Danish renewable energy aligned markets, Energinet.dk project no. 10744

² Bundesverband Wärmepumpe: SG-ready Regularien. Version 2.0 https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/bwp_service/SG_ready/2023_SG-ready_Regularien_2.0_ENG.pdf



igennem brugsvandstanken (der så agerer seriel buffer) og opvarmer denne, før vandet ledes til rumvarmesystemet. Disse systemer har en dårlig effektivitet, da der altid skal være en ret høj fremløbstemperatur til brugsvandstanken, og de er derfor på vej ud af markedet.



Figur 4 Udnyttelse af varmtvandsbeholder som termisk buffer i fremløbet. Ulempen er, at temperaturen bliver højere i gennemsnit. Fordelen er, at der ikke skal sættes separat buffertank op.

På små varmepumper er der altid brugsvandsprioritering. Årsagen har at gøre med virkningsgrad. For hver grad vi øger temperaturen på varmepumpen, falder virkningsgraden med ca. 1-3 %. Det vil sige, at når vi laver varmt brugsvand med ca. 62 grader i fremløb, så skal vi blive færdige i en fart. Netop derfor er varmtvandsbeholdere til varmepumper helt særlige. De skal kunne optage hele varmepumpens energi med meget lille delta t på flowsiden. Det kræver meget lange og store varmeslanger i beholderen.

Varmt brugsvand er noget, producenterne putter utrolig meget energi i at få gjort bedre, og de bedste produkter er ved at nå enden m.h.t. virkningsgraden for produktion af varmt vand med nuværende teknologi. Man kan dog også søge at reducere antallet af timer, hvor der er varmt brugsvand til rådighed, og Smart Home-styring kan hjælpe med dette. Allerede i dag er der med de nyeste systemer kun varmt vand, når boligen er aktiv – altså når der (forventeligt) er nogen hjemme. De fleste store producenter kører med en 3-trins brugsvandsstyring analogt med følgende eksempel fra Bosch:

- ECO+: Vandet opvarmes til 43 grader i beholderen, og varmepumpen starter med at genopvarme beholderen ved 38 grader. Styringen kontrollerer, om der er risiko for bakterier i beholderen. Varmepumpen kan ikke benytte eltilskud ved denne indstilling.
- ECO: Vandet opvarmes til 49 grader i beholderen, og varmepumpen starter genopvarmning ved ca. 44 grader. Styringen kontrollerer, om der er risiko for bakterier i beholderen. Varmepumpen kan ikke benytte eltilskud.



- KOMFORT: Vandet opvarmes til 55 grader i beholderen, og varmepumpen starter genopvarmning ved 50 grader. Varmepumpen benytter normalt ikke eltilskud, men ved store varmtvandsforbrug vil eltilskud slå til, hvis beholderen falder til under 39 grader, og kompressoren kører 100 %.

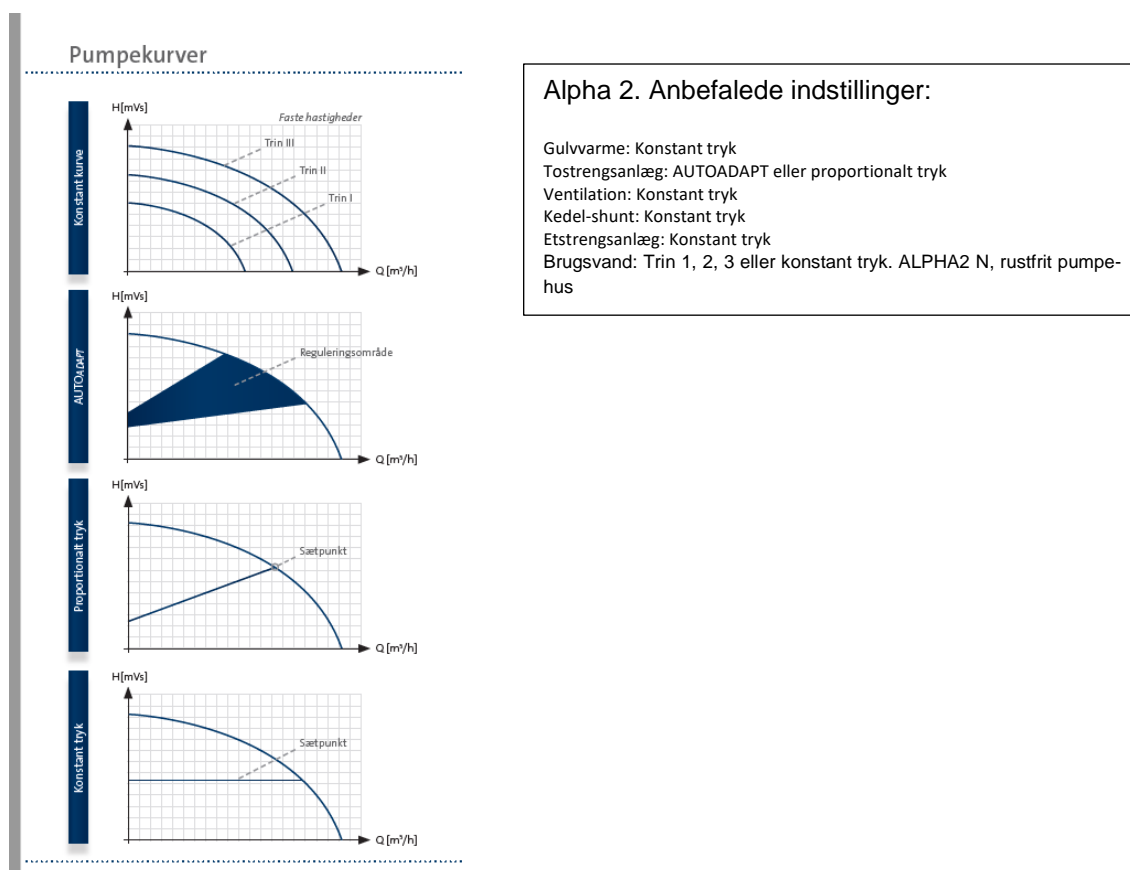
Problemet ved brugsvandsprioritering er, at det tager relativt lang tid at opvarme brugsvandstanken. I denne periode må huset klare sig uden rumvarme, hvilket ikke er det store problem i velisolerede huse, men kan være det i ældre huse. Her kan OPSYS-konceptet fjerne eventuelle gener:

- Styringen af opvarmningen af brugsvandstanken har traditionelt en hysteres, så opvarmning f.eks. startes, når toppen af tanken når ned på 50 °C, og stopper igen, når temperaturen når op på f.eks. 55 °C.
- Med den nye OPSYS 2.0-styring af ikke blot rumvarmesystemet, men også af brugsvandstanken samt forudsigelse af rumopvarmningsbehovet, kan opvarmningen af brugsvandstanken tilpasses i forhold til rumopvarmningsbehovet. Opvarmningen af brugsvandstanken kan f.eks. startes, før den laveste værdi for temperaturen af brugsvandet nås, hvis det forudses, at huset ikke har brug for varme i en nærmere bestemt fremtid. Eller temperaturen i brugsvandstanken kan hæves til over det øverste temperatursætpunkt, hvis det kan forudses, at der i den efterfølgende tid er brug for meget rumvarme – f.eks. på grund af et hurtigt midlertidigt fald i udelufttemperaturen.

2.2.2. Cirkulationspumper, buffere og omløb

Samspillet mellem anlæggets cirkulationspumper, eventuelle buffertanke og omløb er afgørende for en energieffektiv og stabil drift. Cirkulationspumpe(r) til varmekredsen kan være simpelt trinstyret eller avanceret med tilpasning til et bestemt pumpetryk. Adaptive energisparepumper vil automatisk indstille sig til bedste virkningsgrad.

For alle varmepumpetyper gælder, at der skal være et minimumsflow, når varmepumpen er i aktiv tilstand. Hvor lidt er bestemt af den minimale effekt, den kan levere. Ved tilsigtet stop af længere varighed bør cirkulationspumpen også stoppe. Det kræver nok, at varmepumpens styring opfatter, at det er så varmt udenfor, at den selv går over på sommerdrift.



Figur 5 Mulige indstillinger for cirkulationspumpe Grundfos Alpha 2.

Antal og type af cirkulationspumper kan beskrives for både jordvarme og luft-til-vand-systemer, hvor der er fem opbygninger til varme anlægget.

1-rørs seriel buffer med AVDO-overløb

Dette system er typisk benyttet i produkter fra Asien. Der er en bufferbeholder på fremløbet, som i princippet er en "bule" på røret. Bufferen er typisk imellem 40-110 liter. Efter bufferen monteres en trykreguleret AVDO-bypassventil. Når-/hvis varmesystemet lukker for flowet, vil AVDO-ventilen åbne i takt med, at modtrykket i anlægget stiger. Da vil vandet løbe frem gennem fremløbet ind i bufferen, igennem AVDO-ventilen og tilbage til varmepumpen.

Dette system har én hovedpumpe, som oftest er indbygget i produktet.

4- (3-) rørs parallelbuffer – hydraulisk afkoblet

En anden model med buffer er 4-rørs bufferen. Den virker i princippet som en "blandepotte", hvor frem og retur fra varmepumpen køres over på bufferen. Et andet sæt frem og retur køres ud til varmesystemet.



Det betyder, at der nu er to cirkulationspumper - én cirkulationspumpe i varmepumpen og én cirkulationspumpe til centralvarmesystemet. De to pumper er hydraulisk afkoblet fra hinanden på samme måde, som hvis der var sat en veksler imellem. Ergo kan vi på varmepumpen køre med delta T 5K og på varmesystemet på delta T 15K uden at komme i problemer med hinanden.

Ingen buffer – hydraulisk afkoblet

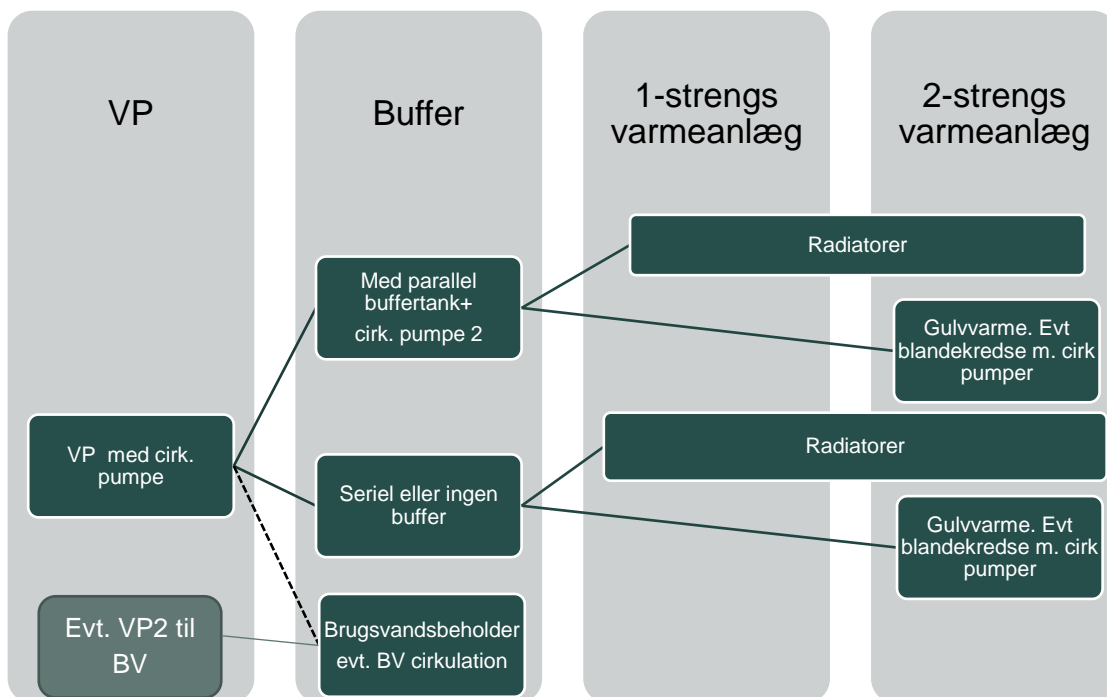
Nogle fabrikanter (deriblandt Bosch) benytter hydraulisk afkoblet bypass. Det betyder meget simpelt, at der lige efter varmepumpens afgang til varmesystemet sidder et stort bypassrør direkte imellem frem og retur. Efter bypasset sidder der en cirkulationspumpe til varmesystemet, og inden i varmepumpen sidder der også en cirkulationspumpe – det vil sige to cirkulationspumper. Disse systemer er typisk med den "gamle" teknologi til cirkulationspumper (uden flowmåler). Igen opnår dette system en total hydraulisk afkobling, som giver mulighed for en relativt stor forskel i primært og sekundært flow.

Ingen buffer – ingen hydraulisk afkobling (nye pumper)

Dette helt nye system fra Bosch er ca. fem måneder gammelt. Meget forsimplet bliver cirkulationspumpen den primære "vidensdeler". Pumpen giver varmepumpens styring besked om flow og ændring af flow. Styringen regulerer derefter kompressoren og kølekredsen efter disse informationer. Frem- og returføler kontrollerer, at flowet, som pumpen melder tilbage, er korrekt. Det betyder nu, at vi har et system med én Pumpe, uden bypass eller buffer, som kører direkte ud på varmesystemet. Dette kan primært lade sig gøre med jordvarmepumper og split luft-til-vand-varmepumper. Der er den udfordring med monovalente luft-til-vand-varmepumper, at pumpen også skal overvinde tryktabet i ledningssystemet til og fra udedelen. Og da udedelen nogle gange har mere end 40 meter rør, da er der ikke så meget resttryk tilbage i pumpen. 98 % af Bosch's jordvarmepumper bliver koblet direkte op uden bypass, buffer eller andet tilbehør.

Ingen buffer – hydraulisk afkobling (nye pumper)

I starten af 2020 kom der fx fra Bosch endnu et nyt system. Det virker på samme måde som ovennævnte system (nye pumper), men nu med et bypass lige efter varmepumpen. På den anden side af bypasset sidder der nu endnu en MODBUS-reguleret intelligent Pumpe. Det betyder, at med systemer, hvor pumpen er indbygget i varmepumpen, og som ikke er i stand til at overvinde det totale tryktab – eksempelvis grundet lange ledninger til en monovalent udedel – da sættes der så en ekstra Pumpe efter bypasset. Pumperne hjælper hinanden – ergo den første Pumpe flytter vandet op til den anden Pumpe, som flytter det ud til forbrugeren. Begge pumper er reguleret via MODBUS og måler flowet. Varmepumpen kender derfor både flowet på varmepumpekredsen og på varmeafgiverkredsen. I dette system vil der være to pumper.



Figur 6 Systemoversigt.

Varmepumpen vil gerne have et stort flow (lille afkøling), men det behøver ikke at være konstant. Ved inverter VP kan cirkulationspumpen med fordel regulere op og ned i takt med ydelsen, så temperaturdifferensen bliver nogenlunde stabil og lille.

Stort flow = risiko for støj! Der bør være en mulighed for at reducere flowet lidt, hvis det giver problemer i den konkrete installation.

Med hensyn til blandesløjfer i gulvvarmeanlæg er der både fordele og ulemper i forhold til OPSYS-konceptet:

- Uden blandesløjfe kan varmpumpen generelt køre på en lavere temperatur og dermed en bedre COP. Til gengæld må man være forsigtig ved overstyring, så temperaturen ikke bliver så høj, at man risikerer at ødelægge gulvet.
- Med blandesløjfe er gulvet beskyttet mod overtemperatur, men til gengæld vil gulvet ikke kunne bruges som termisk buffer, medmindre blandeventilen også kan styres i et eller andet omfang, evt. i Wavins styreboks.

Styrestrategi – simpel model



Følgende kunne være et udgangspunkt for en styring tilpasset varmepumper i gulvvarmeanlæg med on/off-telestater.

1. Alle kredse åbne, gradvis opvarmning.
2. Når ønsket temperatur næsten er nået i et rum, lukkes denne kreds. Opvarmning vil fortsætte i rummet med en vis tidsforsinkelse (tidskonstant skal læres).
3. Når kun en enkelt kreds er åben, reduceres fremløbstemperaturen, indtil ønsket temperatur er nået i dette rum.
4. Når temperaturen falder i de lukkede kredse, åbnes de igen én efter én, når der er behov. Hvis temperatur ikke kan nås efter en vis tid med fuld åbning i et rum, øges fremløbstemperaturen.
5. Når kun en kreds er aktiv, og temperaturen igen stiger, reduceres fremløbstemperaturen.

I stedet for at bruge rumtemperaturen som styresignal kunne man også bruge returtemperaturen fra den pågældende kreds som et mål for, hvor varmekrævende rummet er (skal læres). Ved badeværelses-/klinikgulv skal returtemperaturen i så fald være højere end fra andre rum af hensyn til komfort. Derfor kan man forvente, at disse rum bliver "for varme", og dermed siver varmen ud i de tilstødende rum, hvor ventilerne derfor vil være lukkede en stor del af tiden.

Radiatorer: Hvis der også er radiatorer i anlægget, bliver styring knap så overskuelig. Hvis huset kan klare sig med samme lave fremløbstemperatur til radiatorer (helt åbne) som til gulvvarme, kan ekstra blandekredse undværes. Ellers må man lade radiatorerne køre med egen termostat og nøjes med styring på den generelle fremløbstemperatur og så lade gulvvarmen blande op, så den forbliver under kritisk temperatur.

Sensorer: Hvis varmepumpen skal "snydes" ved at manipulere med udetemperatur og VVB-temperatur, er det vigtigt at vide, hvilken sensortype der benyttes. Man kan i stedet for udeføleren eventuelt bruge femløbsføler/føler i buffertank. Ved varmepumper med Smart Grid-funktion er det umiddelbart muligt at hæve sætpunkter for varmt vand og rumvarmefremløb.

Det er vigtigt at gøre opmærksom på, at alle varmepumpefabrikanter har deres egen måde at regulere systemet på. Når det er nævnt, så regulerer de største producenter på samme måde (for at opnå de højeste virkningsgrader i SCOP-testen).

2.2.3. Den nyeste udvikling af varmepumper hos Bosch

Det nyeste, som Bosch's varmepumpe indeholder, er en MODBUS flowreguleret cirkulationspumpe (Bosch-/Grundfos-udvikling). Det intelligente ved denne pumpe er, at den kan beregne flowet i anlægget og via BUS sende en del data tilbage til varmepumpens regulering. Før var pumpen reguleret efter trykket i anlægget og med et delta t på 7K. Den nye cirkulationspumpe fortæller – til varmepumpens regulering – flowet i anlægget. På grundlag af flowet samt det ønskede delta T i anlæg, udetemperaturen og erfaring, regulerer kompressoren nu ind efter den "beregnete" effekt. Kort kan man sige, at varmepumpen ved, at en eller flere telestater lukker, da flowet reduceres. Inden varmepumpens temperatur stiger grundet mindre aftag, vil varmepumpen regulere kompressoren (effekten) ned. Med det "forrige" system blev kompressoren reguleret ned, fordi temperaturen steg til over den ønskede.



Kort: Det nye system er proaktivt og prøver at regulere, inden der er kommet afvigelser i temperaturen. Det gamle system regulerede alene på afvigelser i temperaturen – altså når skaden var sket.

Hvad angår brugen af buffer, så er denne helt nødvendig med det nye system. Selv med meget små flow kan varmepumpen køre. Dog har det en lille indflydelse på virkningsgraden. I det gamle system var gulvvarmesystemets on/off-kontakt normalt koblet op over varmepumpen. Det vil sige, at hvis alle teles-tater var lukkede, slukkede varmepumpen. I Bosch benyttes kun buffer ved on/off-varmepumper, og forventningen er, at Bosch udfaser de sidste on/off-varmepumper i 2020 i Danmark. Der er fortsat nogle, der benytter buffer, men det er af "personlige" holdninger og ikke et behov (ingen regler uden undtagelser).

Hvorvidt cirkulationspumpen slukker eller kører videre, så er det normalt sådan at hvis varmepumpen får information om, at det er "vinter" – det vil sige, at der er et varmebehov – så kører cirkulationspumpen 24/7. Når varmepumpen slukker kompressoren grundet stor energitilførsel vs. aftag, så kører cirkulationspumpen for at afsætte energien og får information om, hvornår varmepumpen skal starte kompressoren igen (kold retur, der sænker varmepumpens temperatur).

Nogle varmepumper vil begynde at "pulse" med pumpen efter nogen tid uden kompressordrift. Eksempelvis kører pumpen 1 time efter kompressordrift. Hvis kompressoren ikke har været startet i en time, slukker pumpen i 20 min. for herefter at starte igen i 20 min. I de 20 minutter, pumpen kører, måler den via returtemperaturen, om der er begyndt at komme et varmeaftag, eller om systemet fortsat ikke kræver ny varme. Hvis ikke der er varmekrav, så slukker den 20 min. igen for derefter at starte igen.

Hvis man derimod elektrisk sammenkobler varmepumpen med et varmesystem, eksempelvis via on/off (pumpekontakt) i gulvvarmereguleringen eller via et Smart Home-system med elektroniske termostatventiler for radiatorsystemer, så vil varmepumpens cirkulationspumpe udkoble, når gulvvarmesystemet eller Smart Home-systemet fortæller til varmepumpen, at der intet varmekrav er.

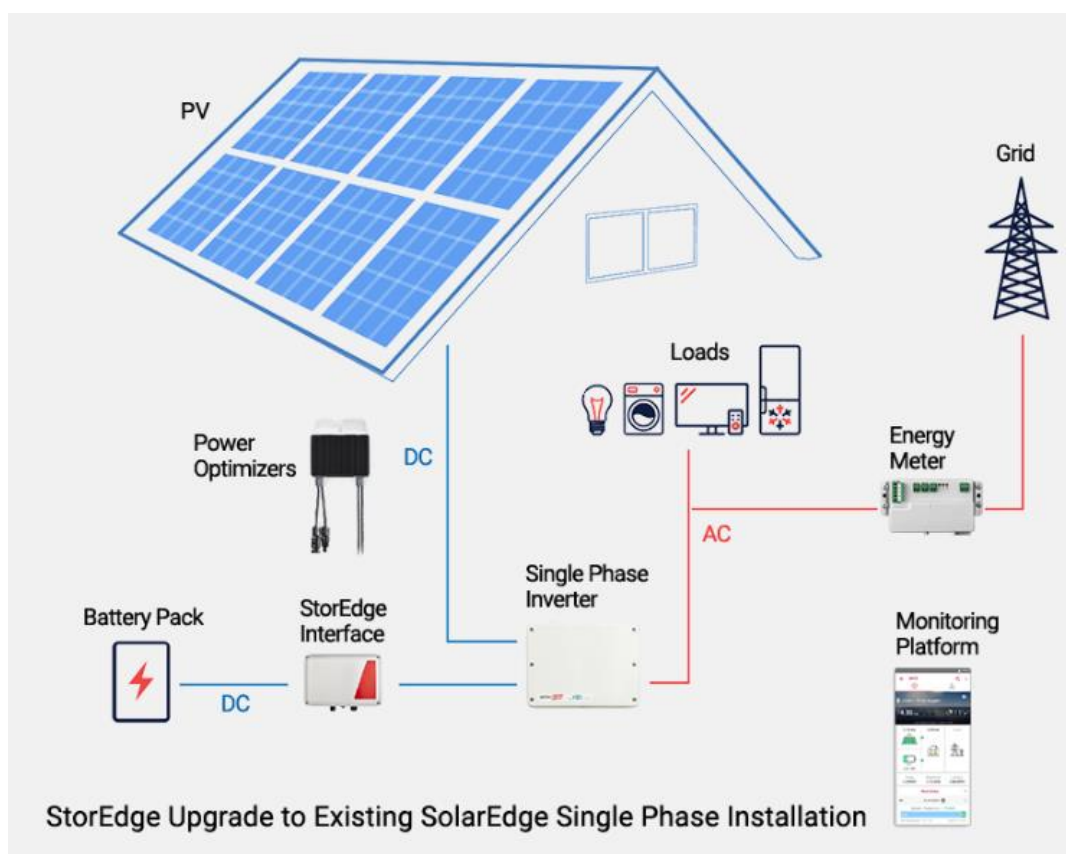
Til sidst er der den nye MODBUS-pumpe, der måler på flowet, når flowet lukker ned pga., at alle varmekilder lukker. Da slukker pumpen efter nogen tid. Pumpen vil starte med nogen tids mellemrum for at måle flowet i anlægget. Hvis der er kommet flow, starter systemet op igen. Er der intet flow, slukker pumpen og afventer lidt tid. Hvor lang tid, der går imellem start og stop, handler om varmesystemet og udetemperaturen (varmebehovet). Jo koldere udetemperatur, jo hyppigere kontrol af, om der er kommet flow. Jo varmere udetemperatur, jo længere tid imellem hver start.



2.3. Solcelleanlæg

Faldende afregningspriser for overskuds-el fra solcelleanlæg har medført en stor interesse for at maksimere forbrug bag måleren – herunder brug af el til opvarmningsformål. Mange producenter af invertere og reguleringsudstyr har derfor udviklet koncepter til maksimering af egetforbrug og minimering af salg til nettet. De er næsten alle bygget op efter samme princip:

- 1) En ekstra elmåler eller strømtænger i hovedtavlen måler, om der er eksport af solcellestrøm.
- 2) Elmåleren sender signal til en reguleringsenhed, som kan aktivere et antal relæer, hvor der er tilsluttet kendte belastninger.
- 3) Data sendes til "skyen" for beregning af energibalance. Ofte kan indstillinger også vises og ændres via leverandørens www-dashboard.



Figur 7 SolarEdge styring med flere teknologier



Energy Meter with Modbus Connection

The energy meter is used for production, consumption or import/export monitoring, and for export limitation. The meter has high accuracy readings, and by a wide selection of current transformers (CTA - 100A)* supports residential and commercial installations. The meter connects to the SolarEdge Inverter or commercial gateway via RS485. For installation and configuration instructions, refer to the export limitation [application note](#).

Key Benefits:

- High accuracy meter readings (up to 0.5%) for production/consumption monitoring
- Supports meter readings to the inverter for export limitation
- Small and easy to install - fits in standard electrical panel
- Supports residential, commercial and utility size installations

*When ordering a meter, order current transformers as well



Figur 8 Eksempel på bimåler fra SolarEdge med kommunikation via MODBUS.

I forhold til styring af en varmepumpe kan der f.eks. sendes signal til en SG-indgang om, at der skal køres med forceret drift, så længe der er overskud af el.

Ved PV-overskud vil det være en fordel at kunne tænde én eller flere elpatroner i anlægget, da de kan optage en noget større effekt, end kompressoren kan. Men da de typisk er on/off-styrede, vil det være svært at ramme en reel effektbalance. Fronius OhmPilot er et eksempel på et styresystem, der tillader kontinuert regulering af en elpatron sammen med en Fronius PV-inverter. Man kunne eftermontere en sådan elpatron i en buffertank i varmekredsen eller i brugsvandsbeholderen. Fordelen ved en selvstændig buffertank er, at temperaturen kan hæves til langt over, hvad man kan, hvis gulvet alene bruges som lager, men så skal gulvet beskyttes med en blandekreds.

2.4. Batterianlæg

Der er stigende interesse for øget egetforbrug af sol-el – ikke mindst efter indførelse af Tarifmodel 3.0 og generelle prisstigninger på el. Dette har medført en ændring af solcellemarkedet, så der nu sælges flere anlæg med batteri. Der findes to væsensforskellige PV-/batterisystemer på markedet:

1. PV-inverter med batteri på DC-siden, evt. indbygget.
2. AC-koblet batteri (med tovejsbatteriinverter).

I praksis er kun Li-Ion batterier relevante (markedsførende). Disse kræver et tilpasset BMS-system (Battery Management System):

- Energibalancen styres enten via inverter eller BMS.
- Udveksling med elnettet måles med elmåler eller strømtænger i serie med husets afregningsmålere.



- Man kan evt. i stedet beregne balancen teoretisk og bruge dette signal til at kontrollere, hvad batteriet skal gøre.
- Nogle batteripakker samt elmålere kan kommunikere MODBUS.
- Styresignaler til batteriet (strategier):
 - Aflade når strømmen er dyr, OG der ikke er PV-produktion nok til egetforbrug.
 - Oplade når strømmen er billig, ELLER der er overskud af sol-el.
 - Dertil kommer strategisk forlods opladning/afladning på baggrund af prognoser, så batteriet f.eks. er fuldt opladet til kogespidsen og afladet, når der er en god soldag i vente.
- På OPSYS-prøvestanden har vi kun et virtuelt styresignal og skal derfor oversætte det til en form, som batteristyringen kan bruge. Da der er dårlig konverteringseffektivitet ved små effekter, ind-sættes en tærskelværdi for aktivering af inverter/lader.
- En SOC (state of charge) -styring kunne se således ud:

Tabel 2 Eksempel på SOC-styring

	PV-overskud > Pmin	PV-overskud <Pmin	Elbehov > Pmin	Elbehov <Pmin
Billig el	Oplad både fra PV og net, så batteriet er fuldt til kogespidsen.	Oplad både fra PV og net med Pmin	Køb fra net	Køb fra net
Dyr el	Oplad kun fra PV		Tap fra batteri	Køb fra net

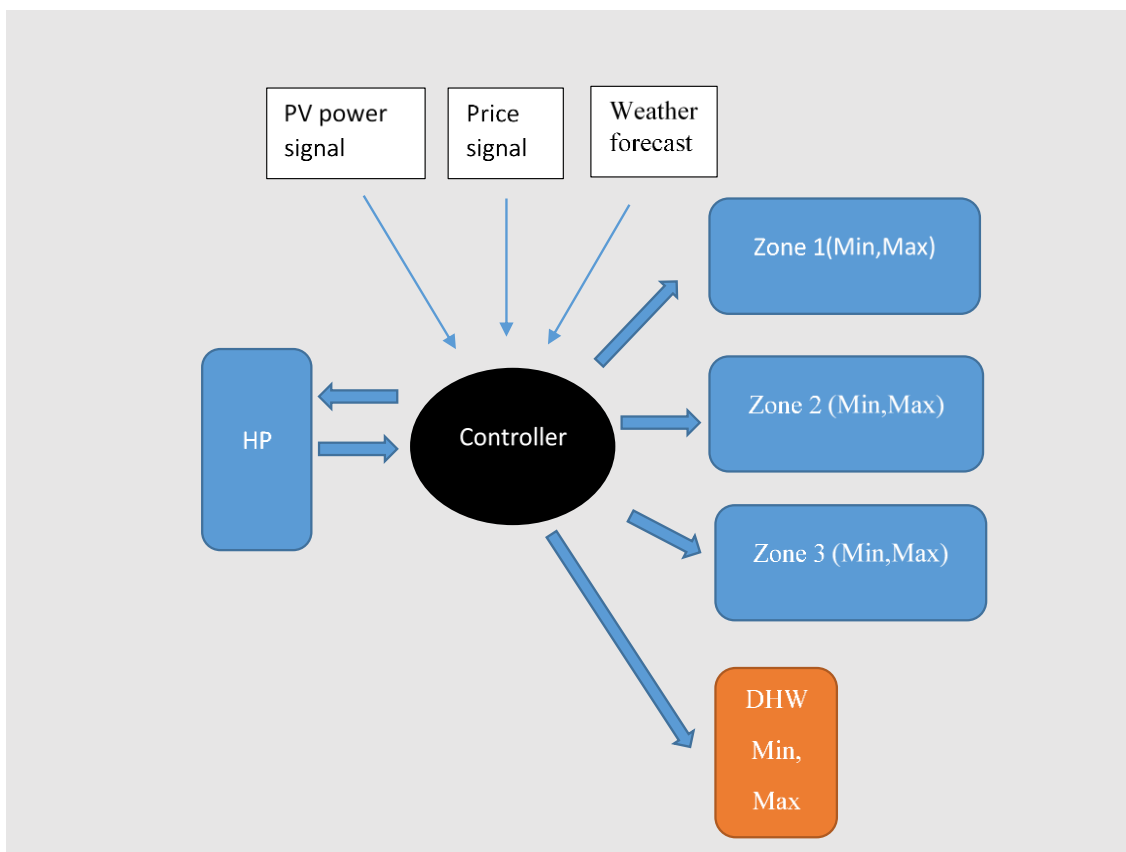


3. OPSYS 2.0-konceptet

I OPSYS 2.0-projektet er komponenterne valgt af de medvirkende kommercielle partnere og består af:

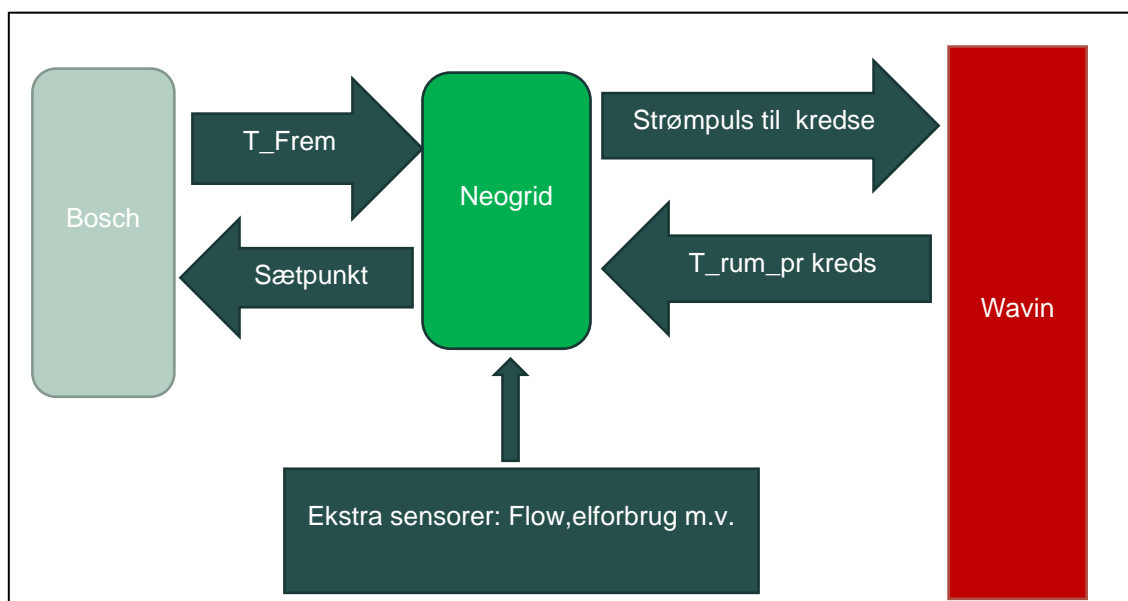
- Wavin-manifold og -styring
- Bosch-varmepumpe
- Neogrid PreHEAT-boks.

NeoGrid PreHeat boks agerer bindeled imellem varmepumpen og gulvvarme manifold til gulvvarmen, hvor styringen også foretages og giver besked til hvert system hvad der skal gøres ud fra en forventet prognose af hvad der sker de næste 24 timer. Ud fra et bedste bud på hvordan driftsomkostningerne til el minimeres ved korrekt udnyttelse af sol-el og køb af el når den er billigst.



Figur 9 Principdiagram for OPSYS 2.0.

Nogle data, som indsamles af Neogrid-boksen, er nødvendige for korrekt styring, mens andre "bare" er beregnet på overvågning og information om anlæggets drift.



Figur 10 Principskitse af signal og kommunikation imellem de forskellige produkter.

Der bliver sendt en lang række data fra Wavin-styringen via MODBUS-kabel, men det er i realiteten kun den målte rumtemperatur, som bruges af OPSYS. Returtemperaturen på de enkelte kredse bliver målt via eksterne sensorer.

3.1. Wavin-manifold og -styring

Den styring, der bruges i OPSYS 2.0, er fra Wavin og bygger ligesom andre reguleringssystemer på elektrisk aktiverede voksventiler/motorer. I det gamle OPSYS-projekt blev et tilsvarende fra Uponor anvendt. Voksventiler fungerer ved at et lille varmelegeme opvarmer en beholder med voks, som herved udvider sig og trykker på et ventilhoved. Signalet til hver ventil kommer fra en central styreboks som via trådløs kommunikation (derfor betegnelsen telestat) har forbindelse til temperaturfølere i de enkelte rum og dermed kender varmebehovet. Da systemet har en vis træghed, kan det ikke styres så hurtigt som en motorventil, men det er billigere.

Ofte vil der sidde en blandekreds sammen med gulvvarmemanifolden for at sikre en tilpas lav fremløbs-temperatur til gulvvarmen, men dette er ikke nødvendigt ved varmepumpedrift hvor fremløbstemperaturen kan sættes lavt som udgangspunkt.



Figur 11 Wavin AHC 9000-styring med fordelerrør, voksventil + telestat samt styreboks.

De styrebokse, der findes på markedet til gulvvarme, har typisk disse funktioner:

- 1) Basis: Modtager trådløst signal fra rumtermostater og sender strøm hen til de ventiler, der skal åbnes for at holde rumtemperaturen i den pågældende zone.
- 2) Avancerede: Danner forbindelse til brugerflade – enten på styringen eller via Wi-Fi og dashboard. Her kan man for eksempel sætte spærretider eller natsænkning ind på enkelte zoner. Man kan også styringsmæssigt sammenkoble flere kredse.

I OPSYS 2.0 kan Neogrid-boksen modtage en lang række data fra Wavin-boksene via en kablet MODBUS-forbindelse.

Voksventilerne og styringen er som udgangspunkt baseret på on/off-drift. Det vil sige, at en gulvvarmekreds enten er helt åben eller helt lukket. Justering af fremløbstemperaturen til gulvet kan være en del af styringen, som da også aktiverer en blandeventil og pumpe i fremløbet. I OPSYS 2.0 er det undersøgt om man kan "pulse" strømmen til ventilerne og dermed få dem til at stå i en mellemposition.



3.2. Bosch-varmepumpe

Der bruges i projektet forskellige modeller, men med omtrent samme styring:

- Testrig på Teknologisk Institut: Compress 7001 2-8 kW J/V
- Huset i Kalundborg: Compress 6000 AW 7 kW
- Huset i Roskilde: Måtte desværre udgå, da ejeren ikke kunne få tilladelse til vertikal boring.

Brian beskriver

Varmepumpen på TI er en jord/vand varmepumpe med indbygget varmtvandsbeholder. Den blev indsat for at få målinger på en nyere model end den der sad på prøvestanden fra det tidligere projekt. Den nye model har hydraulisk afkoblet fremløb, det vil sige at flowet ikke blokerer hvis der ikke er aftag af varme. Den nye styring har mulighed for tidsstyring og kan fjernovervåges af Bosch for at følge driften.

Varmepumpen i Kalundborg er en luft-vand model hvor udedelen står i en carport. Den ligner i sin grundlæggende konstruktion den anden varmepumpe. Backup energi i form af elvarmelegeme er indbygget og aktiv. I den tekniske vejledning står der, at ” For at sikre varmepumpens drift, skal det største rum ikke være udstyret med rumtermostater. I stedet for skal rumenheden anvendes. Mindst 30 m² gulvareal skal reguleres med rumenhed, for så vil varmepumpen også automatisk tilpasse fremløbstemperaturen.” Denne reguleringsform bruges ikke så meget herhjemme, (og heller ikke i Kalundborghuset) men ville i mange tilfælde være mest hensigtsmæssig i forhold til 100% rumtermostatstyring.

3.3. Neogrid-PreHEAT-boks

Neogrids platform, PreHEAT, består af fire hovedkomponenter: en gateway, en analyseplatform, en brugergrænseflade (webapp) og et cloud setup (backend), der binder det hele sammen. Gatewayen (Figur 12) er blevet udviklet under OPSYSv2-projektet og har til formål at forbinde til elektriske apparater generelt, varmeanlæg og varmepumper for at gøre disse enheder tilgængelige over internettet – både til datalogning og styring.



Figur 12 Gatewayen installeret i testhuset.

Gatewayen leverer flere interfaces til kablede sensorer og aktuatorer, der er nødvendige for at erstatte simple CTS-systemer. Yderligere leverer gatewayen trådløse kommunikationsinterfaces til IoT-sensorer, målere osv., hvor der opnås en priseeffektiv sammenkædning mellem CTS- og IoT-domænerne.

Gatewayen er baseret på en open source-arkitektur (software) omkring et ESP32-modul, der styrer bundkortet i boksen, som håndterer de analoge interfaces, og et Linux-system på en Raspberry PI, som kører en OSGi serviceorienteret arkitektur på Java. Funktionalitet implementeres i 'bundles', der kan fjernopdateres, startes, stoppes, opdateres og afinstalleres, uden at boksen skal genstarte.

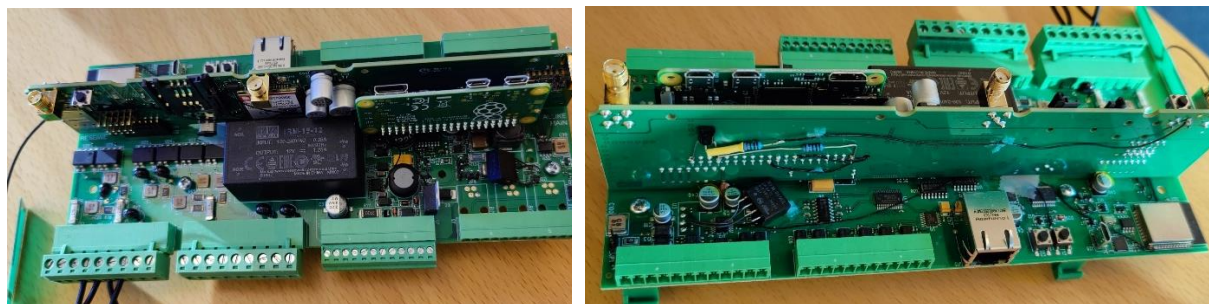
3.3.1. Udviklingsforløb

Gatewayen har udviklet sig gennem en række iterationer startende fra initiale krav, hvor boksen primært skulle bruges i fjernvarmeinstallationer, til at være en generel gateway, der interfacer til 'alle' varmepumper og samtidig har mulighed for at forbinde til PV og batteri for på den måde at få en central intelligent HUB/Hjerne/Gateway, der via clouden kan optimere og styre driften i bygningerne, jf. de strategier, der er udviklet i OPSYSv2-projektet. Et andet krav var, at den skulle være baseret på en linux-arkitektur, så der let kunne udvikles applikationer, der kunne køre lokalt på gatewayen.

De tre iterationer er navngivet med følgende projektnavne:

- Allike: Oprindeligt design startet i andet projekt, færdiggjort i OPSYSv2.
- Avenger v1.
- Avenger v2.

Specifikationen og den første udvikling af Allike-gatewayen blev startet i et InnoBooster-projekt, der havde til formål at lave en IoT-gateway, der fysisk kunne interface til komponenterne i en varmeinstallation (fjernvarme). Arkitekturen fra denne dannede grundlag for det videre arbejde med OPSYSv2-gatewayen.



Figur 13 Nærbilleder af Allike board med ændringer og lys

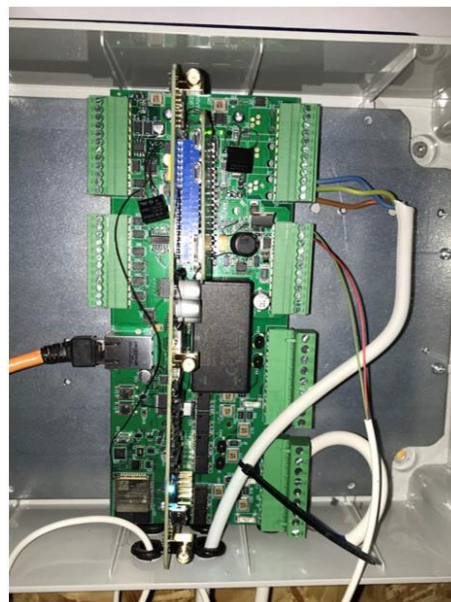
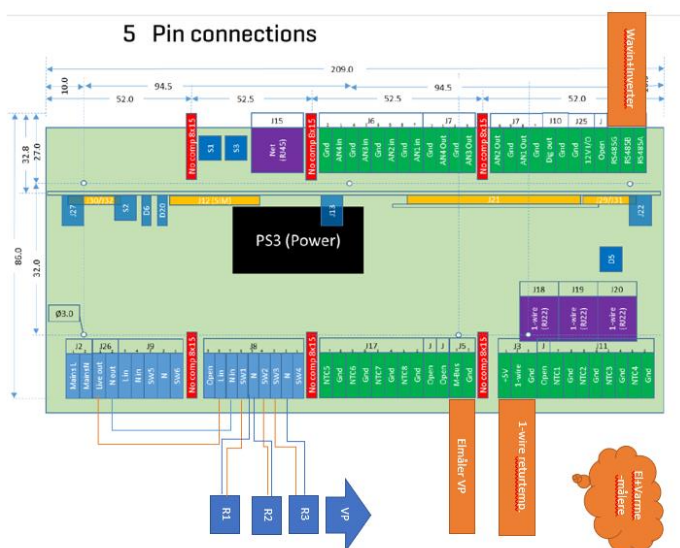
Den primære forskel på Allike og Avenger v1 er, at to solid-state-relæer blev erstattet med almindelige telefonrelæer. Grunden, til at dette blev nødvendigt, var, at solid-state-relæer ikke kunne kortslutte alle potential-fri indgange på varmepumperne. Yderligere var Allike-versionen fejlbehæftet, hvilket betød, at der skulle mange hardware-modifikationer til for at få boardet til at køre. Samtidig var der en udfordring med stabil kommunikation mellem ESP- og Raspberry-microcontrollerne, som ligeledes krævede en hardwareændring, og LTE-modulet virkede ikke ordentligt og blev derfor udskiftet til en ny model.

Vi fik en del læring af at køre med Avenger V1 i forskellige testinstallationer – herunder demohuset i Kalundborg samt testtriggen hos Teknologisk Institut. Helt basalt kræves der en noget nær 100 % opetid for disse systemer, men i løbet af testperioden fandt vi ud af, at den watchdog-funktionalitet, der var blevet implementeret, i nogle situationer ikke fik genstartet gatewayen korrekt, hvilket betød, at vi mistede forbindelsen til gatewayen.

Der blev produceret 10 Allike boards og 20 Avenger V1 boards. Da vi skulle i gang med at producere flere, blev vi ramt af den generelle komponentmangel ovenpå Covid-nedlukningerne i verden. Det betød, at centrale komponenter (ADC-kredse) ikke kunne skaffes (lange leveringstider og meget høje priser), og derfor besluttede vi at designe os uden om disse komponenter. Meromkostningen for disse komponenter var mere end 50.000 kr. for 100 boards, hvorfor vi valgte at bruge dette beløb til dels at designe os udenom de kritiske komponenter, men samtidig opgradere funktionaliteten.

Da der var krav om en bedre og mere low level watchdog-funktionalitet, blev der kigget i retning af en prisbillig PIC-controller, der bl.a. kunne eksekvere små kodelinjer samt levere ADC-funktionaliteten. Watchdoggen er blevet mere intelligent og robust, således at boardet principielt ikke kan komme i en situation, hvor det hænger.

Yderligere har det været muligt at presse en frekvenstællerfunktionalitet ind i PIC'en, så vi nu kan måle netfrekvensen online ved boksen og reagere på de hurtige frekvensservices uden først at skulle forbi clouden.



Figur 14 PIN-forbindelser for det første Allike board (tv) installeret i Kalundborg (th).

Figur 14 viser første udgave af boksen installeret i testhuset i Kalundborg. Den endelige version af boksen er afbildet i Figur 12.

Tabel 3 Kablede og trådløse interfaces på Neogrid PreHEAT-gatewayen

Interface	Usage	Range	Number	Note
Wireless				
LTE CAT M1	Network connectivity	Network operator specific	1	SIM card socket on the front External antenna SMA connector
Wireless MBus	Utility meters connectivity	868MHz	1	External antenna SMA connector
LoRa	Sensor and gateway connect	868MHz	1	External antenna SMA connector
WiFi	Network connectivity	802.11 b/g/n	1	Internal antenna
Bluetooth	Sensor connect and setup (BLE)	4.2 and BLE	1	Internal antenna
Wired				



RS485	For MODBUS, BACnet		1	On-board transmission line end impedance can be enabled. Variants with and without galvanic separation exist.
Mbus	Mbus master		Up to 50 slaves	
1Wire	For temperature sensors	2 and 3 wire sensors	Up to 30 sensors can be connected	Variant with or without galvanic separation exist. Galvanic separation: 5V sensors No galvanic separation: 3.3V sensor
NTC temperature sensor	Temperature measurement	-20°C - +100°C	8 sensors	
Analog in	Voltage measurement (from e.g., utility meters)	0-10V, input impedance > 10kOhm	4 inputs	5Hz LP filter can be enabled on analog input 3 and 4
Analog out	Voltage control of e.g., a motor valve	0-10V out, output impedance 1 kOhm	4 outputs	
HAN port	Read electricity meter	5V serial input	1	5V serial input, galvanic separated
Frequency measurement	Measure 50Hz supply power supply frequency	Better than $\pm 10\text{mHz}$	1 built-in	Internal only, not accessible from outside.
Digital out	External control	0-5V. Output impedance: Source: 92 ohm Sink: max 40mA	1	Can be used as 5V PWM output e.g., for pump control
Relay	Potential free switching. 1 NO/NC contact	230VAC/5A 30VDC/5A	2 separate NO/NC contacts	Onboard 5A fuse on each contact. The fuse can be replaced by qualified service personnel only.
Solid State relay	Potential free switch with zero crossing switching	230VAC/1A	4 contacts with one common line	Onboard 1A common fuse shared by all four contacts. The fuse can be replaced by qualified service personnel only.
Ethernet	Network connection	10/100M RJ45	1	
USB	External memory	MicroUSB	1	Adapter needed for standard USB memory stick
USB	Service	MicroUSB	1	For use by qualified service personnel only (behind front panel)



12V out	Expansion unit supply (output)	12V 250mA	1	Supply of external units. Shares ground connection
Power supply				
230V AC	Power supply to the unit			1A built-in fuse The fuse can only be replaced by qualified personnel.

3.3.2. Dashboard

Serversiden (backend) af PreHEAT-plattformen består af flere systemer, der tilsammen faciliterer kommunikationen, håndterer data og understøtter dashboardet. Dette involverer bl.a. interaktioner med gatewayen og andre datakilder (vejrprognoser, elspotpriser, tællermålinger, etc.), lagring af konfigurationer, målinger og andre data samt at gøre data tilgængelig via API'er for kunder og eksterne services. Serversiden håndterer også datasikkerhed og -adgang, sådan at brugerne kan anvende brugertilpassede API-nøgler til at vælge, hvem de vil dele deres data med, samt hvilke data de ønsker at dele.

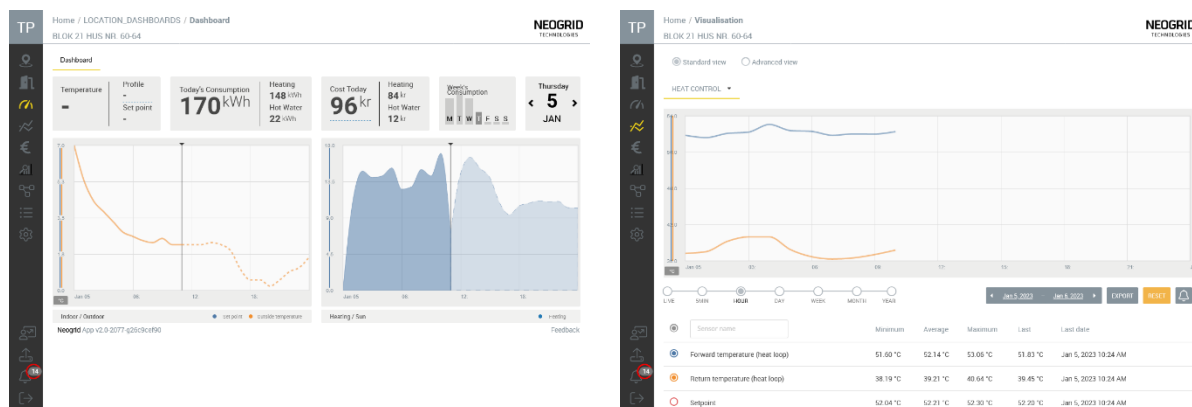
MAIN					
○ CPU_TEMPERATURE	149.47 °C	149.57 °C	149.69 °C	149.80 °C	Jul 13, 2021 9:35 AM
● DHW_SENSOR_TEMP	0 °C	0 °C	0 °C	0 °C	Jan 7, 2021 11:00 AM
○ INLET_SENSOR_TEMP	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
○ TOTAL_CURRENT	8.32 mA	9.92 mA	11.67 mA	44.28 mA	Jul 13, 2021 9:35 AM
ROOM_1					
○ ELEMENT_1_AIR_TEMPERATURE	17.48 °C	18.97 °C	20.79 °C	24 °C	Jul 13, 2021 9:35 AM
○ ELEMENT_1_FLOOR_TEMPERATURE	0 °C	0 °C	0 °C	0 °C	Jul 13, 2021 9:35 AM
○ ELEMENT_1_DEW_POINT_TEMPERATURE	0 °C	0.11 °C	0.29 °C	0 °C	Jul 13, 2021 9:35 AM
○ ROOM_1_MANUAL_TEMPERATURE	N/A	N/A	N/A	21.50 °C	Jul 13, 2021 9:35 AM
○ ROOM_1_DESIRE_TEMPERATURE	N/A	N/A	N/A	21.50 °C	Jul 13, 2021 9:35 AM
○ ELEMENT_1_RELATIVE_HUMIDITY	0 %	15.13 %	45.38 %	0 %	Jul 13, 2021 9:35 AM
○ ELEMENT_1_BATTERY_STATUS	90 %	70,673.47 %	136,442.26 %	90 %	Jul 13, 2021 9:35 AM
○ ELEMENT_1_RSSL_CU	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
○ ELEMENT_1_RSSL_EL	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
○ CHANNEL_1_CURRENT	72.54 mA	1,309 mA	2,334.05 mA	0 mA	Jul 13, 2021 9:35 AM

Figur 15 Udvalgte datapunkter fra testhuset i Kalundborg

Alle services, der er baseret på tungere beregninger – f.eks. styring, dataanalyse og smart overvågning – foregår på analyseplatformen. Analyseplatformen står for databehandling og planlægning, og den er



designet til at være skalérbar, idet Neogrids pulje af bygninger er støt voksende. Dette gør ikke bare Neogrid i stand til at køre styringssystemer og analyse på flere bygninger samtidig, men platformen gør det også muligt at køre skræddersyede services, der er tilpassede de mange forskellige lokale varme- og elinstallationer. Inden for dette projekt er vi blevet i stand til at køre et zonebaseret styringssystem, der kan bestemme og realisere de optimale indendørstemperaturer i huse med varmepumper. Analyseplatformen har fået mange opdateringer under OPSYSv2-projektet, men har ikke direkte været en eksplisit del af projektet, idet det er en kontinuer proces at sikre en optimal platform, der kan køre disse services.

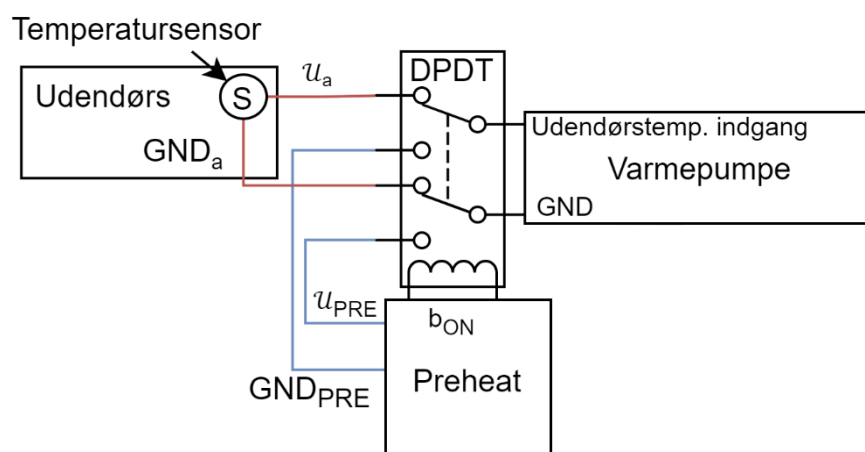


Figur 16 Neogrid PreHEAT Dashboard.

Den sidste del af PreHEAT-platformen er det grafiske brugerinterface, hvor brugeren kan monitorere og konfigurere den fysiske installation, se Figur 16. Brugergænsefladen kan rettes mod en bred gruppe af brugerroller – lige fra Neogrids ansatte, over driftspersonale, der skal håndtere større installationer i f.eks. boligforeninger, og til beboerne selv.

3.4. Overstyring af varmepumpe

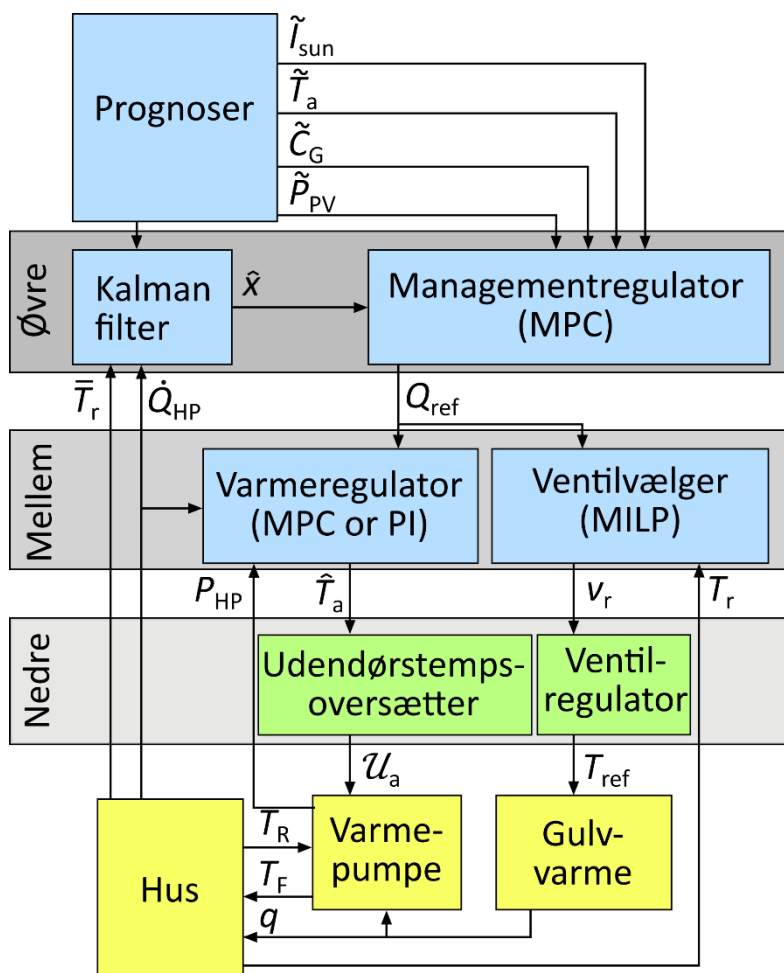
For at kunne styre varmepumpens varmeproduktion bruges overstyring via udendørstemperatursignalet, som bruges i varmekurvens bestemmelse af fremløbstemperaturen. En oversigt over hardwaren kan ses i Figur 17. Hardwaren består af PreHEAT-boksen og et *double pole double throw* (DPDT) -relæ, som muliggør udskiftning af udendørstemperatursensoren med en alternativ spænding givet af PreHEAT-boksen. DPDT-relæet bruges som en sikkerhed for, at systemet kan returnere til normal operation, hvis boksen af en eller anden grund ikke kan boote. PreHEAT-boksen skal aktivt slå overstyringen til ved at sætte den logiske indikator variable $b_{ON} = 1$, som sender en styrespænding til relæet. Skulle boksen miste forsyning, slår relæet automatisk tilbage på udendørstemperatursensoren, og varmepumpen falder tilbage på standardoperation.



Figur 17 Viser hardwaren, som muliggør styring af varmepumpens varmeproduktion. DPDT står for double pole double throw, hvilket betyder, at hvert system har to indgange, som føres videre til to udgange.

3.5. Regulator

Hovedprincipperne bag den implementerede regulator findes i denne sektion. Regulatoren er implementeret i en hierarkisk struktur med tre lag (øvre, mellem og nedre), hvilket kan ses i Figur 18. Det øverste lag indeholder *Energimanageren* (Managementregulator), som har til formål at organisere de forskellige komponenter i systemet samt generere varmeplanen på baggrund af priser og vejrudsigt. Det midterste lag indeholder varmeregulatoren, som skal levere den ønskede varme samt fordele den til de rigtige rum. Det nederste lag er det fysiske lag, som leverer de ønskede styreininput til varmepumpe og gulvvarme.



Figur 18 Diagram over den hierarkiske regulator implementeret i testhuse i Kalundborg.

3.5.1. Management (øverste lag)

Det øvre lag bruger al den information, som er til rådighed, til at generere en timeplan for varmen, $Q_{\text{ref}} \in \mathbb{R}^N$, hvor N er længden på varmeplanen (i dette tilfælde 24 timer). Selvom varmeplanen er på 24 timer, genberegnes den hver time. Enheden for varmeplanen er kilowatt timer [kWh]. Signalerne til rådighed er prognoser og målinger. Prognoserne består i udendørstemperatur, solstyrke og solcelleproduktion for de næste 48 timer. Solcelleproduktionen er afledt fra vejrudsigten. Længden for prognosen af elprisen varierer fra 11 til 35 timer afhængigt af tidspunkt på dagen. Den er lige før kl. 13:00, hvilket er tidspunktet hvor den nye prognose bliver hentet. Da varmeplanen altid er på 24 timer, fyldes manglende priser med en gennemsnitspris for perioden. Den bedste strategi for at udfylde manglende priser er stadig et åbent spørgsmål. Målinger, som bruges til varmeplanen, er varmeflowet fra varmepumpen, \dot{Q}_{HP} , og rumtempe-



raturer fra alle varmezoner, $T_r \in \mathbb{R}^{N_r}$, hvor N_r er antal rum. De enkelte rumtemperaturer bruges ikke direkte, men som et rumareal-vægtet gennemsnit, $\bar{T}_r = \frac{A_r(1)T_r(1) + \dots + A_r(N_r)T_r(N_r)}{\sum_{i=1}^{N_r} A_r(i)}$, hvor A_r er en vektor af rumarealer. Dette betyder, at den enkelte rumtemperatur ikke er kendt, men den påvirker stadig planen via den gennemsnitlige rumtemperatur, \bar{T}_r .

3.5.2. Distributionslag (mellemste lag)

Dette lag har til opgave at levere den mængde varme, som er beskrevet af den første værdi i varmeplanen $Q_{ref}(0)$. Opgaven, som skal løses i dette lag, går ud på at bestemme et flow og en fremløbstemperatur, hvilket resulterer i et varmeflow. Flowet bestemmes af *Ventilvælgeren* og en flow-reference, q_{ref} . Referencen, q_{ref} , er simpelt beregnet baseret på en ønsket temperaturforskel mellem frem- og returtemperatur, ΔT_{ref} . Formlen, som er baseret på ligningen for varmeflow, er $q_{ref} = \frac{Q_{ref}}{c\Delta T_{ref}\Delta t} 3.6 \cdot 10^6$, hvor Δt er sample-tiden, som er en time, og c er den specifikke varmekapacitet for vand. Denne formel er dog kun en guide, da *Ventilvælgeren* er fri til at korrigere flowet, hvis mange rum har brug for varme. *Ventilvælgeren* bruger nemlig de individuelle rumtemperaturer samt referencer til at vælge, hvilke rum der får tilført varmen.

Fremløbstemperaturen bestemmes indirekte af *Varmeregulatoren*, da den har tilbagekobling på varmeflowet, således at der kan korrigeres for over- eller underproduktion. *Varmeregulatoren* styrer varmepumpens produktion ved at overskrive signalet fra udendørstemperaturmåleren, som bruges i varmekurven, som videre bestemmer fremløbstemperaturen.

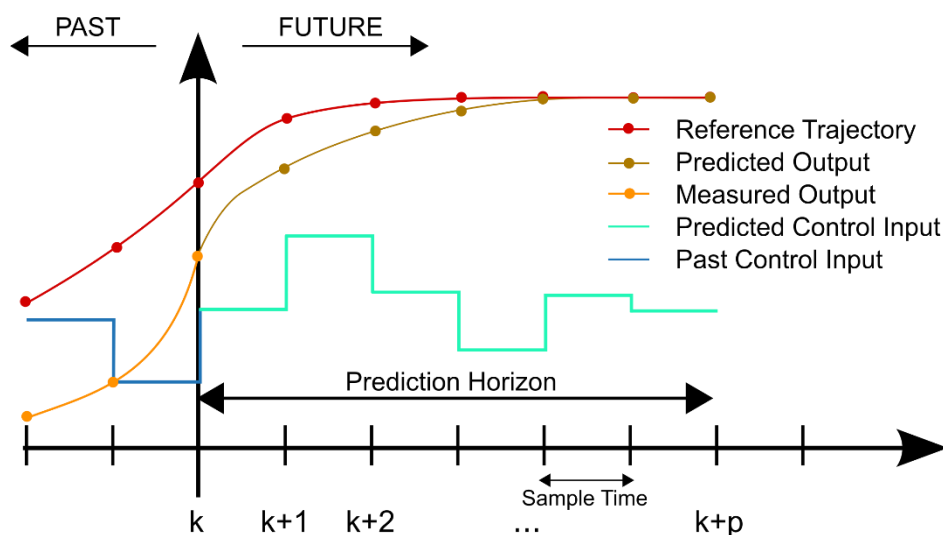
3.5.3. Fysiske lag (nederste lag)

Det nederste lag håndterer styringen af gulvvarmen og varmepumpen. I forbindelse med gulvvarmen er det ventilerne, som skal styres. Ventilerne, $v_r \in \{0,1\}^{N_r}$, kan styres ved at manipulere med temperaturreferencerne, $T_{ref,j}$, for de forskellige rum. Hæves referencen langt over rumtemperaturen, åbnes ventilen, og sænkes referencen langt under, lukkes ventilen.

Den fysiske styring af varmepumpen finder sted med et relæ og en spænding. Den målte udendørstemperatur er repræsenteret af en spænding. Derfor er det nye signal også en spænding, som er oversat fra den kunstige udendørstemperatur beregnet af *Varmeregulatoren*. Om varmepumpen må køre styres af en dedikeret logisk signalindgang på varmepumpen.

3.6. Modelprædiktiv regulering

Dette afsnit beskriver den modelprædiktive regulator (MPC: efter den engelske konvention), som er implementeret og testet i Kalundborg-testhuset. Formålet med regulatoren er at generere varmeplanen for huset. Selvom afsnittet er skrevet til læseren med et grundlæggende kendskab til MPC, kan konceptet ses i Figur 19.



Figur 19 Konceptfigur for MPC³.

MPC er en algoritme, som gør brug af to komponenter: en matematisk formulering af et dynamisk system og en objektfunktion med begrænsninger. Den dynamiske model har til formål at beskrive systemets opførsel givet valgte input, og objektfunktionen "straffer" uhensigtsmæssige input og systemtilstande, således at systemet opfører sig efter hensigten. De to komponenter kombineres til et optimalt kontrolproblem, som løses for den nærmeste fremtid, beskrevet med P i Figur 19. Formålet er at finde den serie af input (Lyseblå i Figur 19), som minimerer straffen beskrevet af objektfunktionen. Dette anses som den optimale strategi. Da fremtiden ikke kan forudsiges akkurat, er det forventet, at de foreslåede input løbende bliver ringere, desto længere ud i fremtiden man ønsker at forudsige.

3.6.1. Principper

Principperne bag managementregulatoren i Figur 18 er, som følger:

1. Huset er beskrevet af en vægtet gennemsnitlig indendørstemperatur, hvilket er atypisk, da mange husmodeller beskriver temperaturerne i de enkelte rum. Konsekvensen er, at de enkelte rumtemperaturer ikke er taget direkte i betragtning, når varmeplanen genereres. De er kun taget indirekte i betragtning, da de indgår i beregningen af gennemsnitsindendørstemperaturen, hvilket betyder, at kolde rum trækker værdien meget ned, og varme trækker den op.
2. Hver time genereres en ny varmeplan for de næste 24 timer. Da der er usikkerheder forbundet med prognoser af modeller, implementeres kun den første time af varmeplanen i overensstemmelse med MPC-algoritmen.

³ By Martin Behrendt - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7963069>.



3. Optimeringsproblemet kan beskrives som et konvekst binært problem. Binært betyder, at der er beslutningstilstande, hvor variabelen enten er 0 eller 1 inkluderet. Sådant et problem er per definition non-konvekst. Grunden, til at det kaldes konvekst, er, at det afslappede (relaxed) problem er konvekst. Afslappet betyder, at binære variable erstattes med kontinuere i intervallet $[0;1]$.
4. Grænsefladen mellem managementregulatoren og de lavereliggende systemer er varmereferencen. Den gives som kilowatt-timer, som skal leveres i de forskellige timer.
5. Optimeringsproblemet er formuleret således, at frit tilgængelige optimeringslødere (solver) kan bruges.

3.6.2. Modelbeskrivelser

Husmodel

Husmodellen er en anden ordens lineær tilstandsmodel (state space), hvor parametrene er tilpassede ved brug af en underrums metode. Her vil principperne blive kort beskrevet. De to tilstande er gennemsnitlig rumtemperatur, T_r , som bruges til at sikre komforten, og gennemsnitlig gulv- eller konstruktionstemperatur, T_f . Bemærk, at den gennemsnitlige rumtemperatur er målt, hvorimod konstruktionstemperaturen er estimeret med et lineært Kalman-filter. Konstruktionstemperaturen er dermed virtuel, hvilket betyder, at den egentlige temperatur ikke relaterer til et bestemt område i bygningen på samme måde, som den gennemsnitlige rumtemperatur relaterer til luft. Temperaturen, T_f , kan derfor både kaldes en gulvtemperatur, da varmen fra varmepumpen først opvarmer denne tilstand, før varmen bliver overført til rummet. På den anden side bør T_f tænkes på som den varme, der er oplagret i bygningen og ikke kan mærkes direkte af beboere. Derfor kan den ses som konstruktionstemperatur. Vi vil herfra referere til T_f som konstruktionstemperatur. Konstruktionstemperaturen er et mål for den varmereserve, som bygningen kan give til rummene, når de afgiver varme til omgivelserne. Er konstruktionstemperaturen høj, falder rumtemperaturerne langsommere, end hvis den er lav, da den erstatter tabt varme fra rummene. Husmodellen tager den producerede varme fra varmepumpen, udendørstemperaturen og solintensiteten som input.

Modellen er:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \frac{-(U_a + U_r)}{C_r} & \frac{U_r}{C_r} \\ \frac{U_r}{C_f} & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} \frac{U_a}{C_r} & \frac{g_{s,1}}{C_r} & \frac{g_{s,2}}{C_r} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} d(t)$$

$$y(t) = [1 \quad 0]x(t)$$

med tilstandsvektoren, $x(t) = [T_r(t) \quad T_f(t)]^T$, kontrolinputvektoren, $u(t) = [\dot{Q}_{HP}(t)]$, forstyrrelsesvektoren, $d(t) = [T_a \quad I_{sol} \quad I_{dir}]$, og outputvektoren $y(t) = [T_r(t)]$. Tilstandssystemet kan skrives som: $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t)$ og $y(t) = Cx(t)$. Hvor A , B og C er matricer.

Koefficienterne er under eksperimentet løbende opdateret med frisk data. Den sidste opdatering resulterede i:



Tabel 4 Eksempel på parameterfit

C_r	30.29724503402434	MJ/K
C_f	48.25706147492914	MJ/K
U_r	1100.70405812859	W/K
U_a	156.1206337047277	W/K
$g_{s,1}$	12.05393729376798	m ²
$g_{s,2}$	14.39106502983872	m ²

Varmepumpeeffektivitetsmodel

Udtrykket, som er brugt til at beskrive varmepumpens effektivitet (COP_{HP} : coefficient of performance), er:

$$COP_{HP} = \frac{k}{P_{HP}} + \left(\frac{k_0}{P_{HP}} + k_1 + k_2 P_{HP} \right) COP_{CARNOT}(T_a)$$

Hvor P_{HP} er eleffekten, konstanterne k, k_0, k_1 og k_2 er parametre, som fittes til data. Udtrykket $COP_{CARNOT}(T_a)$ er, som navnet hentyder, en formulering af Carnot-effektiviteten:

$$COP_{CARNOT} = \frac{\bar{T}_F + 273.15}{\bar{T}_F - T_a}$$

hvor \bar{T}_F er en valgt konstant for fremløbstemperaturen, og T_a er udendørstemperaturen. Varmeproduktionen beregnes således:

$$\dot{Q}_{HP} = COP_{HP} P_{HP} = (k + k_0 COP_{CARNOT}) + (k_1 P_{HP} + k_2 P_{HP}^2) COP_{CARNOT}$$

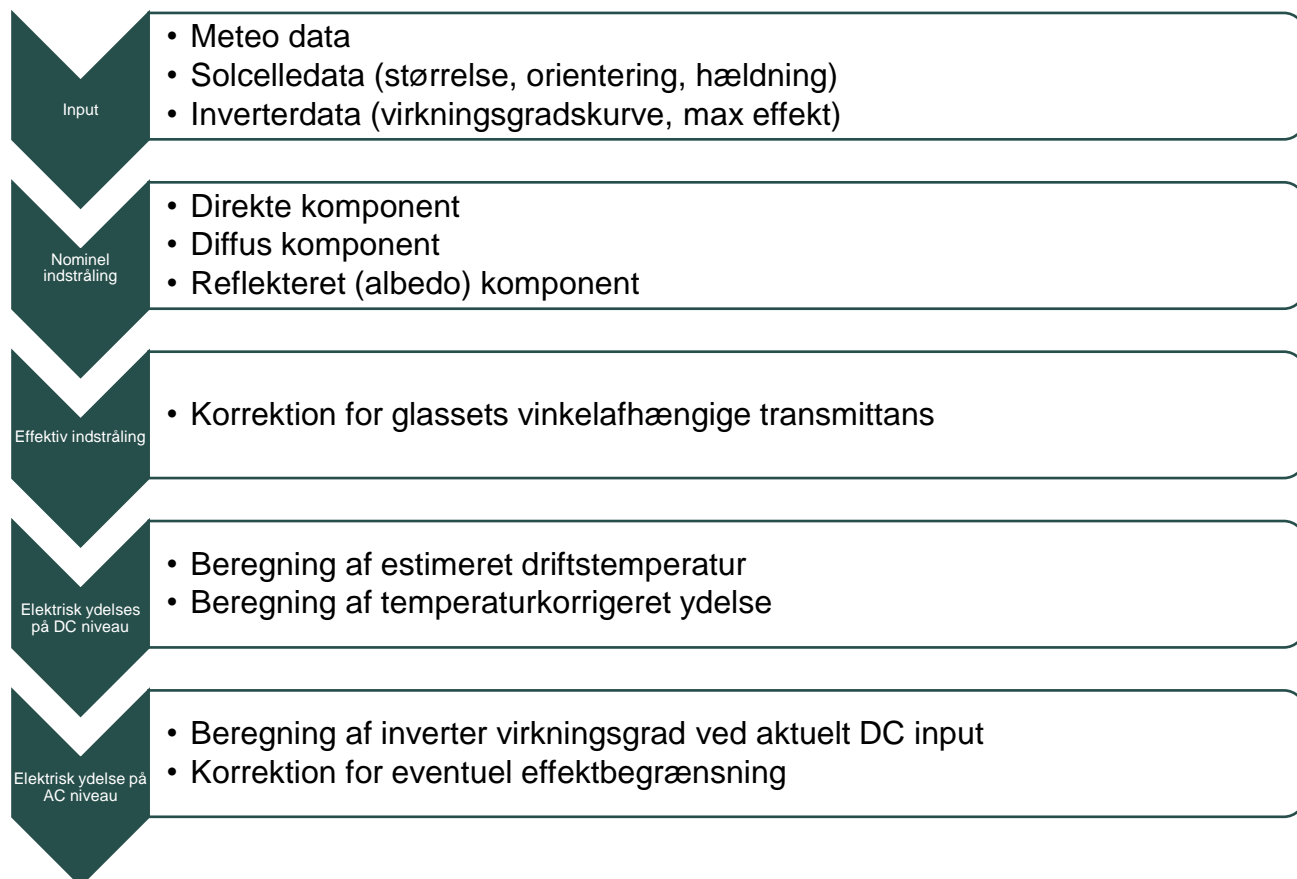
Hvilket er et kvadratisk polynomium, som kan bruges i reguleringen.

Solcellemodel

Til at beregne solcelleanlæggets forventede elproduktion er der som minimum behov for at beregne indstrålingen i solcellernes plan ud fra de meteorologiske data givet som henholdsvis den samlede og den diffuse indstråling på horisontalplan.

De generelle ligninger fra Duffie og Beckman⁴ er benyttet til opstilling af en solcellemodel ud fra indstråling på vandret der kan hentes fra vejrapport. Detaljerne er omfattende og bliver ikke vist her, men princippet for beregningen er i skematisk form:

⁴ Solar Engineering of Thermal Processes, John A. Duffie and William A. Beckman



Ud fra den opstillede model er det muligt at estimere elproduktion fra solcellerne i de efterfølgende timer ud fra vejrudsigten, samt simulere den konkrete produktion til det aktuelle tidskridt i testen. Princippet i formlerne der indgår i punkt 2 og 3 af ovenstående skema er, at de beskriver solens placering, og deraf kan de regne den direkte indstråling på vandret, som vejrudsigten opgiver, om til en vinkelkorrigeret indstråling, der igen kan projiceres over på panelernes flade. Punkt 4 og 5 i ovenstående skema dækker over de tab og konverteringer som vi har i solcellen og inverteren.

4. Forsøg og målinger

Formålet med testhusene var at få prøvet systemet af i virkelige, beboede huse og ikke blot i en laboratorieopstilling. De indledende besøg blev lavet i et hus ejet af Neogrids direktør, da det allerede havde et gulvvarmesystem der kunne kommunikere med styreboksen. Her blev gennemført flowtest med fjernstyring af de enkelte ventiler. Dette er beskrevet nærmere i notatet *2020-01-09_continues_flow_in_simula-*



tion_memo_v1_0. (Bilag 2 til hovedrapport). Det blev eftervist at være teknisk muligt at pulsere på gulvvarmestaterne så der opnås en mellemposition, og ikke 100% eller 0% åben som hidtil. I forhold til indeklima og energi var der dog næsten ingen forskel mellem en strategi med on/off drift og en strategi med kontinuert styring af åbningsgrad ved at aktivere telestaterne med pulseret strøm. (PWM regulering). Det blev derfor besluttet at bruge on/off drift ved forsøgene i testhuset i Kalundborg.

4.1. Kalundborg

Huset er et specielt designet lavenergihus tegnet af ejeren selv. Det er i to plan, har tunge gulve og vægge, og er varmemæssigt opdelt i 14 zoner.

4.1.1. Plantegning



Figur 20 Gulvvarmezoner i stueplan (tv) og på 1. sal(th).

4.1.2. Installationer

Huset i Kalundborg indeholder mange tekniske installationer:

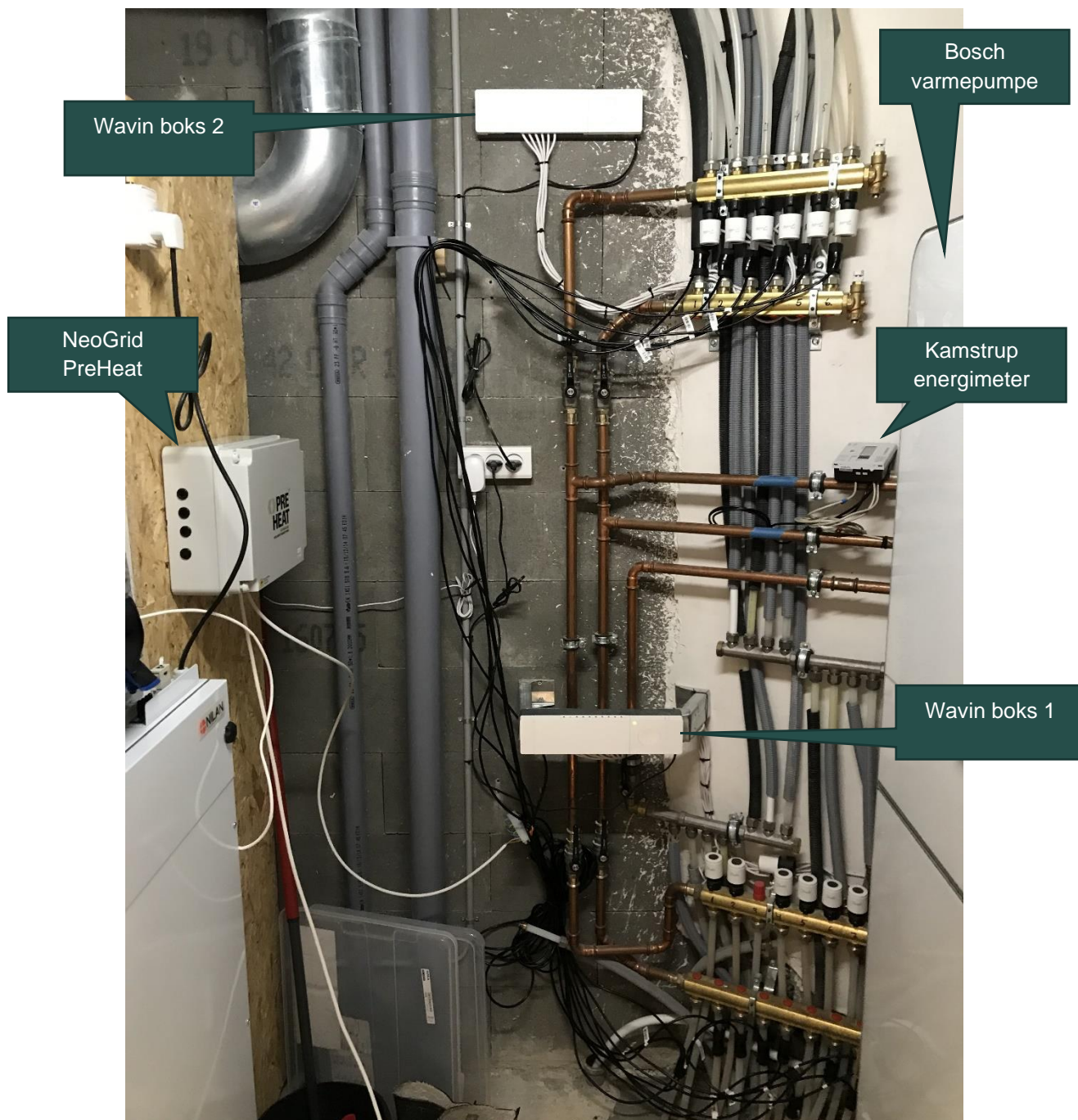
- Luft-vand-varmepumpe
- Solcelleanlæg
- Ventilation med varmegenvinding
- Store elforbrugere (hjemmebio, vandseng, hjemmekontor).

Der var fra starten installeret et gulvvarmesystem med Danfoss-styring og derfor også Danfoss-voksventiler. Da disse kører med samme spænding (24V) som Wavins system, blev det besluttet at lade Danfoss-ventilerne sidde, men erstatte Danfoss-styringen med en tilsvarende fra Wavin. De oprindelige rumtermostater blev skiftet 1:1 med tilsvarende fra Wavin ifølge nedenstående skema:



Tabel 5 Oversigt over husets fordeling på manifold

Nr.:	Udføring N	Rum:	termostat r
1	1	Bryggers	1
2	4	hall	2
3	9	hobbyrum 1	3
4	10	hobbyrum 2	3
5	7	værelse 1 villads	4
6	8	værelse 2 Liam	5
7	2	Badeværelse stueplan	6
8	3	Viktorialierum	7
9	5	Køkkenalrum	8
10	6	Køkkenalrum vinduer	8
11	5	Stue 1	9
12	3	Stue vinduer	9
13	1	Gæsteværelse	9
14	2	Kontor	10
15	4	Soveværelse	11
16	6	Badeværelse 1 sal	12
Nederste manifold			
Øverste manifold			



Figur 21 Bryggers med varmfordelingsanlæg.



4.1.3. Instrumentering

Huset i Kalundborg blev forsynet med en del ekstra instrumentering til støtte for projektets forskningsmæssige del.

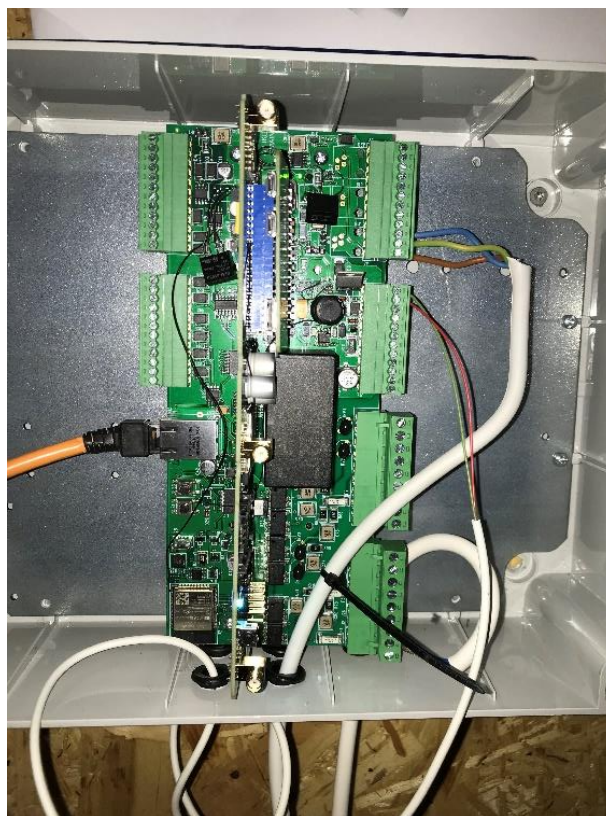
Da OPSYS har brug for de individuelle returtemperaturer, var det nødvendigt at installere yderligere eksterne temperaturfølere på rørene. Det er såkaldte onewire (digitale) -senser, som kan kobles til en enkelt indgang på PreHEAT-boksen. Den termiske kontakt er ikke den bedste, idet de cylindriske følere blev tapet udenpå plastslangerne og efterfølgende isoleret. Dyklommer havde været bedre, men var umulige at installere. Som ekstra kontrol blev onewire-følere desuden monteret på nederste manifold retur, på øverste manifold retur, på fælles retur samt på rumluft i bryggers.

Foruden returtemperaturerne skulle projektet bruge energiforbruget til opvarmning og varmt vand, så to Sharky-energimålere blev installeret i rørsystemet. Disse kan også udlæse temperaturer (fra dyklommer). Endelig blev der installeret elmålere på varmepumpen og på solcelleanlægget for at få en komplet energibalace. Oprindeligt var det meningen at trække data direkte fra solcelleanlæggets inverter via MBUS, men i praksis var der så store vanskeligheder, at dette måtte opgives.

4.1.4. Resultater og driftserfaringer

I OPSYS2-projektet er der indhentet følgende erfaringer fra testhuset i Kalundborg:

- 1) Indretning af Neogrid-styreboksen var lidt præget af, at det er en pilotserie, og der var især udfordringer med at få plads til et printkort uden at beskadige hukommelseskortet. Det tog flere forsøg at få det på plads, men det lykkedes. Desuden var placeringen af huller til kablerne ikke hensigtsmæssig i forhold til, hvor de skulle tilsluttes terminalerne. Terminalerne var svære at identificere, da de var samme farve, uden afmærkning og sad tæt sammen.



Figur 22 NeoGrid styreboks i testversion

Da onewire-sensorerne til temperaturmåling skulle forbindes, krævede det en del arbejde at forbinde dem korrekt via udvendigt ad-hoc-monterede skrueterminaler. Her kunne det være smart med fjederklemmer eller anden hurtig montageform inden i selve boksen eller i en hjælpeterminal placeret ved gulvvarmemanifolden. Så kunne man nøjes med et enkelt kabel videre til styreenheden.

- 2) Opsætningen af elmåler til måling af varmepumpens forbrug var heldigvis let nok (med en elektrikers hjælp), idet den lige netop kunne være på varmepumpens egen DIN-elskinne. Det vil nok ikke være muligt i alle tilfælde. Kommunikationen via MBUS drillede derimod meget, til dels fordi manualen til elmåleren var mangelfuld, men også fordi der opstod en fejl ved signalindgangen på styreenheden (denne blev senere skiftet).
- 3) Wavin-boksen til styring af gulvvarmesystemet fungerede godt i forhold til programmering af rumtermostater til de enkelte kredse. Dog var det svært at få alle ledninger til telestaterne på plads, da ledningerne var lidt for tykke til at kunne klemmes ned i de riller, der er i Wavin-styringen. Der er åbenbart tyndere ledninger på Wavins egne telestater.



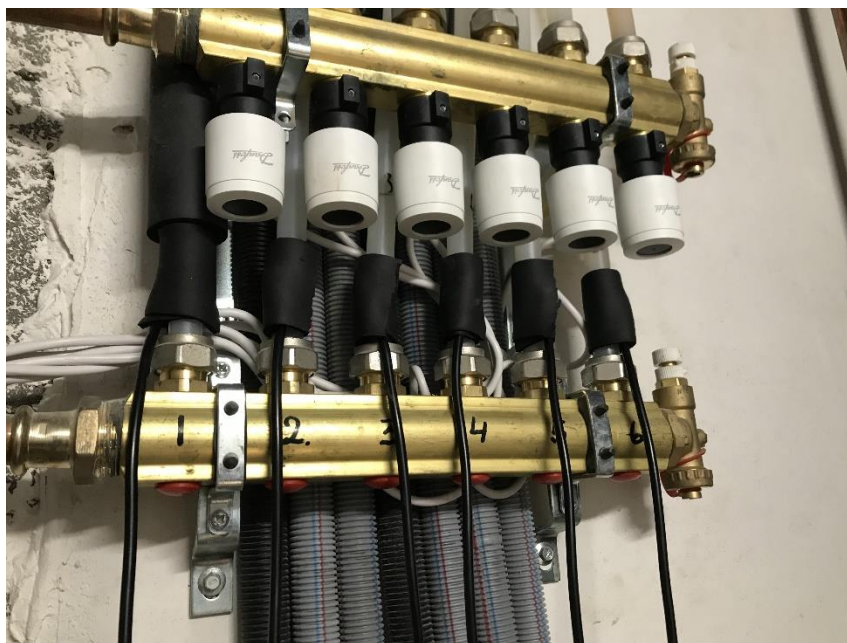
Figur 23 Tilslutning af Danfoss-telestater i Wavin-gulvvarmeboks.

- 4) Varmemålerne (Sharky) er et kapitel for sig. De kan fås i to versioner med flowmåler på enten det kolde eller det varme rør, og desværre gjorde montageforholdene, at VVS'eren ikke kunne montere den ene som beregnet. Den kom dermed til at sidde på det forkerte rør og virkede ikke. Den måtte derfor udskiftes. Det kunne være godt med en universal løsning, hvor huset kan vendes alt efter flowretning, og hvor man kunne korrigere for rørtemperaturen efterfølgende.



Figur 24 Sharky-varmemålere til rumvarme og varmt brugsvand.

- 5) Montagen af de ekstra temperaturfølere til returtemperatur for hver kreds var vanskelig, da pladsen omkring de enkelte slanger er meget trang. Det lykkedes dog at spænde de cylindriske sensorer nogenlunde fast og omvikle dem med selvklæbende isolering. Et fladt sensorhoved ville have været lettere at montere med og med bedre termisk kontakt.

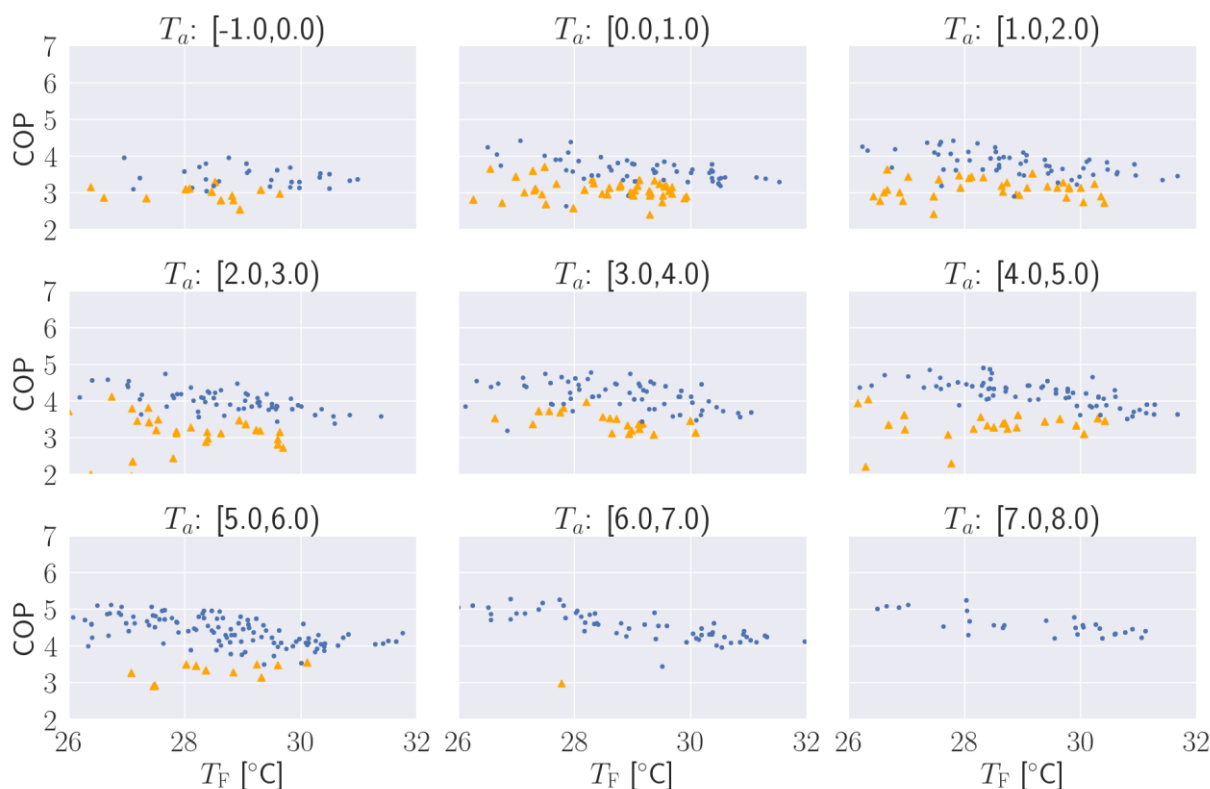


Figur 25 Udvendigt monterede temperaturfølere på returledningen for hver zone.

- 6) Solcelleinverteren (Kostal PICO) kunne desværre ikke kommunikere med Neogrid-styringen, selvom der blev gjort utallige forsøg. Mange af disse invertere er ikke forberedt på, at 3. part skal kunne interface og manipulere, hvordan de styrer. De interfaces, vi havde til rådighed på inverteren, responderede ikke som forventet, og da det ikke var muligt at få yderligere support fra leverandøren, valgte vi en mere simpel løsning. I sidste ende endte det med, at vi monterede en elmåler, der målte produktionen, for at have data til at lave forecast. I sidste ende endte det med at vi monterede en elmåler, der målte produktionen, for at have data til at lave forecast. Hovedmåleren via datahub kunne heller ikke levere specifik måling på hvad der samlet set er produceret – kun en nettomåling, hvor husets forbrug blev trukket fra solcelleproduktionen.

4.1.5. Sænkning af varmepumpens fremløbstemperatur

Det er et velkendt problem, at dårligt indstillede varmekurver sænker varmepumpernes effektivitet. Det er endvidere almindeligt kendt, at sænkning af varmepumpens fremløbstemperatur øger effektiviteten. Denne påstand understøttes af projektets måledata, set i følgende figur, hvor COP klart falder, når fremløbstemperaturen øges.



Figur 26 : Forholdet mellem fremløbstemperatur T_{F} og COP ved forskellige udendørstemperaturintervaller T_{a} . Hver blå prik repræsenterer et COP-estimat observeret over en hel time. De orange trekanten viser COP for en time, hvor varmepumpen udførte afrimning.

Det er derfor interessant at finde metoder, hvor konfigurationen af varmekurven ikke er afhængig af varmepumpeinstallatøren, som måske (for at undgå klager) fokuserer på indendørs komfort frem for COP. Fokus på komforten har en tendens til at føre til højere fremløbstemperatur end nødvendigt. En del af OPSYS 2.0-projektet er blevet dedikeret til at undersøge en billig metode til at sænke fremløbstemperaturen mest muligt.

Metoden har til formål at øge flowet i systemet, således at den samme mængde varme kan leveres ved en lavere fremløbstemperatur. Dette mål opnås ved at erstatte den eksisterende gulvvarmezonerregulator med en pulsbreddemodulationsmetode, som med regelmæssige perioder åbner og lukker kredsløbet til hver af telestaterne. Andelen af perioden, hvor kredsløbet er åbent, bestemmes af styresignalet u , som giver en værdi mellem 0 og 1. Signalet u betegnes som åbningsgraden. Styresignalerne bruges derefter til at estimere varmebehovet i de enkelte rum. En værdi tæt på 0 indikerer lav efterspørgsel, og tæt på 1 indikerer høj. PWM-regulatoren bruger forskellen mellem rumtemperatur og reference til at bestemme åbningsgraden u . Fremløbstemperaturen, som deles af alle kredsløb, sænkes derefter langsomt indtil åbningsgraden af mindst et kredsløb bliver tæt på maksimum. Hvis fremløbstemperaturen sænkes yderligere efter et kredsløb er maxet ud, risikerer rummet at blive underopvarmet.



Kravene til metoden er:

1. Der skal være et relativt nominelt flowbidrag for hvert kredsløb. Relativt nominelt flow for en kreds er her defineret som et flowbidrag til det samlede flow, når kredsløbet er åbent.
2. En procedure til at justere fremløbstemperaturen ved hjælp af et eksternt signal.
3. En procedure til at åbne og lukke individuelle gulvvarmekredse.
4. PWM-perioden bør ikke være kortere end en time for at undgå at skifte ventilerne for hurtigt.

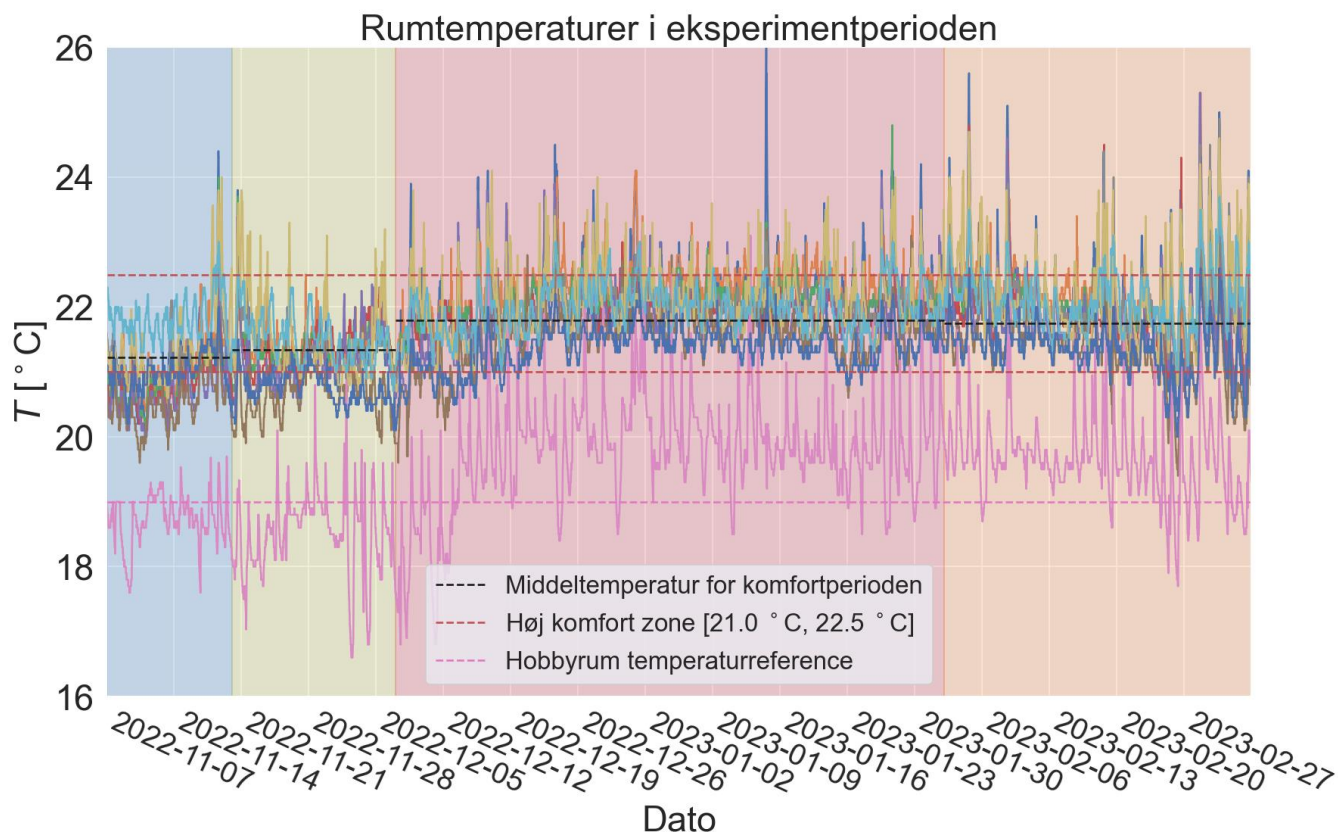
Konklusionen fra undersøgelsen er, at det er muligt at finde et mere effektivt driftspunkt for varmepumpen ved hjælp af den her beskrevne fremgangsmåde. Ydermere ser komforten ikke ud til at blive påvirket af PWM-cyklussen af ventilerne. Undersøgelsen så kun en elbesparelse på 2,3 %, hvilket skyldes at varmekurven allerede var godt justeret i dette tilfælde. Den største ulempe ved metoden kommer fra behovet for et defineret et nominelt flow, men et godt skøn kan ofte fås fra idriftsættelsesnotaterne for gulvvarmesystemet.

4.2. Demonstrationsresultater

Dette afsnit gennemgår resultaterne fra demonstrationen. Eksperimentet kørte i perioden fra 7. november 2022 til 6. marts 2023. I denne periode blev fire komfortniveauer testet. Den følgende tekst bør læses således, at kontekst er præsenteret i brødtekst, og figurindhold er beskrevet i figurtekster.

4.2.1. Komfort

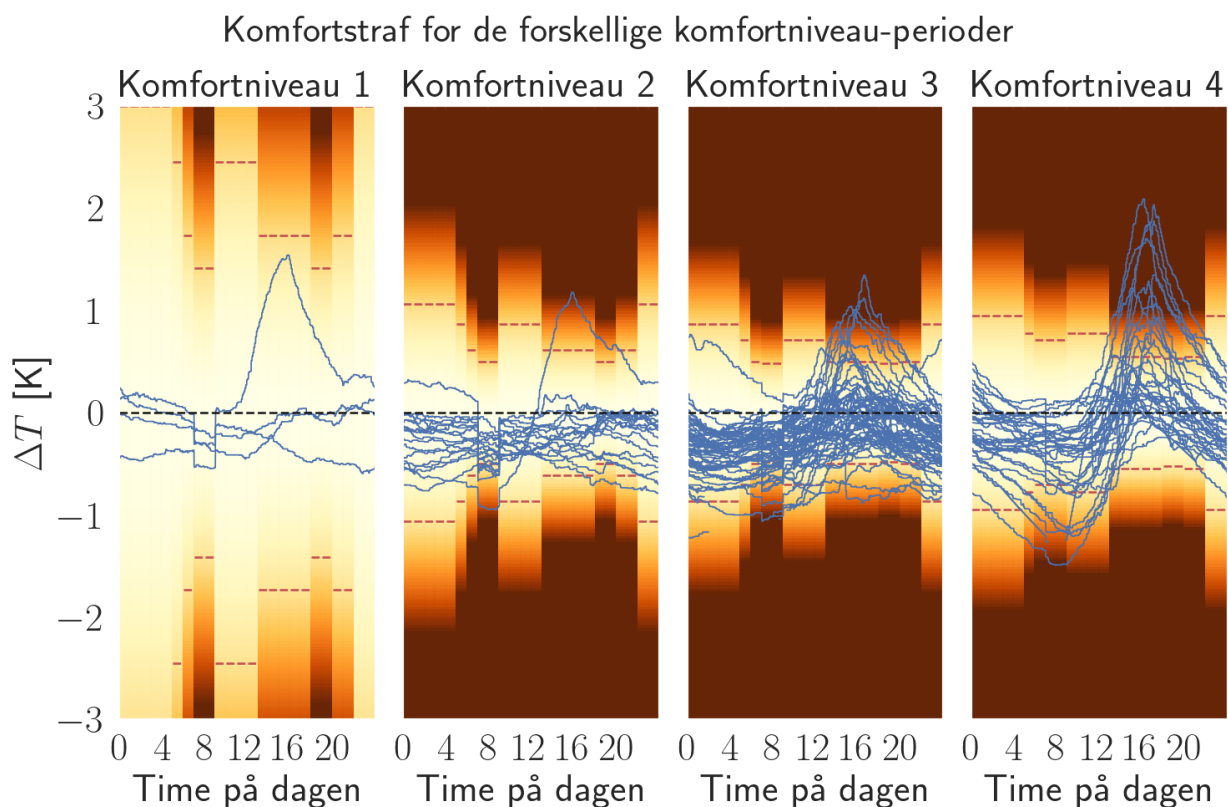
Da managementregulatoren kun bruger en gennemsnitstemperatur til at generere varmeplanen, er det vigtigt at undersøge, om temperaturkomforten kan holdes i det enkelte rum. Som det kan ses i Figur 27, der viser temperaturerne for alle rum, så er der ikke noget rum, som divergerer. Den lyserøde graf er hobbyrummet, som bevidst holdes koldere end de andre. Den blå periode (koldeste) fandt beboerne for ubehagelig, og derfor blev referencen hævet. Den røde periode (varmest) og den orange var en smule varmere end sammenligningsdata, som er opsamlet sidste varmesæson, så de danner grundlaget for den økonomiske sammenligning. Den gule periode var væsentligt koldere end sammenligningsdata, men var temperaturmæssigt tilfredsstillende for beboerne.



Figur 27 Rumtemperaturerne gennem hele eksperimentet. Baggrundsfarver viser de fire komfortniveauer, som har været brugt i perioden. Temperaturreferencen er hævet i farverækkefølgen: blå (lavest), gul, orange og rød (højest). Dette kan tydeligst ses på de sorte

Sidst i den orange periode er det muligt at observere periodiske temperaturfald. Dette skyldes dog, som vist i Figur 31, prækøling før episoder med intens sol.

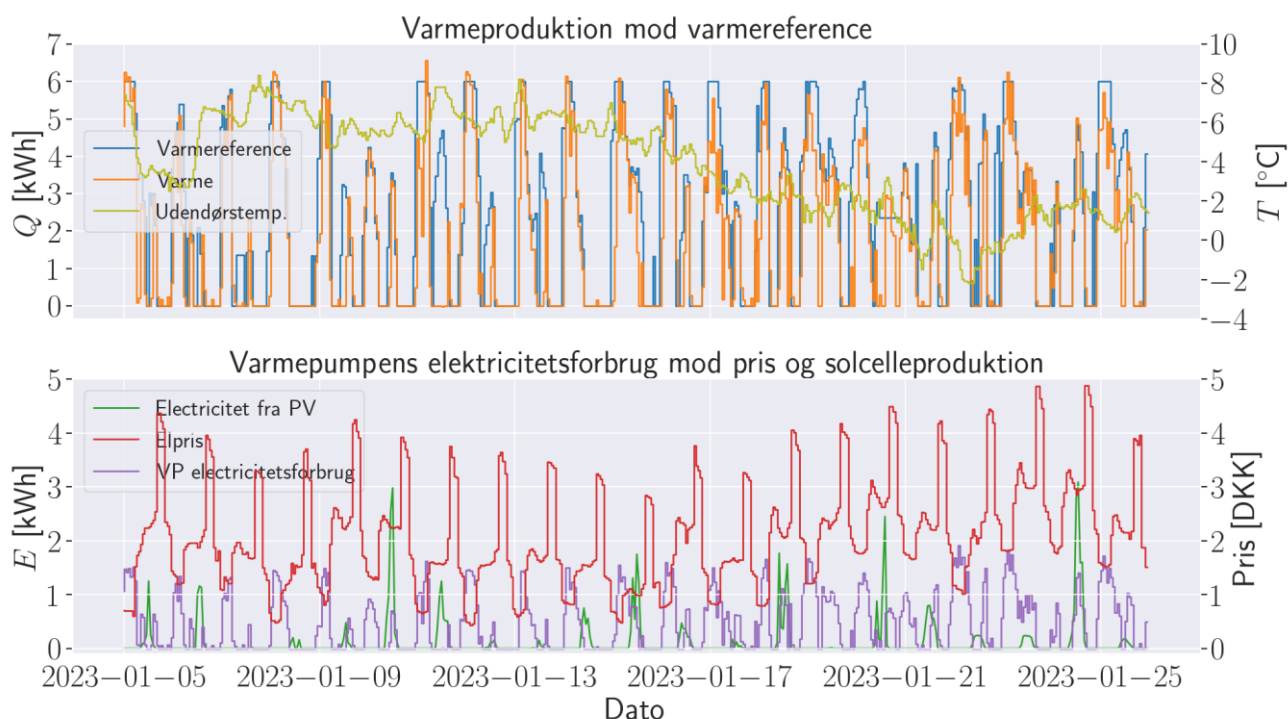
Figur 28 illustrerer den mekanisme, som holder den gennemsnitlige rumtemperatur tæt på den gennemsnitlige reference. Ved at inkludere en straf i MPC'ens optimeringsproblem, som er relateret til temperaturafvigelse, $\Delta T = T_r - T_{ref}$, får regulatoren incitament til at holde temperaturen passende tæt. Straffefunktionen er: $s = c_{komf}(\Delta T)^2$. Straffen s er vist med farve i Figur 28. Hver time kan have forskellig værdi for c_{komf} , som er skruetparameteren. Den røde stiplede linje fungerer som sammenligningsgrundlag ved at temperaturforskellen ΔT hvor $c_{komf}(\Delta T)^2 = 1$ givet den pågældende c_{komf} . Derudfra kan det ses, at komfortniveau 2 førte til den højeste straf og niveau 1 til den laveste, dermed tillades større temperatur fleksibilitet. I perioden med komfortniveau 4 kan det ses, at mange dage indeholder en underafkøling efterfuldt af en overophedning. Dette er regulatorens forsøg på at udglatte straffen i perioder, hvor overophedning ikke kan forhindres grundet stærk sol.



Figur 28 En illustration af det kvadratiske strafudtryk, som er en funktion af afstanden mellem gennemsnitsindendørstemperatur og referencen. De blå kurver er eksperimentdage plottet oven på hinanden. Denne funktion holder gennemsnitsindendørstemperaturen tæt på.

4.2.2. Produktionsmønstre

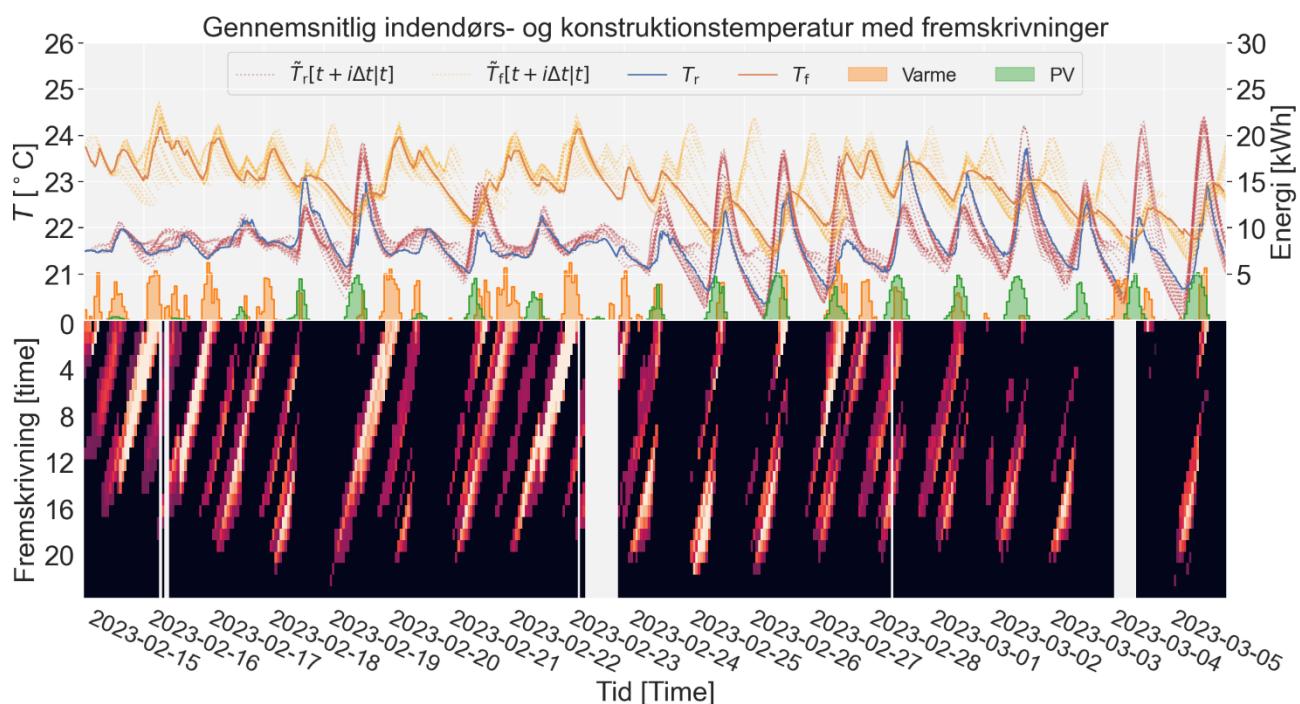
I dette afsnit præsenteres de daglige produktionsmønstre, som er resultat af pris- og vejrmønstre. Den øvre underfigur i Figur 29 viser den leverede varme imod varmereferencen, som kommer fra varmeplanen. Som det kan ses, er der ikke fuld overensstemmelse mellem signal og reference, men resultatet er godt nok til, at det kan bruges til at booste og sænke varmeflowet. Unøjagtigheder mellem signal og reference bliver rettet løbende af tilbagekoblingseffekten i MPC-algoritmen.



Figur 29 Øvre underfigur: Viser den leverede varme op imod varmerefERENCE samt udendørstemperaturen. Nedre underfigur: Viser produktionsmønstret imod pris og solcelleproduktion.

Den nedre underfigur i Figur 29 viser tydeligt, at størstedelen af varmen bliver leveret om natten, hvor elprisen er billigst. Varmen bliver leveret med høj intensitet, hvilket sænker varmepumpens effektivitet, men det opvejes af den billigere pris. Samtidig bliver der produceret, når der er fri energi til rådighed fra solcellerne. På koldere overskyede dage bliver der også produceret i løbet af dagen, men med lavere intensitet, således at varmepumpen kører med høj effektivitet.

Figur 30 er inkluderet for at vise indflydelsen af den prædiktive egenskab. De to tilstande, som vises, er gennemsnitlig rumtemperatur, T_r , som bruges til at sikre komforten og gennemsnitlig gulv- eller konstruktionstemperatur, T_f . Bemærk, i øvre underfigur, at når der tilføres varme fra varmepumpen, stiger konstruktionstemperaturen kraftigt, hvorefter rumtemperaturen følger med forsinkelse.



Figur 30

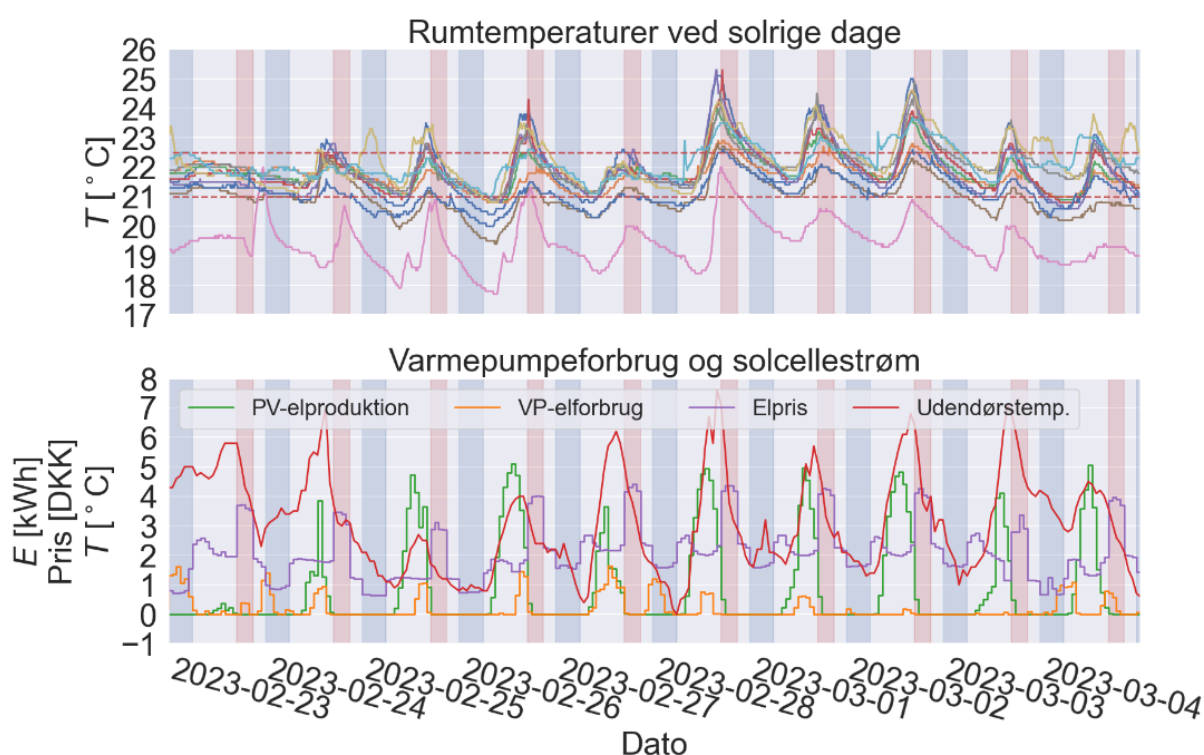
Øvre underfigur: Viser et tidsseriudsnit af udviklingen for de to tilstande, som beskrives af den dynamiske model. De to tilstande er gennemsnitlig rumtemperatur, T_r (fuldoptrukket blå), og konstruktionstemperatur, T_f (fuld-optrukket orange). Orange plamager er tilført varme fra varmepumpen, og grønne plamager er solcellestrøm.
Nedre underfigur: Viser vertikale søjlerepræsentationer af varmeplanen for hver time. Lyse og mørke farver indikerer henholdsvis høj og lav varmeproduktion. I sorte områder er varmepumpen slukket. Time 0 på y-aksen er nutid, og derfra bevæger planen sig ud i fremtiden, som man kommer ned ad aksen. Hvide plamager er manglende data forårsaget af internetnedlukning i området.

Managementregulatorens prædiktive egenskaber kommer til udtryk gennem de henholdsvis røde og orange prikkede linjer, som relaterer til prognoser eller fremskrivninger af rum- og konstruktionstemperatur. Prognoserne af temperaturerne er placeret på tidsaksen efter det tidspunkt, hvor de er genereret, og repræsenterer dermed buddet på fremtiden på det givne tidspunkt. Den nedre underfigur i Figur 30 viser vertikalt varmeplanen for hver time. Varmeplanen er placeret således, at nutiden er øverst, og længst ude i fremtiden er nederst. De diagonale linjer forekommer, som planlagte varmeperioder bevæger sig mod nutiden. Når en varmeperiode når toppen af figuren (time 0), så manifesterer den planlagte varme sig som leveret varme. Bemærk, at store planlagte varmeperioder kan aflyses med kort varsel, hvilket betyder, at prognosen for konstruktionstemperaturen kan tage en helt ny retning. Dette ses fx tydeligt den 18. februar 2023. Årsagen er, at vejrudsigten for den 19. februar med kort varsel har forudsagt høj sol, hvilket kræver en prækøling af huset frem for en natlig forvarmning baseret på billig strøm.



4.2.3. Kontrolløsning for solrige dage

En af de store fordele, som managementregulatoren har overfor benchmark-regulatoren, er prækøling før solrige perioder. Denne egenskab kan ikke bare reducere påvirkningen af overophedningsperioder, men også spare energi og omkostninger. Sidst i februar til starten af marts (24. februar-3. marts) kom den første periode med vedvarende sol, hvilket kan ses i Figur 31.



Figur 31 En serie med solrige dage.

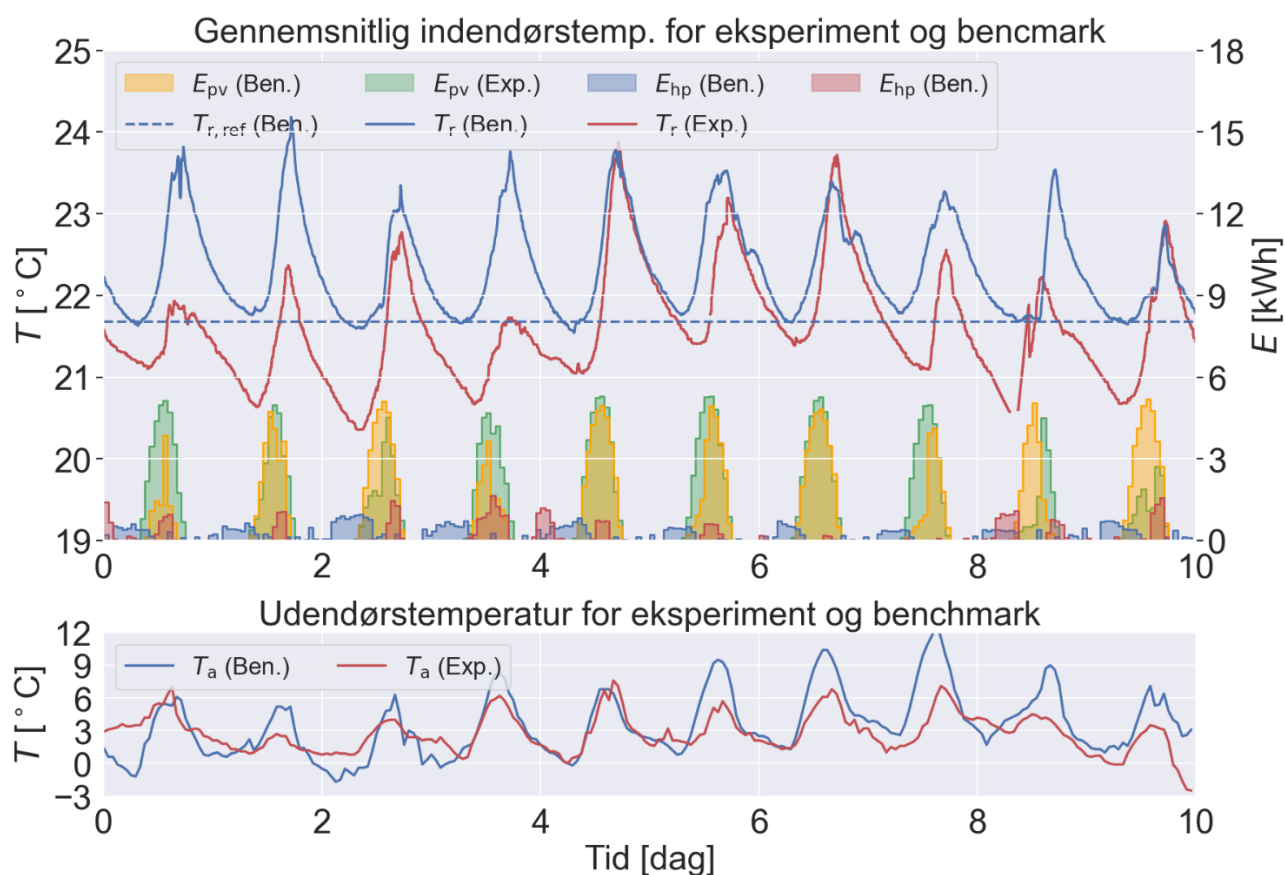
Øvre underfigur: Viser alle rumtemperaturerne i perioden samt et komfortbånd vist med stiple. Røde plamager indeholder kogespidstariffer og blå nattariffer.

Nedre underfigur: Viser solcelle-el, elforbrug fra varmepumpen, elpriser og udendørs temperatur.

Rumtemperaturerne, i øvre underfigur, er flere gange vel over 23 °C, hvilket illustrerer husets følsomhed overfor solskin fra en lavthængende sol. I nedre underfigur er varmeproduktionen plottet sammen med solcelleproduktionen. Her kan det ses, at regulatoren vælger at prækøle huset ved at undlade at starte varmepumpen i den billige natperiode. Den begrænsede mængde varme, som skal leveres, bliver leveret med solcellestrøm. Huset har dermed stort set intet strømforbrug til varme i denne periode, og det er vel at mærke, mens udendørstemperaturen svinger mellem 1-7 °C. Ved at afkøle huset før en solbegivenhed, gives der mulighed for at mindske ubehaget ved overophedning. Udfordringen er i den sammenhæng at undgå, at afkølingen bliver for ekstrem.



For at vise forskellen mellem de to kontrolalgoritmer, er en lignende tidserie fra benchmark-perioden blevet fundet. Sammenligningen mellem solperioden i benchmark- og eksperimentperioden vises i Figur 32.



Figur 32 Sammenligning mellem benchmark- (Ben.) og eksperimenttidsserie (Exp.), hvor det var solrigt i begge tilfælde, og udendørstemperaturen var lignende.

Øvre underfigur: Viser en sammenligning af gennemsnitsrumtemperaturen for de to perioder. Den stiplede linje er gennemsnitsreferencen for rummene i benchmark-perioden. Grønne og gule plamager er henholdsvis solcellestøm fra eksperiment- og benchmark-perioden. Røde og blå plamager er henholdsvis varmepumpens elforbrug i eksperiment- og benchmark-perioden.

Nedre underfigur: Viser en sammenligning af udendørstemperaturen for benchmark (blå) og eksperiment (rød).

Tre parametre skal stemme overens, for at de to perioder kan sammenlignes. Den første parameter er udendørstemperaturen, som ses i nedre underfigur i Figur 32. Som det kan ses, er disse to perioder relativt ens med en gennemsnitlig temperatur på $2,8^{\circ}\text{C}$ for eksperimentet og $3,4^{\circ}\text{C}$ for benchmark-perioden. Faktor to er mængden af sollys. For at evaluere mængden af sollys, som huset er udsat for, bruges produktionen fra solcellepanelet. Under eksperimentdagene er der produceret 233 kWh strøm fra solcellerne, og i benchmark-perioden er der produceret 265 kWh. Dette giver igen benchmark-perioden en lille fordel med hensyn til energiforbrug. Den sidste parameter, som også er den sværeste at sammenligne,



er indendørstemperaturen. Her bør temperaturerne være ens, da store forskelle forurener resultatet med besparelser eller fordyrelser, som er forbundet med energibehovet, som er bundet op på den gennemsnitlige indendørstemperatur. På den anden side sænkes temperaturen netop til at undgå en senere overophedning.

Resultatet af sammenligningen mellem de to perioder er, at der blev brugt 42 kWh strøm i benchmark-perioden imod 20 kWh i den tilsvarende eksperimentperiode, hvilket er en reduktion på 50 %. Hvad omkostninger angår, kostede eksperimentperioden 37 kr. mod estimerede 71 kr. i benchmark-perioden, hvilket giver en reduktion på ca. 47 %. Dette betyder, at solrige dage kan udgøre en besparelsesfaktor, men besparelsen kommer med en risiko, da besparelsen hovedsageligt ligger i at springe den billige natperiode over. Hvis der fejlkalkuleres, og den nødvendige mængde sol ikke indtræffer, er der risiko for, at der skal varmes i løbet af dagen ved højere energipriser, og dermed ændrer en besparelsessituation sig hurtigt til en tabssituation.

4.3. Roskilde

OPSYS 2.0-projektet omhandler blandt andet solcelleanlæg med tilhørende batterisystem, idet der skal udvikles en Smart Home-styring fra Neogrid, som kan tage disse elementer i beregning i samspil med en varmepumpe. I projektet var der således lagt op til, at der skulle installeres varmepumpe med tilhørende Neogrid-boks på adressen Nordhøjen 24 i Roskilde. Da dette ikke kunne lade sig gøre indenfor projektets tidsramme, blev det i stedet aftalt med ejeren, at dennes batterianlæg (ofte benævnt BESS: Battery Energy Storage System) kunne gøres tilgængeligt for projektet, så data kunne indsamles og analyseres. I dette notat er anlæggets driftsdata beskrevet og analyseret med henblik på at danne grundlag for en model, der vil kunne bruges i den samlede styringsalgoritme for boliger med solcelle- og batterisystem ud over varmepumpe.



Figur 33 Udvendig montage af batteriet. Foto: Xolta.

Beskrivelse af batterisystemet

- Xolta stationært batteri af typen LiFePO
- 5 kWh nominal kapacitet. Med egen konverter, tilsluttet i eltavlen
- Screendumps fra dashboard
- Fotos
- Tekniske data:



TEKNISKE SPECIFIKATIONER		1 BATTERI
Kapacitet		5 kWh
Netspænding		1 x 230V AC
Omgivende temperatur		-20°C til 35°C
Kabinetdesign		Forskellige farve- og materialevalgmuligheder
Mål		H:772mm x B:664.5mm x D:259.5 mm
Vægt		70 kg
IP klasse		IP55
Forventet levetid		15 år
Garanti*		10 år
Montage		Indendørs/udendørs - væghængt/fritstående
Standby forbrug		<10W
Målerkoncept		3-fase Modbus eller TCP/IP
Ødrift		Fra 2022
Celleteknologi		Li-ion LFP / Nominel spænding 48V
Standarder	Generelt:	Lavspændingsdirektivet (LVD) 2014/35/EU og Elektromagnetisme kompatibilitet (EMC) 2014/30/EU
	Transport:	UN38.3 klassificering for sikker transport
	Sikkerhed:	EN 61010-1: 2010 + A1: 2016, IEC 62619: 2017
	EMC:	EN 61000-6-2, Industriel klassificering, EN 61000-6-4, Klasse A

* Afhængig af region og serviceaftale

Figur 34 Kilde: XOLTA_DataSheet_BAT-5_Kompakt_2sider_DK_A4_Opdateret-110521.pdf

4.3.1. Målinger på batterianlæg i bolig med solceller

I samarbejde med batterileverandøren Xolta (en del af Lithium Balance) er der indhentet data for et års drift i perioden 31/3 2021 til 30/3 2022. Datafilen indeholder detaljerede oplysninger om batteriets drift foruden produktionsdata for bygningens solcelleanlæg.

Da der er tale om et batterianlæg med indbygget DC-/AC-tovejskonverter, er det relevant at se på den samlede karakteristik såvel som på selve batteriets virkningsgrad under praktisk drift – også kaldet round-trip-efficiency. Eftersom der er tale om målinger under ukontrollerede forhold, er forbruget og opladningen varierende hen over døgnet og året, hvilket vanskeliggør en præcis bestemmelse af virkningsgraden. Specielt er det en udfordring, at batteriets ladetilstand (state of charge) varierer kraftigt under brug, således at en energibalance over korte tidsrum bliver usikker, hvis SOC ikke er den samme ved start og slut af måleperioden.



Figur 35 Eksempel på driftsmønster trukket fra Xoltas brugerapp. Bemærk, at der på de gode soldage lades på batteriet, samtidig med at der er eksport af el. Dette skyldes begrænsningen i den effekt, der kan lades med.

Databearbejdning

De rå data er først rensset for enkelte åbenlyse fejldata (ved overskrivning med efterfølgende værdi), hvorefter DC- og AC-energibalancer er opstillet måned for måned. I praksis er de positive værdier for AC-tilførsel til batterisystemet summeret for sig og de negative værdier for sig. Den totale virkningsgrad kan da bestemmes ved:

$$\text{Virkningsgrad}_{AC} = \frac{\sum AC_{neg}}{\sum AC_{pos}}$$

Eftersom SOC kan være forskellig ved start og slut af måleserien, bør der korrigeres med differensen af indeholdt energi i batteriet. For lange tidsperioder kan man dog se bort fra dette, da den energi, der passerer gennem batteriet i perioden, er langt større end energiforskellen ved start og slut.

For analyse på månedsniveau er der korrigeret med forskellen i batteriets energiindhold, der er beregnet som:

$$\Delta E_{bat} = (SoC1 - SoC2) * E_{use}$$

E_{use} er batteriets udnyttelige energiindhold, her opgivet til 4,5 kWh. SoC-værdien er beregnet i Xoltas BMS-system og hentes direkte fra datafilen. BMS-systemet leverer også data for den samlede batterispænding samt oplade-/afloadestrøm på DC-siden. Det er derfor muligt at beregne den tilførte DC-energi som:

$$E_{dcOpl} = \sum (I_{dc_pos} * U_{dc})$$



Tilsvarende findes den afladede mængde DC-energi som:

$$EdcAfl = \sum (Idc_neg * Udc)$$

På samme vis som for den totale AC-virkningsgrad, findes nu selve batteriets virkningsgrad korrigeret for start- og sluttillstand:

$$Virkningsgrad_DC = \frac{\sum EdcAfl - \Delta Ebat}{\sum EdcOpl}$$

Med oplysning om den totale virkningsgrad samt DC-virkningsgraden er det nu enkelt at beregne konverterens effektivitet som:

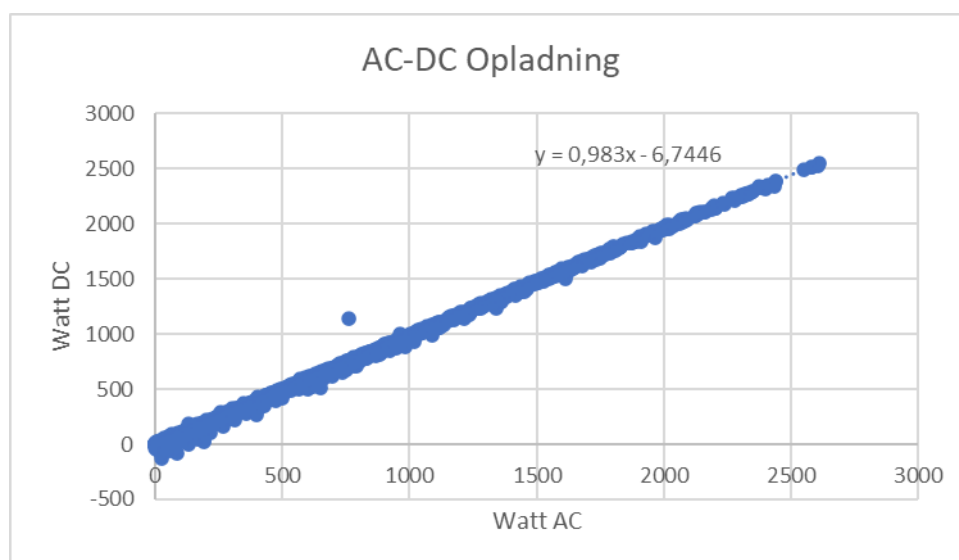
$$Virkningsgrad_Konv = \frac{Virkningsgrad_DC}{Virkningsgrad_AC}$$

Da konvertering fra jævnstrøm til vekselstrøm (inverter) er mere kompliceret end omvendt (ensretter), må der forventes større tab ved afladning af batterisystemet end ved opladning. Disse tilstande er derfor analyseret hver for sig. Tabene i systemet omfatter dels standby forbrug til automatik og kommunikation, dels elektrokemiske procestab samt ohmske tab, som stiger med stigende strømstyrke.

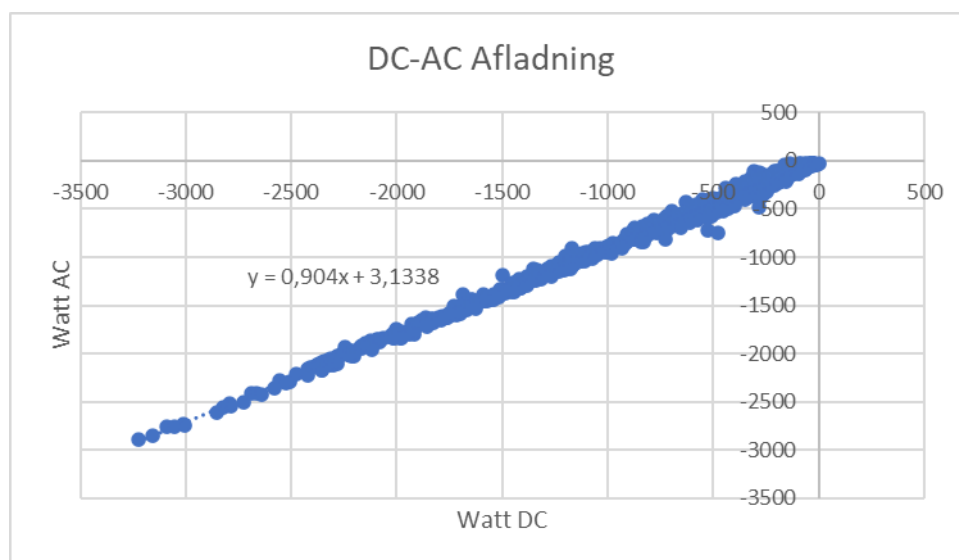
Producenten har angivet et standby forbrug for hele systemet på under 10 W.

Måleresultater

En gengivelse af de rå måleværdier for optaget og afgivet effekt viser en næsten lineær sammenhæng mellem AC- og DC-siden:



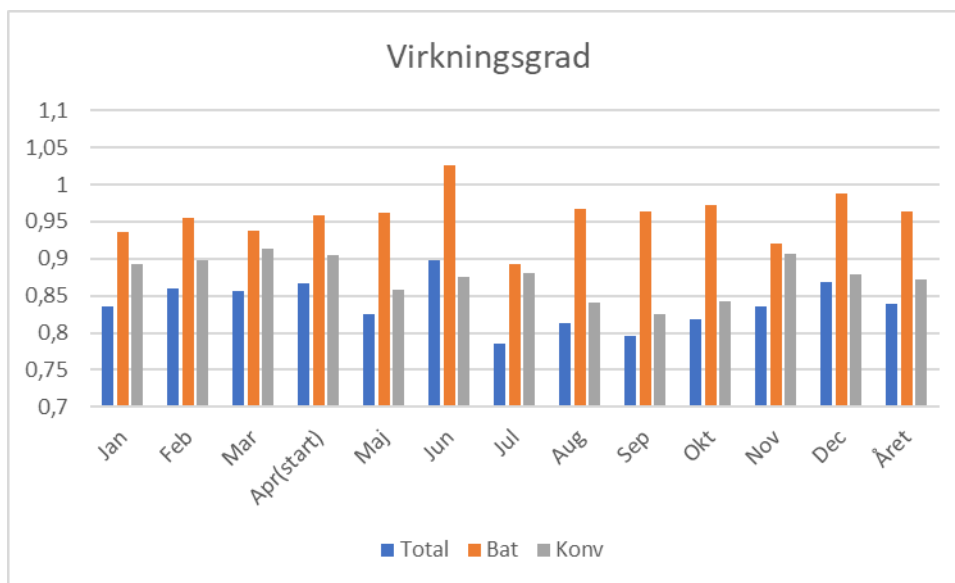
Figur 36 Karakteristik ved opladning. Kurvehældningen indikerer virkningsgrad for konverteringen.



Figur 37 Karakteristik ved afladning. Kurvehældningen indikerer virkningsgrad for konverteringen.



Den månedlige totale virkningsgrad samt delvirkningsgrader for konverter og batteri er vist herunder:



Figur 38 Månedlig og årlig virkningsgrad.

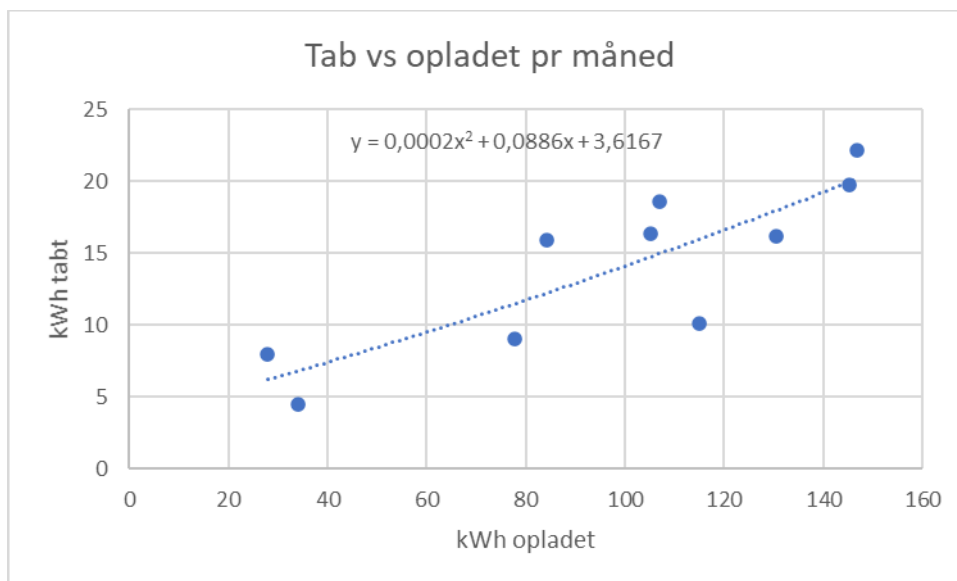
Der er formentlig en målefejl i juni måned, da batteriet tilsyneladende leverer mere, end det modtager. Batteriets effektivitet i december er næppe heller helt realistisk. Der er tendens til lidt større konvertertab i sensommeren, ellers er virkningsgraden nogenlunde stabil.

Tabel 6 Værdier i tabelform

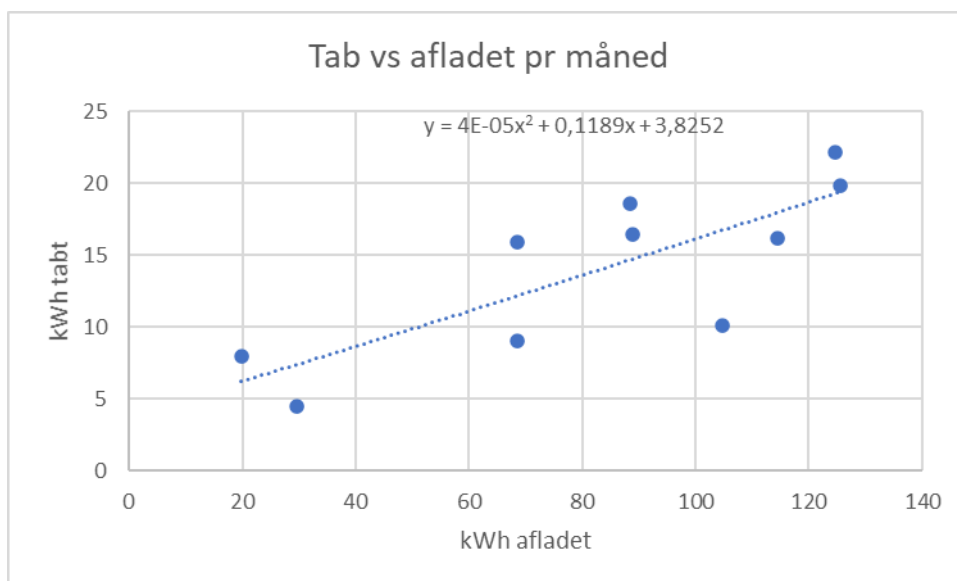
	TO- TAL	BAT	KONV
JAN	0,84	0,94	0,89
FEB	0,86	0,96	0,90
MAR	0,86	0,94	0,91
APR(START)	0,87	0,96	0,90
MAJ	0,83	0,96	0,86
JUN	0,90	1,03	0,88
JUL	0,79	0,89	0,88
AUG	0,81	0,97	0,84
SEP	0,80	0,96	0,83
OKT	0,82	0,97	0,84
NOV	0,83	0,92	0,91
DEC	0,87	0,99	0,88
ÅRET	0,84	0,96	0,87



En afbildning af det beregnede energitab som funktion af henholdsvis den månedligt opladede og afladede energi viser en klar sammenhæng, men med nogen spredning af data:



Figur 39 Sammenhæng mellem korrigeret energitab og månedlig opladning. Juni og december ej medregnet.



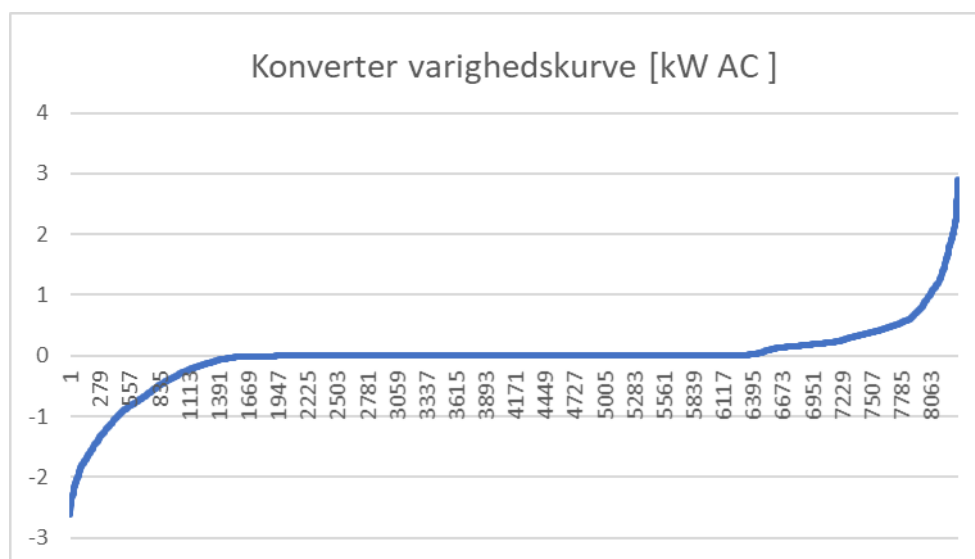
Figur 40 Sammenhæng mellem korrigeret energitab og månedlig afladning. Juni og december ej medregnet.



Spredningen af de månedlige værdier kan skyldes unøjagtigheder i SOC-beregningen, eventuelle driftsproblemer eller målefejl.

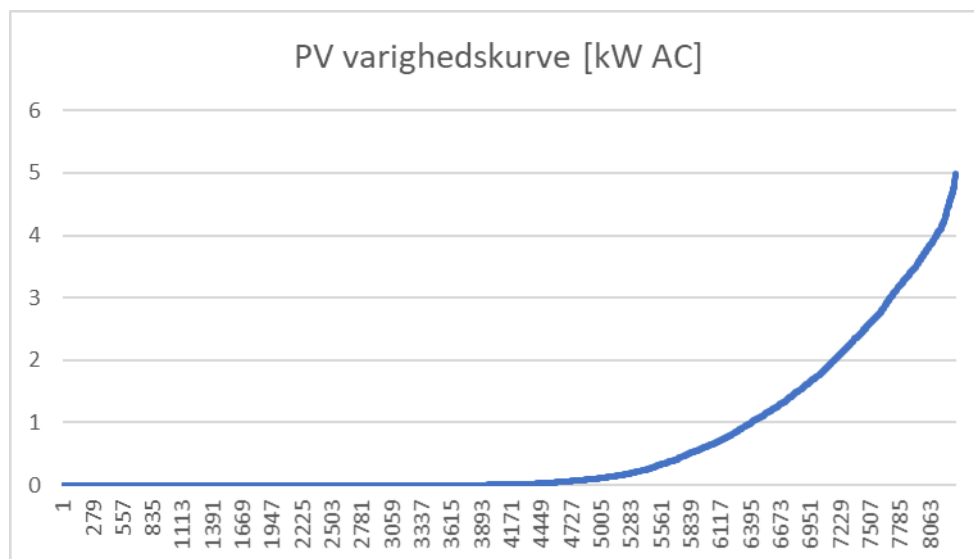
Det kan være nyttigt at se på effektfordelingen over hele måleperioden for de enkelte energistrømme, da det kan sige noget om belastningen, og hvor godt anlægget er dimensioneret. Hertil benyttes ofte varighedskurver, som viser dataserier sorteret efter effekt.

Varighedskurver for et års målinger:

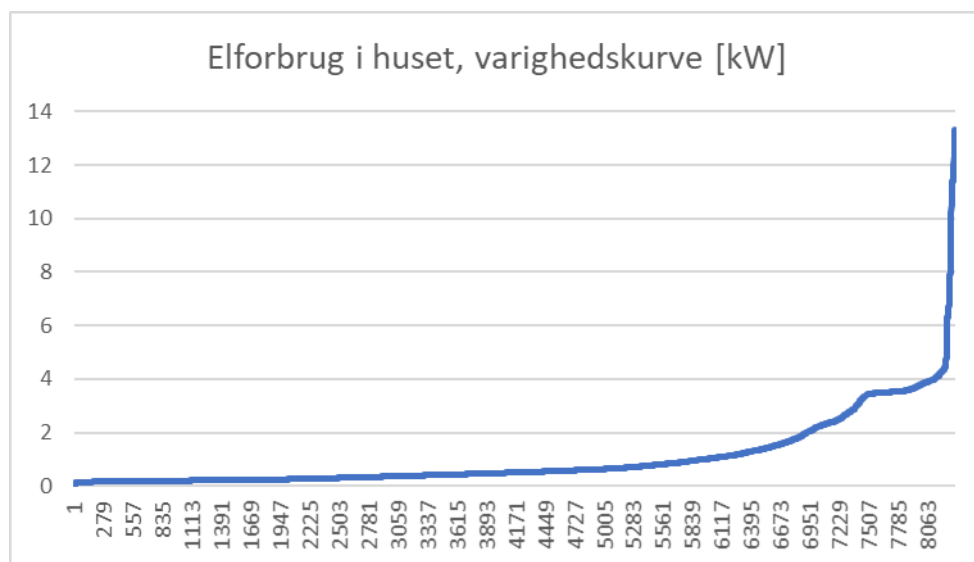


Figur 41 Konverter varighedskurve.

Fordelingen viser, at konverteren det meste af tiden er lukket ned. Niveauspringet til højre ved afladning til net viser, at der er et forbrug på cirka 150 W, når den aktiveres til at levere AC-energi til nettet. Effektgrænsen er ca. 3 kW ved afladning og 2,7 kW ved opladning. Dette er pga. batteripakkens strømbe-grænsning.



Figur 42 Solcelleanlægget er i drift alle lyse timer og ligger med en begrænsning på 5 kW til net. Middelværdi under drift er cirka 2 kW.



Figur 43 Husets elforbrug beregnet som residual energi. Med varmepumpe ville bundniveauet stige, men spidsen ville formentlig ikke gøre det. Langt det største forbrug ligger under det niveau, som batteriinverteren kan levere.

Figurerne viser, at det ikke er al solenergien, der kan gemmes – dels på grund af effektgrænsen, dels på grund af, at energiindholdet er begrænset til 4,5 kWh. Hvis-BESS systemet kunne håndtere en større opladeffekt, ville man kunne lagre og udnytte en større del af solcelleproduktionen. Afladningen er ikke så kritisk, da husets forbrug kun i kortere tid har højere effekttræk, end inverteren kan klare.



Parametre til batterimodel

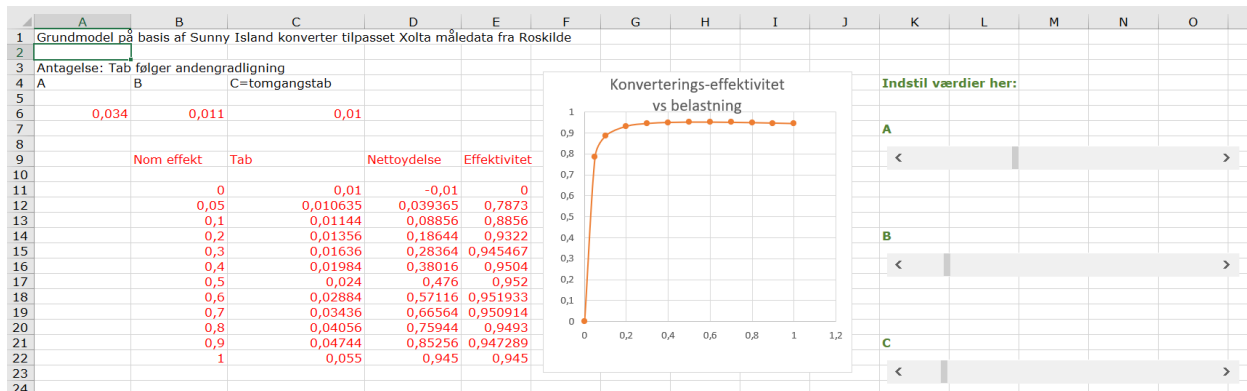
Til brug for modelleringen er disse input nødvendige:

- Maksimal effekt ved opladning
- Virkningsgrad for en ladecyklus (round trip efficiency AC-DC-AC)
- Maksimal effekt ved afladning
- Evt. tomgangstab og selvafladning over længere perioder
- Eventuel temperaturkorrektur af ovenstående.

Konverteringstabene kan tilnærmet beskrives med en andengradsligning, hvor parametrene tilpasses det aktuelle anlæg. Med kendte absolutte tab er det let at beregne virkningsgraden ved varierende belastning. Der er i projektet udarbejdet en Excel-model til dette formål.

Imidlertid viser målingerne fra Roskilde, at der er en næsten lineær sammenhæng mellem tilført og afgivet effekt, og man kan derfor med god tilnærmelse regne med konstante virkningsgrader. For det aktuelle BESS-anlæg gælder disse værdier:

- Maksimal effekt ved opladning 2,7 kW.
- Samlet virkningsgrad AC-DC-AC: ca. 84 %, se desuden nedenstående.
- Tomgangstab cirka 4 W (fra Figur 39 og Figur 40).
- Maksimal effekt ved afladning 3,0 kW.



Figur 44 Excel-model, som kan bruges til at trimme modelparametre til den mest retvisende sammenhæng mellem belastning og virkningsgrad – for eksempel ud fra laboratoriemålinger.

De tilpassede værdier for A, B og C, som passer med det målte tab, er i dette tilfælde beregnet som:

Opladning inkl. 2 % batteritab

- A 0,012
- B 0,0074
- C 0,004



Afladning (inverter) inkl. 2 % batteritab

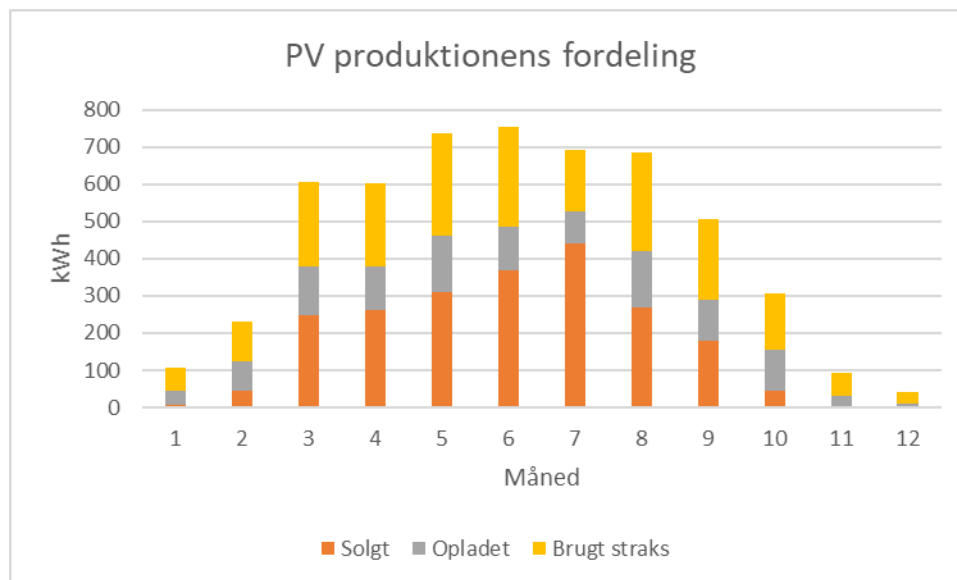
- A 0,0133
- B 0,0886
- C 0,0019

Energitabene i selve batteriet er fordelt ligeligt på oplade- og afladeprocessen.

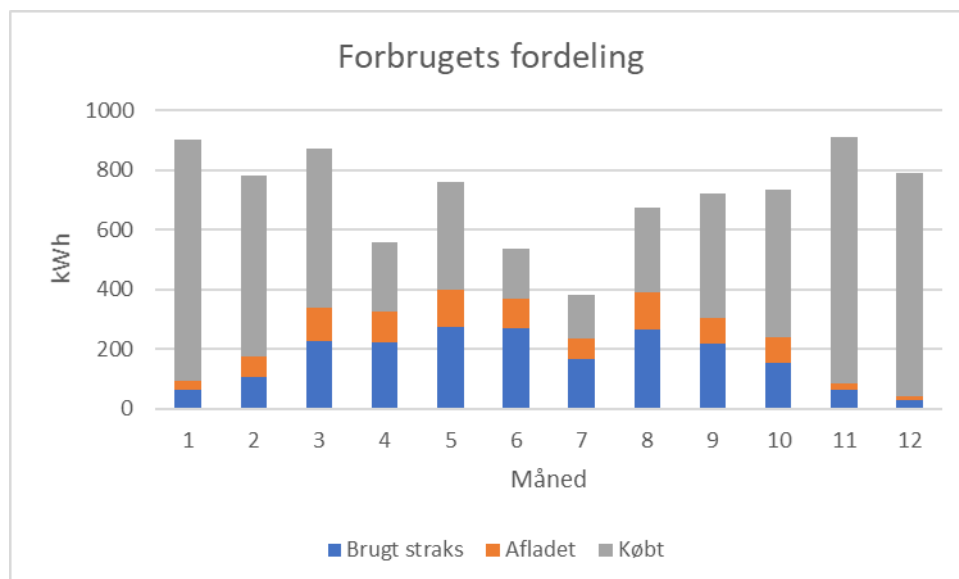
Sammenfatning

Data for et års samlede drift af BESS-anlægget viser en ydelse og effektivitet omtrent som forventet. Anlægget synes lidt underdimensioneret i forhold til den effekt, som solcelleanlægget kan producere, men veldimensioneret i forhold til forbrugsmønsteret. En praktisk forklaring er, at anlægget er enfaset og dermed højst kan være på 3,6 kW, men der er også en sikkerhedsgrænse på 70A i batteripakken, som reducerer opladehastigheden. En detailanalyse af energitabene viser tydeligt, at de største tab finder sted i DC-/AC-konverteringen, mens tabene i selve batteriet er små – omkring 4 %. Effektiviteten er næsten uændret over hele driftsområdet, selv ved lav belastning, hvilket tyder på et beskedent egetforbrug.

Energibalance og økonomi



Figur 45 PV-anlæggets produktion fordelt på måleperioden.



Figur 46 Forbrugets kilder fordelt på måleperioden.

Tabel 7 Afbildede værdier samt sum for hele året

Måned	Produceret	Solgt	Opladet	Brugt straks	Afladet	Købt	Forbrug
1	108	8	35	64	30	808	902
2	231	44	80	108	69	604	780
3	605	247	134	225	115	532	872
4	603	262	117	223	105	231	559
5	737	311	151	275	125	361	761
6	755	370	116	269	101	168	538
7	692	440	86	166	68	149	383
8	684	270	150	264	125	287	676
9	506	178	111	217	88	414	720
10	308	46	109	152	89	492	734
11	94	2	29	64	20	826	910
12	40	0	9	31	12	748	791
SUM kWh	5364	2178	1127	2059	946	5620	8626



4.4. Testrig på Teknologisk Institut

På Teknologisk Institut er den tidligere byggede testrig fra det foregående Opsys projekt blevet ombygget til at kunne foretage en endnu mere detaljeret virkelighedstro genskabelse af de dynamikker, som ses i et virkeligt hus med tilfældig påvirkning fra beboere.

4.4.1. Kort beskrivelse af testrig

På Figur 47 kan testriggen på teknologisk institut ses, fra højre mod venstre er det først varmepumpen i det store hvide metal kabinet, i midtersektionen ses gulvvarme manifold og alle tilhørende flowmålere, temperaturmålere, pladevekslere, og ventiler. Det orange pvc rør indeholder en elvarmestav som agerer jordvarmekilde. I det tredje fag er der både en kølebuffer og en varmebuffer, samt en lille hylde til test pc. På den bagerste ende af testriggen sidder elkabinettet hvor hele Trend styresystemet, Neogrid boksen, router og al kabelsamling er foretaget.

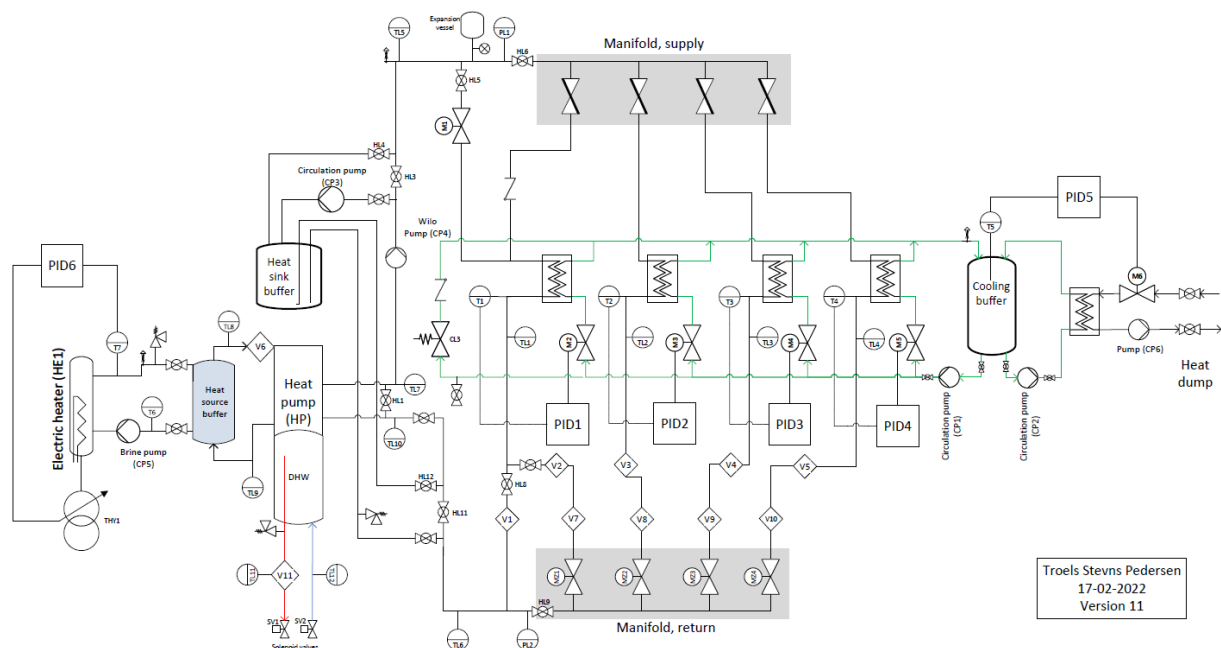


Figur 47 - Testrigger på Teknologisk Institut

På nedenstående Figur 48 kan PI-diagrammet over testriggeren ses. I venstre side er varmelegemet som agerer jordvarme kilde til varmepumpen. Efter jordvarmekilden kommer varmepumpen som indeholder en beholder til varmt brugsvand og tilhørende aftapningsordning med målere til aftappet energimængder. Når der ikke produceres varmt brugsvand, holder varmepumpen hele gulvvarmesystemet varmt via to gulvvarme manifolde der forbinder til individuelle varmevekslere for at repræsentere hver deres rum. Hvert rums voksventil/telestat styres af det simulerede varmebehov via computeren. På sekundærsiden



af vekslerne der repræsenterer de fire rum, er der tilsluttet køling fra instituttets køleanlæg, som sikrer at den ønskede mængde energi fjernes fra systemet.



Figur 48 – PI-diagram over testriggen.

4.4.2. Udfordringer på testriggen

Nogen af de udfordringer der er værd at nævne, er at der har været en defekt 3-vejs ventil på varmepumpen samt NTC sensor målinger på styrboksen ikke blev omregnet rigtigt. Begge ting som trods deres enkelthed til dels har været svære at opdage men også at få dem rettet, da de er i direkte kontakt med varmekredsens væske.

4.4.3. Forsøg med batteristyring/elektrisk system

Testriggen er udbygget med solceller og batteri, og begge dele er simuleret numerisk på test riggen. For at simulere batteriet har der været behov for at lave en elektricitets-manager der har styr på hvad der sker i husets elinstallation i det pågældende tidspunkt, og de næste 24 timer.

Huset har et forud kendt elforbrug som bidrager til varmebalancen i husmodellen time for time, og også kan benyttes til denne elektricitets manager. Dog kan man ikke forudse et hus' elforbrug 24 timer frem eksakt, derfor er de kendte elforbrugs data justeret med tilfældig korrektion med op til +/- 33% støj i alle timer.

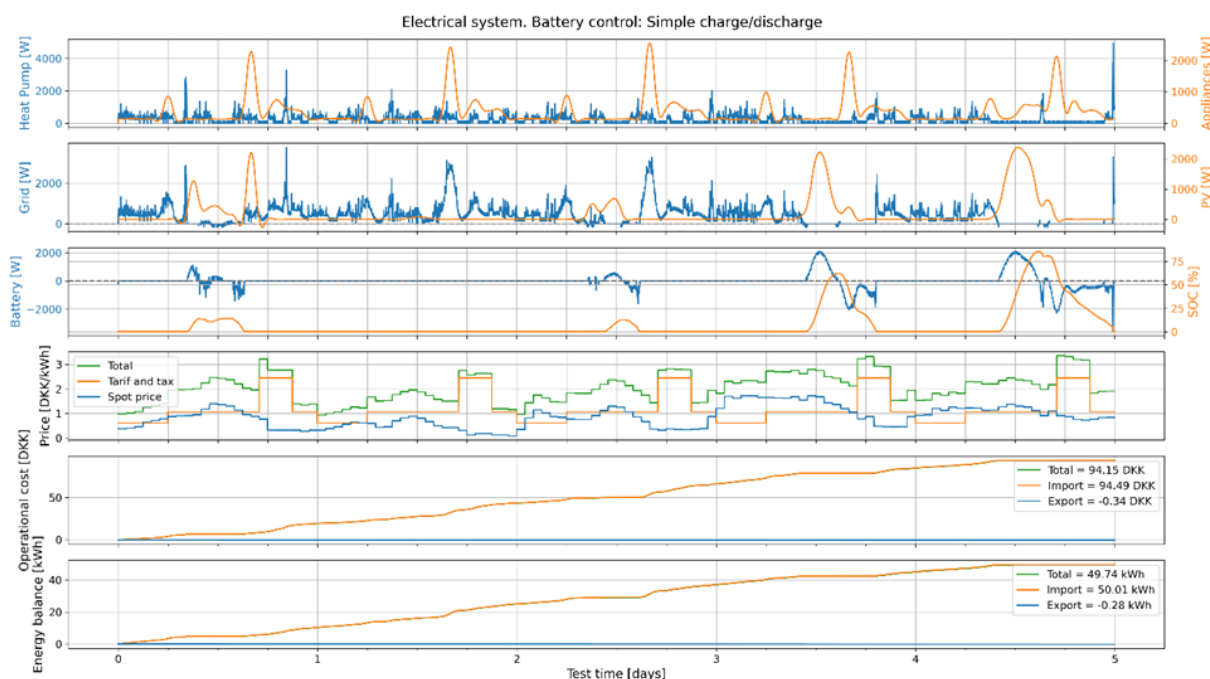


Tilsvarende metode er benyttet for solcelleproduktionen, da der er benyttet DRY vejrdata kender vi vejret og mere specifikt indstrålingen de næste timer, men for at gøre det mere realistisk er der igen lavet en justering med +-33% støj for fremtidige time værdier som giver noget uforudset.

Varmepumpens elforbrug kendes ikke forud på testriggeren, så det er altså en uforudset størrelse som der tages højde for i det eksakte tidspunkt.

Sidste input er spotpris og (net)tarif som sætter rammerne for at prisoptimere ud fra driftsomkostninger til køb af strøm fra elnettet og salg af strøm fra solcellerne.

For 5 dages vinterkørsel er nedenstående resultater fået fra målinger på testriggeren. I den første figur er der benyttet en simpel batteristyring som regulerer som den største del af batteriinvertorer i dag. De ser på øjeblikbilledet og oplader/afleder ud fra dette. Hvis der er overskud af solcelle strøm som ikke benyttes og deraf skal sælges til elnettet, så vælges der at oplade. Omvendt hvis der er behov for at købe strøm fra elnettet og vi har strøm til rådighed på batteriet, så vælger styringen at aflade den manglende mængde fra batteriet:

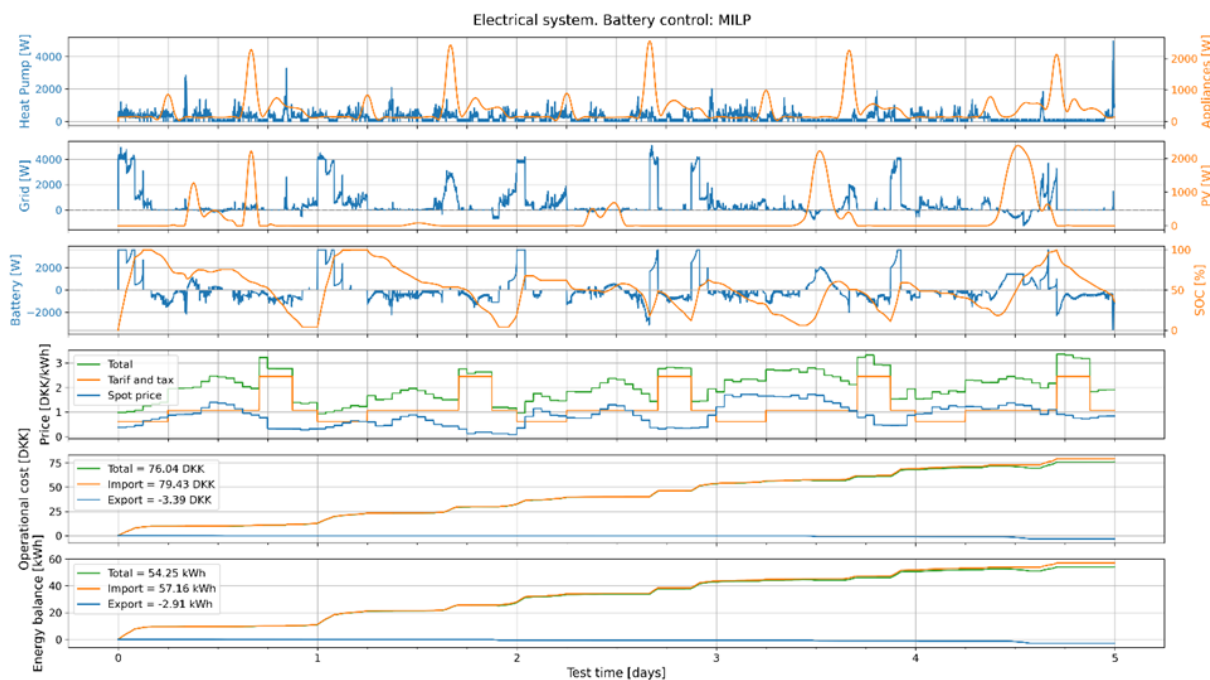


Figur 49 - Batteri controller, simpel oplad/aflad styring

Den mere avancerede controller benytter en metode der hedder Mixed-Integer Linear Problem, hvor styringen får nuværende værdier og forecast værdier for de næste 24 timer, hvorved algoritmen går ind og ser på, hvordan styringen skal agere nu og de næste 24 timer, for at dække husets elforbrug billigst muligt. Kort fortalt, så går batteristyringen ind og ser hvornår batteriet kan benyttes til at lagre strøm fra



solceller eller billigt fra elnettet og så fortrænge så meget som muligt fra de dyre timer. Når denne styring benyttes, opnås følgende resultat:



Figur 50 - Batteri controller, avanceret MILP styring

Det er tydeligt at se, at batteriet benyttes langt mere dynamisk med MILP styringen i forhold til simpel standard styring. Når der ses direkte på operationsprisen imellem de to eksempler, så er der potentiale for 20% pris optimering. Dette skal dog holdes op i lyset af, at batterier bliver lidt mere slidt for hver opladnings- og afladningscyklus, så på trods af denne store procentlige besparelse, så går det altså ud over batteriets levetid, som der ikke tages højde for. Det generelle billede, som ses fra den avancerede styring er, at den dyre strøm i spidsbelastningsperioden imellem 17-21 på alle dage skal dækkes i størst mulig grad af strøm fra batteriet, som enten kan komme fra solcelleproduktion i løbet af dagen, eller fra billig strøm om natten såfremt forecasten fortæller styringen, at der ikke kommer til at være meget solcelleproduktion i den efterfølgende periode.



5. Henvisninger

Hovedrapport

Appendix 2: Publikationer og videnformidling

Appendix 3: Overview of the TI testrig



TEKNOLOGISK
INSTITUT