

Utvikling av algoritmer for automatisk effektkontroll i bolig

Hanna Tysse Land Skulstad

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2018

Hovedveileder: Eilif Hugo Hansen, IEL

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk

NORGES TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET

NTNU



MASTEROPPGAVE

Kandidatens navn : Hanna Tysseland Skulstad
Emne : TET4900 Elektrisk energiteknikk og smarte nett, masteroppgave
Oppgavens tittel (norsk) : **Utvikling av algoritmer for automatisk effektkontroll i bolig**
Oppgavens tittel (engelsk) : Development of algorithms for automatic power control in residential buildings
Oppgavens tekst : Begrensning i tilgjengelig effekt er blitt en stor utfordring for norsk elektrisitetsforsyning. Dette gjelder på flere nivå i nettet, og løsningen kan være å prise effekt slik at sluttbrukerne selv i stor grad bidrar til å redusere effektoppene.

Firmaet Sikom gjennomfører et forskingsprosjekt der målet er å utvikle et totalkonsept med gode metoder og systemer for effekt-kontroll i norske/nordiske boliger og hytter, hvor systemet til enhver tid sørger for at maksimaleffekten (W) holdes under en definert grense, ved intelligent ut- og innkobling av ulike laster. Dette skal gjøres på en måte som gjør at brukerne som hovedregel ikke skal oppleve redusert komfort ved løsningen.

Det skal særlig vektlegges at systemet skal fungere godt i Norge: Kaldt og vindfullt klima, generelt lave kraftpriser, mange ulike varmekilder anvendt i samme bolig, men med stor grad av elektrisk direkteoppvarming, boligens art/materiale med mye bruk av tre, bruksmønster, stort antall el-biler, stor andel hytter med høy komfort etc.

Kandidaten skal

- utvikle og teste metoder og algoritmer for effektkontroll i bolig
- vurdere nytteverdien for bruker, opp mot mulige reduksjoner av komfort for brukeren

Oppgavens gitt : 22.01.18
Besvarelsen leveres innen : 26.06.18
Besvarelsen levert :
Utført ved (institusjon, bedrift) :
Kandidatens veileder : Eilif H. Hansen, NTNU

Trondheim, 22.01.18



faglærer

Forord

Denne oppgaven utgjør vurderingsgrunnlaget i emnet TET 4900 *Elektrisk energiteknikk og smarte nett, masteroppgave* ved institutt for elkraftteknikk på NTNU Gløshaugen. Et forstudie til masteroppgaven ble gjort høsten 2017 i faget TET 4520 *Elektrisk energiteknikk og smarte nett, fordypningsprosjekt*, med tittelen ”Tiltak for reduksjon av effekttopper i bolig”.

I denne oppgaven er det utviklet en algoritme for automatisk effektkontroll som har blitt testet i smarthuslaboratoriet ved NTNU. Arbeidet er et bidrag til innovasjonsprosjektet ”Utvikling av metoder og system for automatisk effektkontroll i bolig”, et initiativ fra selskapet Sikom AS, som leverer smarthusløsninger til norske boliger. De er spesielt kjent for sitt konsept *Ring hytta varm*.

På grunn av store forsinkelser med ferdigstillingen av laboratoriet var det ikke mulig å begynne med testing av algoritmen før i slutten av mai. Det pågår fortsatt arbeid i smarthuset og rommene rundt, noe som har påvirket de simleringene som ble gjort og hvor mange som var mulige å gjennomføre innenfor oppgavens tidsramme.

Det rettes stor takk til veileder Eilif Hugo Hansen for hjelp med lure løsninger i smarthuset så det ble klart til testing, tilbakemeldinger på oppgaven, og gode innspill underveis. For bistand med testoppsett i startfasen og klargjøring av smarthuset, rettes det også takk til de ansatte ved servicelaben, spesielt amanuensis Anders Gytri og avdelingsingeniør Bård Almås. Takk til Espen Lorentzen ved Schneider Electric og Lars Ursin-Holm ved function Solutions for tålmodighet og hjelp i en kritisk fase av arbeidet. Det rettes takk til Giacomo Pesci for hjelp med gjennomføring av simuleringer. Til slutt rettes en stor takk til Sikom, spesielt Henrik Trandem, for å ha delt kunnskap og ideer om temaet, og for gode diskusjoner om problemer og forbedringsmuligheter ved algoritmen.

Trondheim, 2018-06-26



Hanna Tysseland Skulstad

Sammendrag

Innen 2019 skal utrulling av AMS-målere til norske hjem være ferdigstilt. De smarte målerne sender detaljert informasjon om husholdningenes energi- og effektforbruk til nettselskapene. Dette muliggjør innføringen av en nettleiemodell hvor også effekt prises. NVE har annonsert at en effektbasert nettleie vil innføres i starten av 2021. Den nye effekttariffen skal fungere som et insentiv til reduksjon av effekttopper på forbrukersiden.

Selskapet Sikom, en norsk leverandør av smarthusløsninger, ønsker å utvikle et system som reduserer effekttopper for å imøtekomme de nye tariffene. Som et bidrag til prosjektet er det i denne oppgaven utviklet en algoritme for automatisk effektkontroll i bolig. Effekttopper reduseres ved å skru av varmtvannsbereder og varmelaster i prioritert rekkefølge. Algoritmen har blitt implementert i kontrolleren LM4, som en del av et digitalt styringssystem, hovedsaklig basert på grensesnittene KNX og MBUS. Styringssystemet har blitt installert i smarthuslaboratoriet på NTNU Gløshaugen, som er utformet lik en leilighet med kjøkken/stue, gang og bad. Et fiktivt forbruksscenario er utviklet og brukt som basis for å teste algoritmens funksjonalitet. Hensikten har vært å vurdere nytteverdi for forbrukeren opp mot eventuell reduksjon i komfort.

Basert på simuleringer i smarthuslaboratoriet der ulike effektgrenser har blitt testet, kan følgende resultater trekkes frem:

- Reduksjonspotensialet for effekttoper er lik den totale effekten til de fleksible lastene, som i smarthuset førte til en reduksjon på 30 til 46 % for alle simuleringene.
- Algoritmen antas å ikke gi store konsekvenser for komforten så lenge effektgrensen ikke settes for lavt. Det er knyttet mye usikkerhet til resultatene, så testing hos pilotkunder bør gjennomføres for å få et større resultatgrunnlag med forskjellige effektprofiler, og tilbakemelding på opplevd komfort fra forbrukerne.
- Kortvarige topper algoritmen ikke klarer å kutte, som følge av høy ikke-fleksibel belastning, ser ikke ut til å gi merkbare utslag på nettleien.
- Tariffmodellen *abonnert effekt* førte til en reduksjon på over 30% for de testede effektgrensene. *Time-of-use* og dagens tariff ga liten endring i den beregnede nettleien.

Abstract

By 2019, smart energy meters will be installed in Norwegian homes. The meters transmit detailed information about energy and power use to the distribution system operators. This makes it possible to introduce an electricity tariff where power is valued in addition to energy. The Norwegian Water Resources and Energy Directorate has announced that a power based electricity pricing will be introduced in the beginning of 2021. The new price model is an incentive to reduce power peaks by demand side management.

This thesis is part of an innovation project initiated by the Norwegian smart home supplier Sikom AS, aiming to develop methods and systems for automated home energy management. The scope of the thesis has been the development of an algorithm for automated power control in residential buildings, in order to evaluate the relationship between customer benefit and the possible reduction of comfort levels. The algorithm has been implemented in the controller LM4, which is part of a digital control system based on KNX and MBUS. Power peaks are reduced by switching off a water heater and electrical loads for room heating, in accordance to preset load priorities. The installation of the system and testing of the algorithm has been carried out in the smart home laboratory at NTNU Gløshaugen.

Based on the simulations of a fictional user scenario, the following results are highlighted:

- The potential power peak reduction equals the total rated power of the flexible loads. In the smart home laboratory a reduction of 30 to 46 % was obtained.
- Comfort level violations are assumed to be small as long as the power limit is not set too low. There is a lot of uncertainty linked to the results, so further testing in the homes of customers is recommended, in order to introduce more power consumption profiles, and gain feedback on consumer satisfaction.
- Power peaks, which the algorithm does not manage to keep below the desired limit, tend to be short-lived and does not seem to give a contribution to the total cost.
- An electricity tariff with a set power limit resulted in a cost reduction of more than 30% for all the simulated scenarios. *Time-of-use* and the current tariff gave negligible reductions.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	ii
Abstract	iv
1 Introduksjon	1
2 Tariffer for beregning av nettleie	3
2.1 Energibasert tariff	4
2.2 Abonnert effekt	4
2.3 Time-of-use	4
2.4 AMS-målere	5
3 Termisk inneklima	7
3.1 Termisk komfort	8
3.1.1 Evaluering av termisk inneklima	8
3.1.2 Lufttemperatur	9
4 Laster i norske husholdninger	11
4.1 Fleksibilitet	14
4.1.1 Varmekapasitet	14
4.1.2 Klassifisering av laster	15
4.2 Termostatstyring	16
4.3 Panelovn	18
4.4 Varmekabler	18

4.5	Varmefolie	19
4.6	Varmtvannsbereder	20
4.6.1	Anbefalinger og krav til driftsforhold	21
4.7	Ikke-fleksible laster	22
5	Nytteverdi av effektreduksjon for forbruker	23
5.1	Lønnsomhetsberegninger	24
5.2	Beregningsgrunnlag	25
6	Smarthuslaboratoriet	27
6.1	Bygningsstruktur	28
6.1.1	Temperatursoner	29
6.1.2	Kursinndeling	30
6.2	Styringssystem	30
6.2.1	Logisk struktur	30
6.2.2	Fysisk struktur	32
6.2.3	Komponenter	33
6.3	Laster	35
6.3.1	Fleksible laster	36
6.3.2	Ikke-fleksible laster	37
7	Algoritme	39
7.1	Tidligere arbeid	40
7.2	Ønsket funksjonalitet for effektkontrollalgoritme	42
7.3	Valg av metode for effektkontroll	43
7.3.1	Tilpasninger til norske forhold	44
7.3.2	Forbedringer	45
7.4	Algoritme for styring av laster	47
7.4.1	Parametere	47
7.4.2	Overordnet flytskjema	49
7.4.3	Forespørsel om redusert effekt	50
7.4.4	Forespørsel om å skru på varmelaster	50

7.4.5	Forespørsel om å skru på varmtvannsbereder	50
7.5	Effektkontrollalgoritme	53
7.5.1	Betingelser for å skru av laster	55
7.5.2	Utfall av algoritmen	56
7.6	Planlagte hendelser	57
7.6.1	Natt- og dagsenking	57
7.6.2	Styring før perioder med høy belastning	57
8	Testscenarier	59
8.1	Temperaturforhold	60
8.1.1	Bruk av varmepumpe for å simulere effektbehov en vinterdag	60
8.1.2	Komforttemperatur	60
8.2	Basisscenario	61
8.2.1	Bruksprofil for ikke-fleksible laster	62
8.2.2	Sparemodus	63
8.3	Testscenarier	64
9	Resultater	65
9.1	Målerresultater	66
9.1.1	Basisscenario	67
9.1.2	Scenario 1	69
9.1.3	Scenario 2	71
9.1.4	Scenario 3	73
9.1.5	Scenario 4	75
9.1.6	Scenario 5	77
9.1.7	Scenario 6	79
9.1.8	Scenario 7	81
9.2	Reduksjon av energi og maksimal effekt med dagsenking	83
9.3	Reduksjon av energi og maksimal effekt uten dagsenking	84
9.4	Besparingspotensiale	86
9.4.1	Tilbakebetalingstid	87

10 Diskusjon	89
10.1 Nytteverdi forbruker	90
10.1.1 Økonomiske besparelser	90
10.1.2 Bedre oversikt over eget forbruk	90
10.1.3 Nytteverdi for ulike boligtyper	91
10.2 Komfortbetingelser	92
10.3 Reduksjon av effekttopper	93
10.4 Energiforbruk	94
10.5 Vurdering av algoritmens funksjonalitet	95
10.5.1 Problematikk med lav temperatur	95
10.5.2 Forvarming av rom	95
10.5.3 Registrering av tidspunkt for oppvarmet vann	96
10.5.4 Personvern	97
10.6 Andre bruksområder for algoritmen	97
10.7 Videre arbeid	98
11 Konklusjon	101
A Komponenter og laster i Smarthuset	103
B Algoritme	105
B.1 Deklarering	105
B.1.1 Konstanter	105
B.1.2 Variable	106
B.2 Funksjoner	107
B.3 Effektkontrollalgoritme	112
B.4 Forespørsel om å skru på laster	114
B.4.1 Varmelaster	114
B.4.2 Varmtvannsbereder	114
Bibliografi	116

Figurer

3.1	En matematisk sammenheng mellom PMV og PPD, utviklet basert på studier. Figur hentet fra [1].	9
3.2	Optimal operativ temperatur gitt bekledding (clo) og aktivitetsnivå (met). De svarte linjene representerer PMV lik 0 for en gitt temperatur. De blå og hvite feltene viser grenseverdiene for anbefalt temperaturavvik, slik at $PMV \pm 0.5$ tilfredsstillles. Figur hentet fra [1].	10
4.1	Lastprofil og temperatur for en typisk husholdningskunde. Data er hentet fra en generisk årsprofil i 2015 med timesverdier for temperatur og effekt, fra SINTEF. . .	12
4.2	Forbrukslaster installert hos Sikom sine kunder. Data er basert på resultatene av en spørreundersøkelse blant Sikom sine kunder, besvart av 303 brukere.	13
4.3	Typisk lastprofil for en termostatstyrt varmelast. Basert på målinger i smarthuslaboratoriet og [2].	17
4.4	Typisk effektprofil for en varmtvannsbereder. Basert på målinger i smarthuslaboratoriet og [2].	20
6.1	Oversiktsbilde av Gløshaugen. Den røde sirkelen markerer Smarthusets plassering. Utsnitt fra kartprogrammet MazeMap.	28
6.2	Plantegning av Smarthuset.	28
6.3	Temperatursoner i og utenfor smarthuset	29
6.4	Logisk struktur for styringssystemet	31
6.5	Kontrolleren Logic Machine 4. Bilde fra [3].	33

6.6	Schneider REG-K/8x230/16. Relémodul for kontroll av de fleksible lastene. Bilde fra [4].	33
6.7	Schenider Electric, temperatursensor MTN6005-0001. Bilde fra [5].	34
6.8	GIRA Stetigregler, KNX temperaturregulator. Bilde fra [6].	34
6.9	Schneider Electric, energimåler A9MEM3135. Bilde fra [7].	34
6.10	Plassering av fleksible og ikke-fleksible laster i smarthuset	35
7.1	Overordnet flytskjema for systemet i [8], der WH er varmtvannsbereder, AC er air-condition, CD er tørketrommel og EV er elbil.	44
7.2	Effektkontrollalgoritmen i [8].	44
7.3	Overordnet flytskjema for styringsalgoritme	49
7.4	Tidsintervaller for bestemmelse av varmtvannsberederens prioritet og bryterstatus	51
7.5	Flytskjema for effektkontrollalgoritmen. Antall laster og prioritet er variable som kan endres etter behov. Figuren viser systemet som er benyttet til simuleringer i smarthuslaboratoriet der de valgte prioritetene er som følger: $vf_{kj} = 1$, $po = 2$, $vf_{gang} = 3$, $vk = 4$, $vb = 5$	54
8.1	Basisscenario, hendelser for de ikke-fleksible lastene.	62
8.2	Tidspunktene når varmelastene er i sparemodus illustreres av de grønne feltene. De vertikale linjene viser når bryteren til varmtvannsberederen skrur seg på.	63
9.1	Resultater basisscenario	68
9.2	Resultater scenario 1	70
9.3	Resultater scenario 2	72
9.4	Resultater scenario 3	74
9.5	Resultater scenario 4	76
9.6	Resultater scenario 5	78
9.7	Resultater scenario 6	80
9.8	Resultater scenario 7	82
9.9	Reduksjon i energi og effekt sammenlignet med basisscenariet.	83
9.10	Reduksjon i energi og effekt sammenlignet med scenario 5 (effektgrense på 10 kW uten dagsenking).	84

9.11 Sammenligning av totalt energiforbruk (kWh) med og uten dagsenking for effekt- grensene 10kW, 5kW og 4,5 kW.	85
9.12 Reduksjon i nettleie sammenlignet med basisscenariet for de forskjellige effekt- grensene og tariffene	86

Tabeller

2.1	Tilgjengelig informasjon fra HAN-porten. Verdier fra [9].	5
3.1	Skala for vurdering av termisk inneklime, som beskrevet i [1].	8
3.2	Stoffskifte ved ulike aktivitetsnivåer. Verdier fra [10].	10
3.3	Isolasjonsverdi for ulike typer bekledning. Verdier fra [10].	10
4.1	Spesifikk varmekapasitet og tetthet. Verdier fra [10].	15
4.2	Eksempler på husholdningsapparater og tilhørende effekt. Verdiene er hentet fra en liste med gjennomsnittlig effektforbruk for elektriske apparater, fra hjemmesidene til Haugaland Kraft [11].	22
5.1	Kostnadsanslag for nettonåverdiberegninger basert på informasjon fra Sikom [12].	25
5.2	Eksempeltariffer for beregning av nettleie, hentet fra [13].	26
6.1	Nominell effekt for de fleksible lastene i Smarthuset.	36
6.2	Nominell effekt for de ikke-fleksible lastene i Smarthuset.	37
7.1	Konstanter i styringssystemet.	47
7.2	Konstanter definert for alle de styrbare lastene i systemet.	47
7.3	Tilstandsvariable i systemet.	48
8.1	Kalender for beboerne i Smarthuset.	63
8.2	Scenariene som har blitt testet i Smarthuset.	64
8.3	Valgt prioritering for de fleksible lastene i testscenariene.	64
8.4	Parametere benyttet i testscenariene.	64

9.1	Målt energi og effektforbruk i basisscenariet.	67
9.2	Månedlig nettleie for P_{abb} lik 10 kW.	67
9.3	Målt energi og effekt i scenario 1.	69
9.4	Månedlig nettleie for P_{abb} lik 6000W.	69
9.5	Målt energi og effekt i scenario 2.	71
9.6	Månedlig nettleie for P_{abb} lik 5500W.	71
9.7	Målt energi og effekt i scenario 3.	73
9.8	Månedlig nettleie for P_{abb} lik 4500W.	73
9.9	Målt energi og effekt i scenario 4.	75
9.10	Månedlig nettleie for P_{abb} lik 3500W.	75
9.11	Målt energi og effekt i scenario 5.	77
9.12	Månedlig nettleie for P_{abb} lik 10000 W, uten dagsenking.	77
9.13	Målt energi og effekt i scenario 6.	79
9.14	Månedlig nettleie for P_{abb} lik 5500 W, uten dagsenking.	79
9.15	Målt energi og effekt i scenario 7.	81
9.16	Månedlig nettleie for P_{abb} lik 4500W, uten dagsenking.	81
9.17	Tilbakebetalingstid for effektkontrollsystemet, beregnet ved metoden for diskon- tert tilbakebetalingstid forklart i kapittel 5.1.	87
A.1	Komponenter i testoppsettet	103

Kapittel 1

Introduksjon

Innen starten av 2019 skal smarte energimålere (AMS-målere) være installert i norske husholdninger. De lagrer informasjon om effektforbruk, energi og feil i systemet, som sendes automatisk til nettselskapet. Dette åpner opp for en ny nettleiemodell, hvor også effekt prises. På den måten håper nettselskapene å gi forbrukerne intensiv til å redusere effekttopper i eget forbruk.

Et av problemene med effekttariff er i følge NVE en manglende forståelse av begrepene effekt og energi [14]. Dersom forbrukerne skal regulere forbruket sitt manuelt, krever det motivasjon for å endre vaner, og god kommunikasjon fra nettselskapene. En løsning er å benytte systemer for automatisk kontroll av husholdningslaster. I følge en rapport utført av VaasaETT for NVE [15] om potensialet ved automasjon i norske hjem, kan automatisk styring redusere effekttopper med rundt 24% mot 9% ved manuell kontroll. På den måten kan strømforbruket tilpasses tariffene, slik at forbrukeren svarer bedre på nettselskapenes intensiver, i tillegg til å spare penger selv.

For øyeblikket finnes det ingen kommersielle smarthusløsninger med automatisk effektkontroll på det norske markedet. Selskapet Sikom kjent for sitt konsept *Ring hytta varm*, er en av aktørene som ønsker å utvikle et automatisk styringssystem. De har tatt initiativ til innovasjonsprosjektet ”Utvikling av metoder og system for automatisk effektkontroll i bolig”, som denne oppgaven er en del av.

Hovedformålet med oppgaven er å utvikle en algoritme for automatisk effektkontroll i bolig som er tilpasset norske husholdninger og elektrisitetstariffer. Algoritmens funksjonalitet skal deretter testes for å vurdere nytteverdi for brukeren opp mot mulig reduksjon av komfort.

Kapittel 2

Tariffer for beregning av nettleie

NVE planlegger å innføre tariffing av effekt fra og med 1. januar 2021. I den forbindelse har forskjellige avregningsmodeller blitt utredet i flere høringsrunder. NVE anonserte i 2017 at de ønsker å innføre *abonnert effekt* [13]. Høringen med det nye forslaget, som ble publisert i november, har ført til store reaksjoner fra bransjen. Aktører som Hafslund Nett og Energi Norge støtter ikke valget av modell [16]. I sitt høringssvar, tar Hafslund Nett til orde for å innføre en variant av *Time-of-use* istedenfor, som de mener vil være lettere å formidle til kundene [17]. På bakgrunn av den store motstanden mot abonnert effekt, sa Per Sanderud under bransjens årlige vinterkonferanse i Brussel, at NVE nå er i tenkeboksen [18]. Effekttariff kommer, men hvilken modell som velges er enda ikke avklart.

I dette kapitlet presenteres kort

- dagens energibaserte tariffmodell
- abonnert effekt
- time-of-use
- informasjon som blir tilgjengelig fra AMS-målerne

2.1 Energibasert tariff

Dagens nettleie består av et fastledd og et energiledd, som beskrevet i ligning 2.1. Fastleddet er en årlig kostnad (kr/år) som skal dekke kostnader i nettet som ikke skyldes kundens løpende strømforbruk, blant annet investeringer. Kostnaden er årlig og varierer mellom områder og kundetype avhengig av forhold i nettet. Energileddet skal dekke kostnader som er knyttet til kundens energiforbruk, og beregnes i kr/kWh. [13] [19]

$$\text{Nettleie} = \text{Fastledd} + \text{Energiledd} \quad (2.1)$$

2.2 Abonnert effekt

Tariffen *abonnert effekt* består av et fastledd, et energiledd, en abonnementsgrense for effekt og et overforbruksledd som beskrevet i ligning 2.2. Abonnementet er en fastsatt grense basert på kundens historiske forbruk, og kan anbefales av nettselskapet. Grensen har enheten kr/(kWh/h) per år, som vil si at den baseres på effektforbruket over en time. Dersom forbrukeren overstiger abonnementet må den betale en kostnad for overforbruk gitt av overforbruksleddet med enhet kr/(kWh/h). Fastleddet og leddet for overforbruk kan tidsdifferansieres avhengig av forhold i nettet. [13]

$$\text{Nettleie} = \text{Fastledd} + \text{Abonnement} + \text{Energiledd} + \text{Overforbruksledd} \quad (2.2)$$

2.3 Time-of-use

Modellen *time-of-use* består av et fastledd og et energiledd, vist i ligning 2.3, på samme måte som dagens energibaserte tariff. Forskjellen er at nettselskapet kan variere energileddet i løpet av dagen og året, slik at perioder hvor det erfaringsmessig er høy belastning i nettet, er dyrere. På den måten vil kunden få et insentiv til å redusere energiforbruket i de utvalgte periodene. [13]

$$\text{Nettleie} = \text{Fastledd} + \text{Tidsavhengig energiledd} \quad (2.3)$$

2.4 AMS-målere

De smarte målerne registrerer effektforbruk og energi for hver enkelt bolig, og kan i tillegg bidra til rask detektering av feil. Data skal kunne lagres og sendes til nettselskapet minimum hvert 15. minutt. For at tredjepartsaktører eller forbrukeren selv skal få tilgang til og kunne benytte seg av den registrerte informasjonen, må alle målerene ha et standardisert og åpent grensesnitt. Dette gjøres i form av en *Home Automation Network* (HAN) port på måleren. Foreløpig standard for hvilke data som skal være tilgjengelig fra HAN-grensesnittet er vist i tabell 2.1. [9] [20] [21]

Tabell 2.1: Tilgjengelig informasjon fra HAN-porten. Verdier fra [9].

Frekvens = 2,5 sekunder
Aktiv effekt(kW) (=import)
Frekvens = 10 sekunder
OBIS liste versjon, Måler ID og målertype
Aktiv effekt (kW) x 2 (= import og eksport)
Reaktiv effekt (kVAr) x 2
Strøm (A) x 3 (L1, L2 og L3)
Spenning (V) x 3 (alle faser)
Frekvens = 1 time
Aktiv energi (kWh) x 2 (= import og eksport)
Reaktiv energi (kVArh) x 2
Klokke og dato

Kapittel 3

Termisk inneklima

Når et automatisk styresystem skal evalueres er det ikke nok å se på endring av forbrukt effekt og energi. Dersom laster i perioder skrus av for å redusere effekt kan det få konsekvenser for temperaturen inne. I hvilken grad det går utover brukerens komfort er avgjørende for kundetilfredshet og produktets suksess. Det er individuelt hvordan brukere reagerer på eventuelle temperaturendringer, men det finnes verktøy for å anslå temperaturer som er akseptable for de fleste.

I dette kapitlet presenteres følgende

- en definisjon av termisk komfort
- to indekser for evaluering av termiske inneklima
- optimal temperatur gitt bekledding og aktivitet

3.1 Termisk komfort

Termisk komfort er en følelse eller sinnstilstand hvor en person føler seg fullstendig tilfreds med de termiske omgivelsene. Det innebærer at hverken kroppen som helhet eller enkelte kroppsdeler føles for varme eller kalde. Følelsen av komfort avhenger av faktorer knyttet til personen selv, som for eksempel alder, kjønn, sult, trøtthet osv. Den påvirkes også av det termiske inneklimaet, som er definert av parametere knyttet til omgivelsene, i hovedsak temperatur, relativ luftfuktighet (trekk), varmestraling mellom flater og luftfuktighet. [1][10]

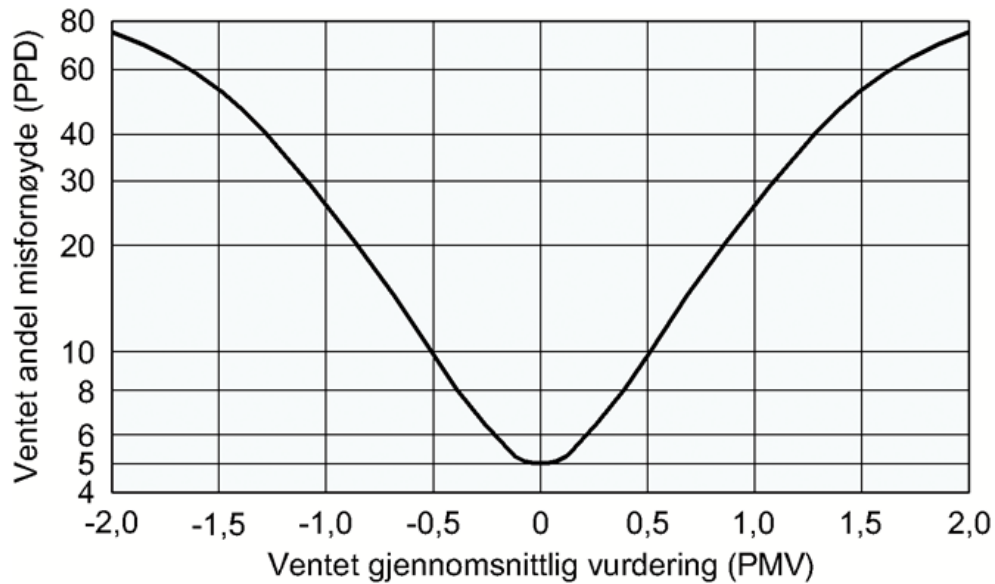
3.1.1 Evaluering av termisk inneklima

For å kunne forutse hvilke temperaturer som føles behagelige for et gitt termisk inneklima, er det utviklet to standardiserte indekser som anslår hvordan en tilfeldig gruppe mennesker vil oppleve de termiske omgivelsene. PMV (Predicted Mean Vote)- indeksen tar utgangspunkt i at termisk komfort er en nøytral tilstand, hvor det ikke er et ønske om høyere eller lavere temperatur. En skala med sju trinn, vist i tabell 3.1, brukes for å undersøke hva en person føler om sin egen termiske situasjon.

Tabell 3.1: Skala for vurdering av termisk inneklima, som beskrevet i [1].

Skala	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Vurdering	kaldt	kjølig	noe kjølig	nøytralt	noe varmt	varmt	hett

Den andre indeksen er PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), som anslår hvor mange prosent som er misfornøyde med de termiske omgivelsene for et gitt aktivitetsnivå og bekledning. Det er utviklet en matematisk sammenheng mellom PPD og PMD basert på studier, vist i figur 3.1. For en PMV på 0, er ventet andel misfornøyde personer 5%, som vil si at det i teorien ikke er mulig å ha et inneklima som tilfredsstillmer mer enn 95%. Ifølge standarden NS-ISO 7730 bør PMV ligge innenfor intervallet $PMV \pm 0.5$, som betyr at minst 90% er fornøyde med inneklimaet. [10][1]



Figur 3.1: En matematisk sammenheng mellom PMV og PPD, utviklet basert på studier. Figur hentet fra [1].

3.1.2 Lufttemperatur

Når det snakkes om lufttemperatur refereres det gjerne til tørrkuletemperaturen, t_a , som måles med et tørt termometer skjermet fra strålevarme. Dersom det også tas hensyn til gjennomsnittlig stråletemperatur, t_r , brukes betegnelsen operativ temperatur, t_o , som er et mer riktig mål på den opplevde temperaturen. Ved lufthastighet mindre enn 0,4 m/s [10] (0,2 m/s [22]) og gjennomsnittlig stråletemperatur under 50°C kan den operative temperaturen tilnærmes ved ligning 3.1. [10][22]

$$t_o \approx \frac{t_a + t_r}{2} \quad (3.1)$$

Lufttemperaturen regnes ofte for å være den viktigste faktoren for termisk komfort innendørs. Den registreres gjerne midt i rommet, 0,6 meter over gulvet for sittende og 1,1 meter for stående. Hvilke temperaturer som føles behagelige avhenger i stor grad av kroppens varmeproduksjon (stoffskifte), og isolasjon (bekledning). Varmeproduksjonen kan uttrykkes ved enheten *met* (W/m), der 1 met refererer til stoffskiftet ved avslappet og stillesittende aktivitet. I tabell 3.2 presenteres stoffskiftet for et utvalg aktiviteter.

Tabell 3.2: Stoffskifte ved ulike aktivitetsnivåer. Verdier fra [10].

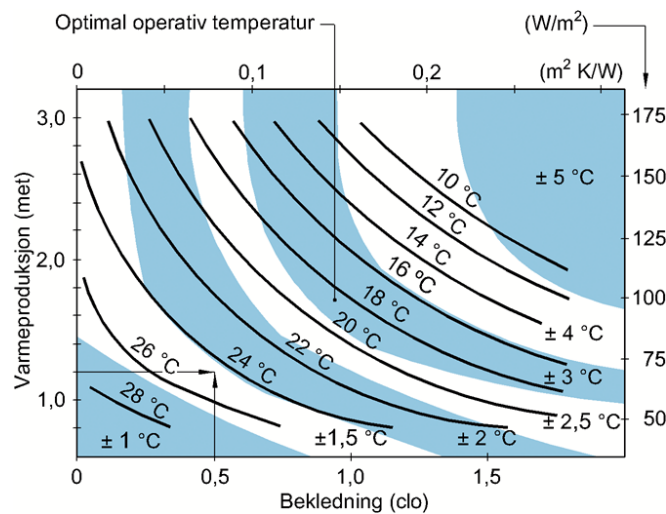
Aktivitetsnivå	Stoffskifte [met]
Sovende	0,8
Stillesittende, avslappet	1,0
Stående, avslappet	1,2
Sittende (kontor, skole, lab)	1,1 - 1,5
Middels aktivitet (husarbeid, maskinarbeid)	2,0 - 2,8

Bekledning kan beskrives med enheten *clo*, der en naken person har isolasjonsevnen 0 clo, lett sommerbekledning 0,5 clo og vinterbekledning 1,0 clo. Tabell 3.3 gir en mer detaljert beskrivelse av et utvalg bekledninger.

Tabell 3.3: Isolasjonsverdi for ulike typer bekledning. Verdier fra [10].

Bekledning	Isolasjon [clo]
Shorts, underbukser, T-skjorte, lette sokker, sandaler	0,3
Lette bukser, skjorte med korte ermer, underbukser, lette sokker, sko	0,5
Skjørt, genser med rund hals, skjorte, truser, tykke knestrømper	0,9
Jakke, bukser, skjorte, underbukser, sokker, sko	1,0

Det optimale forholdet mellom operativ temperatur, bekledning og aktivitetsnivå illustrert i figur 3.2, har blitt bestemt gjennom studier og forsøk.



Figur 3.2: Optimal operativ temperatur gitt bekledning (clo) og aktivitetsnivå (met). De svarte linjene representerer PMV lik 0 for en gitt temperatur. De blå og hvite feltene viser grenseverdiene for anbefalt temperaturavvik, slik at $PMV \pm 0.5$ tilfredsstilles. Figur hentet fra [1].

Kapittel 4

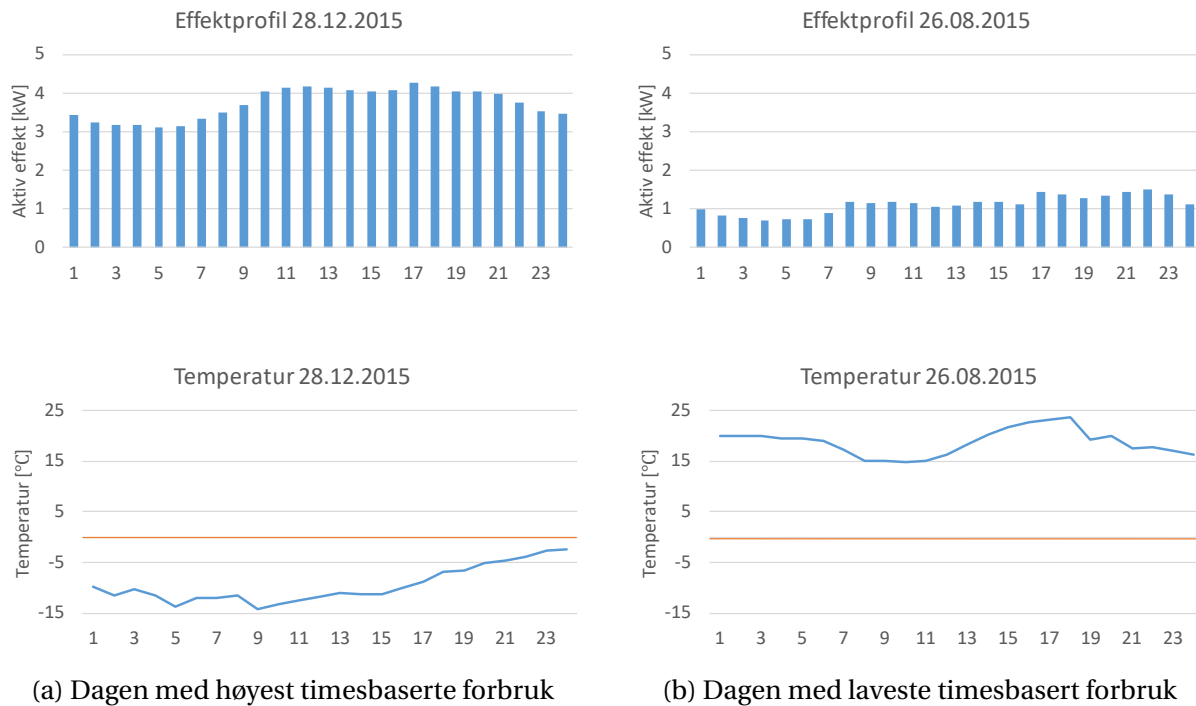
Laster i norske husholdninger

Det norske strømforbruket i boliger karakteriseres av den høye andelen effekt til elektrisk oppvarming, som medfører at forbruket er høyest i kalde perioder. Effektbruken varierer også gjennom døgnet, normalt med en topp om morgenen og igjen på ettermiddagen [23]. For å kunne lage et smart styringssystem som passer til norske forhold er det nødvendig med kunnskap om hva som er de mest effektkrevende lastene og i hvilken grad det er hensiktsmessig å styre de.

I dette kapitlet presenteres

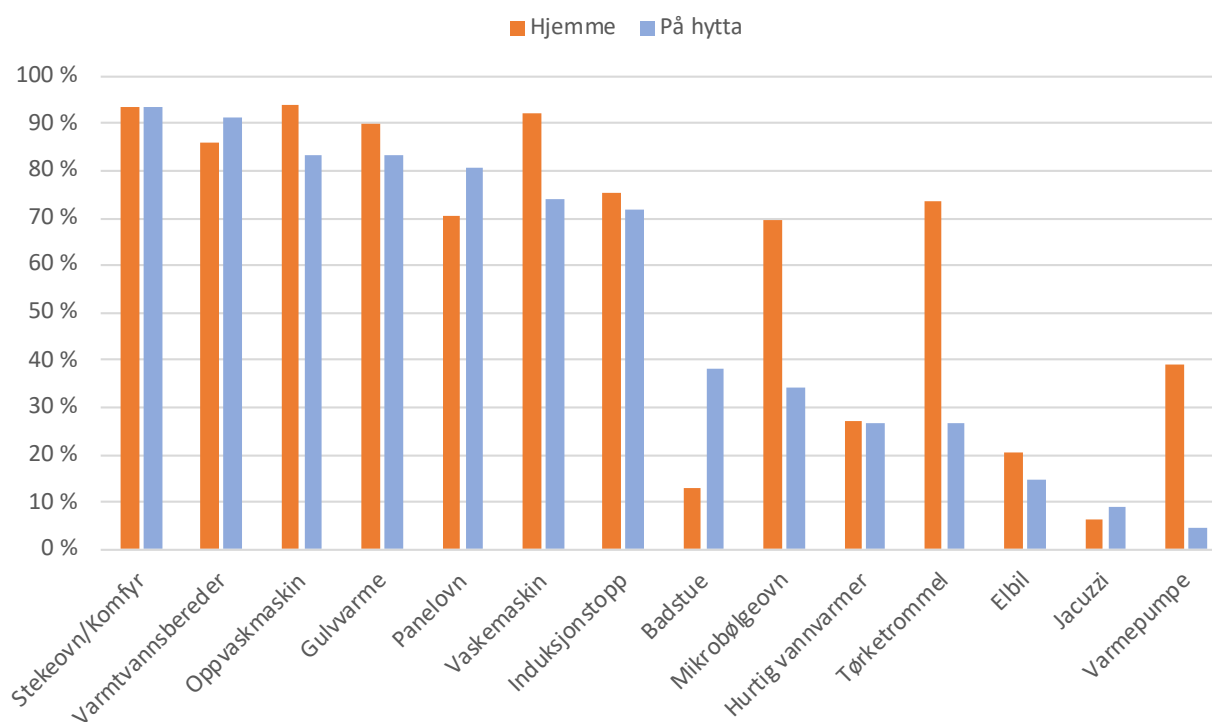
- en typisk effektprofil for norske husholdninger
- begrepet fleksibilitet og tre fleksibilitetsklasser
- virkemåte og anbefalinger til driftsforhold for flere typer elektrisk oppvarming

Effektforbruket i norske husholdninger domineres av romoppvarming og vil derfor i stor grad avhenge av utetemperaturen. Dette er illustrert i figur 4.1 som viser effektprofilen til en typisk husholdningskunde. Dagen med forbrukerens høyeste og laveste timesforbruk i løpet av 2015 er vist i henholdsvis figur 4.1a og 4.1b. Differansen mellom de to effektprofilene skyldes med stor sannsynlighet oppvarmingseffekt, som et resultat av den store temperaturforskjellen. Toppene, som har en relativt lik profil de to dagene med en topp på morgenen og ettermiddagen, kan knyttes til andre funksjoner, som matlagning, belysning og oppvarming av vann.



Figur 4.1: Lastprofil og temperatur for en typisk husholdningskunde. Data er hentet fra en generisk årsprofil i 2015 med timesverdier for temperatur og effekt, fra SINTEF.

I en undersøkelse gjort av Sikom ble det kartlagt hvilke forbrukslaster kundene deres har på hytta og i egen bolig. Resultatene av de i overkant 300 tilbakemeldningene, er vist i figur 4.2. På hytta er det laster for rom- og vannoppvarming i tillegg til matlaging som er de aller vanligste, tett fulgt av vaskemaskin og oppvaskmaskin. Det samme gjelder hjemme, men her er det enda mer utbredt med laster til vasking.



Figur 4.2: Forbrukslaster installert hos Sikom sine kunder. Data er basert på resultatene av en spørreundersøkelse blant Sikom sine kunder, besvart av 303 brukere.

Som Sikoms undersøkelse illustrerer er det høy forekomst av varmelaster og varmtvannsbereidere, både på hytta og hjemme. De står også for en betydelig del av effektbruket i en gjennomsnittlig norsk husholdning, som nevnt tidligere. I tillegg er lastene fleksible og egner seg derfor godt som deltakere i et smart styringssystem for effektreduksjon. Informasjon om effektprofil og virkemåte vil bli gitt senere i kapittelet. Oppvaskmaskin og vaskemaskin er foreløpig ikke tilgjengelige i testlaboratoriet, og vil derfor ikke undersøkes nærmere i denne oppgaven. De er likevel aktuelle deltakere i et smart styringssystem, som vist i [8].

4.1 Fleksibilitet

Begrepet fleksibilitet handler om evnen til endring etter behov. I kraftsystemet kan fleksibilitet forstås som nettoperatorenes mulighet til å opprettholde balanse mellom forbruk og produksjon, ved planlagte eller uforutsette variasjoner. Dette avhenger av hvor fleksible deltagerene i nettet er, altså hvilken evne de har til å reagere på endringer [24]. Privatkunder kan for eksempel bidra med fleksibilitet ved å justere effektbruk etter prissignaler, eller gi nettselskapet mulighet til å styre utvalgte laster for en gitt tidsperiode.

Laster som er hensiktsmessige å styre eller regulere for å kontrollere effektbruk, kan betegnes som fleksible laster. Hvor fleksibel en last er vil avhenge av lastens effektprofil og om det er mulig å skru av lasten eller flytte den til et annet tidspunkt uten at det medfører ulempe for brukeren.

4.1.1 Varmekapasitet

Fleksibiliteten til en varmelast vil avhenge av egenskapene til mediet som varmes opp. Dersom mediet har god evne til å holde på varmeenergi, høy termisk kapasitet, kan det fungere som et termisk lager. I perioder med stor effektbelastning kan det sikre at komforten opprettholdes selv om lasten skrur av.

Den termiske kapasiteten C (J/m^3K) kan uttrykkes $C = c\rho$, der c (J/kgK) er mediets spesifikke varmekapasitet og ρ (kg/m^3) er tettheten. Spesifikk varmekapasitet c (J/kgK), kan defineres som den mengden energi en kilo av et stoff absorberer eller frigjør dersom stoffets temperatur øker eller synker med 1 K [10]. Altså vil energien som skal til for å øke temperaturen til for eksempel et gulv, frigjøres til omgivelsene dersom temperaturen i rommet synker.

For varmtvannsberedere, gulvvarme og panelovner er mediet som varmes opp henholdsvis vann, betong eller tre, og luft. Tabell 4.1 viser den termiske kapasiteten til de forskjellige materialene. Betong har dobbelt så høy varmekapasitet som luft, altså kan varmekabler betegnes som en mer fleksibel last enn panelovner. Det samme gjelder for treparkett, men her vil den termiske kapasiteten alene ikke være en god indikator for fleksibilitet ettersom volumet av tre som benyttes er lite. Et gulv med varmemefolie like under parketten vil ha lavere fleksibilitet enn varmekabler, men høyere enn en panelovn.

Tabell 4.1: Spesifikk varmekapasitet og tetthet. Verdier fra [10].

Materiale	c(J/kgK)	ρ (kg/m ³)
Luft(10°C)	1,01	1,23
Vann (10°C)	4,19	1,00
Tre	1,60	500
Betong	1,00	2,30

4.1.2 Klassifisering av laster

I denne oppgaven deles typiske husholdningslaster inn i tre klasser, basert på hvor fleksible de er:

1. Laster som kan skrus av eller reguleres uten at det får merkbare konsekvenser før etter en lengre periode, gjerne flere timer. Disse lastene betegnes ofte som trege laster. De er svært fleksible og egner seg dermed godt for regulering i perioder med høy belastning. Typiske eksempler er laster som varmer opp vann eller betong, for eksempel varmtvannsbereder og varmekabler.
2. Laster som kan reguleres, men det får merkbare konsekvenser øyeblikkelig eller etter en kort tidsperiode, gjerne under en time. Lastene er fleksible, men i mindre grad enn de trege lastene. Typiske eksempler er panelovner og varmepumper, altså laster som varmer opp luft.
3. Laster som ikke kan skrus av eller flyttes til et annet tidspunkt uten at det går utover brukers komfort, de er dermed ikke fleksible. Dette er gjerne elektriske apparater som brukes i et avgrenset tidsrom og trenger kontinuerlig tilførsel av elektrisk effekt for å levere ønsket funksjon. Typiske eksempler er kjøkkenapparater og underholdningsartikler.

4.2 Termostatstyring

En termostat er en temperaturstyrt bryter. Termostaten regulerer varmekilden, for eksempel en panelovn eller varmeelementet i en varmtvannsbereder, som beskrevet i ligning 4.1 [8]. Det finnes termostater med langt mer avanserte styring, men 4.1 viser den prinsipielle funksjonen. Når temperaturen T_n ved tidspunkt n er høyere enn ønsket temperatur T_s , er elementet av. Termostaten opererer med en toleranse ΔT , som bestemmer den minste aksepterte temperaturen $T_{min} = T_s - \Delta T$. Dersom temperaturen synker under T_{min} skrur varmeelementet på. Hvis temperaturen er innenfor det aksepterte intervallet, forblir statusen S_n uendret.

$$S_n = \begin{cases} 0 & \text{av,} & T_n > T_s \\ 1 & \text{på,} & T_n < T_{min} \\ S_{n-1} & \text{uendret,} & T_{min} < T_n < T_s \end{cases} \quad (4.1)$$

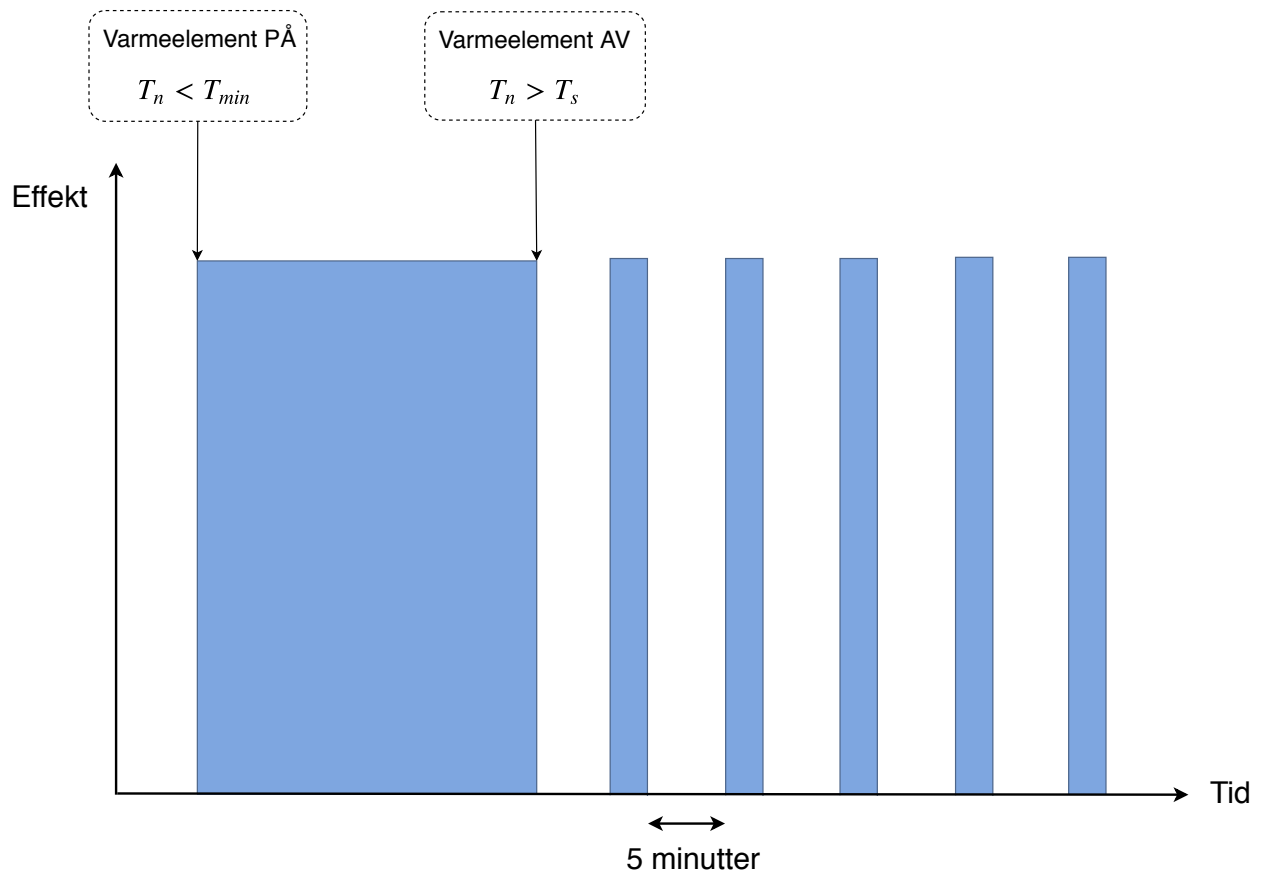
der

S_n er varmekildens status ved tidspunkt n T_s er ønsket temperatur (°C)

T_n er temperaturen ved tidspunkt n (°C) T_{min} er den minste aksepterte temperaturen (°C)

Effektforbruket til en termostatstyrt last ved tidspunkt n kan beskrives ved ligning 4.2, der $P_{last,s}$ er den nominelle effekten og varmekildens status $S_{last,n}$ er som beskrevet i 4.1. Altså vil effekten $P_{last,n}$ variere mellom den nominelle verdien og null, som illustrert i figur 4.3.

$$P_{last,n} = S_{last,n} \cdot P_{last,s} \quad (4.2)$$



Figur 4.3: Typisk lastprofil for en termostatstyrt varmelast. Basert på målinger i smarthuslaboratoriet og [2].

Laster som benyttes til romoppvarming styres gjerne av en termostat med romføler eller gulvføler. Termostaten skrur lasten av og på med hyppige intervaller, for å holde temperaturen innenfor det ønskede intervallet $T_{min} < T_n < T_s$. Dette er illustrert i 4.3, som viser en typisk lastprofil for en termostatstyrt varmelast. Det første intervallet representerer den initielle oppvarmingen til ønsket temperatur T_s . Lengden på intervallene som kreves for å øke og opprettholde temperaturen avhenger av varmekapasiteten til det aktuelle mediet, varmetap og lastens nominelle effekt.

4.3 Panelovn

Virkemåte

Panelovner kan kontrolleres ved hjelp av en termostat eller ved å manuelt velge antall watt som forbrukes. Ved termostatstyrte ovner er virkemåten som beskrevet i ligning 4.1. Temperaturen T_n vil i dette tilfelle betegne romtemperaturen ved tidspunkt n . Mediet som varmes opp er luft, så panelovner vil gå innunder fleksibilitetsklasse 2. Dersom de skrur av vil temperaturen etter relativt kort tid (avhengig av rommets varmetap) begynne å synke. Tilsvarende vil temperaturen kunne økes hurtig ved å skru ovnen på. Dette gjør at panelovner er godt egnet for energisparing i form av natt- og dagsenking av temperaturen.

Anbefalinger og krav til driftsforhold

Panelovner plasseres vanligvis under vinduer for å unngå at kald luft fra vinduene siger inn i rommet og ned langs gulvet. Den varme lufta fra panelovnen stiger opp og blander seg med den kalde lufta som igjen fordeles jevnt i rommet. Når panelovnene skal dimensjoneres kan en ifølge flere leverandører ta utgangspunkt i rundt 60 W/m^2 . For gamle hus med høye varmetap kan det være nødvendig med $70\text{-}100 \text{ W/m}^2$. [25][26][27]

4.4 Varmekabler

Virkemåte

Varmekabler er elektriske ledere med hensikt å varme opp omgivelsene. Styringen foregår normalt ved hjelp av en termostat med gulvføler. Temperaturen i gulvet stiger og synker langsomt når varmekablene skrur henholdsvis på og av. Altså kan varmekabler plasseres i fleksibilitetsklasse 1.

Anbefalinger og krav til driftsforhold

Varmekabler støpes i gulvet mellom gulvisolasjon og gulbelegg, typisk fliser eller PVC. Installert effekt ligger gjerne på mellom 100W/m^2 og 150W/m^2 for å opprettholde en komfortabel bade-gulvstemperatur på rundt $27\text{-}28 \text{ }^\circ\text{C}$ [28]. Maksimal anbefalt temperatur vil avhenge av materialet i gulvbelegget.

4.5 Varmefolie

Virkemåte

Varmefolie består av ledere omsluttet i plast. Det leveres på rull og kan legges direkte under parkett eller laminat. Styring foregår ved termostat med enten gulvføler eller romføler. På samme måte som en panelovn, vil varmemfolien gi raske temperaturendringer og være godt egnet for natt-og dagsenking. Dermed tilhører varmemfolien fleksibilitetsklasse 2.

Anbefalinger og krav til driftsforhold

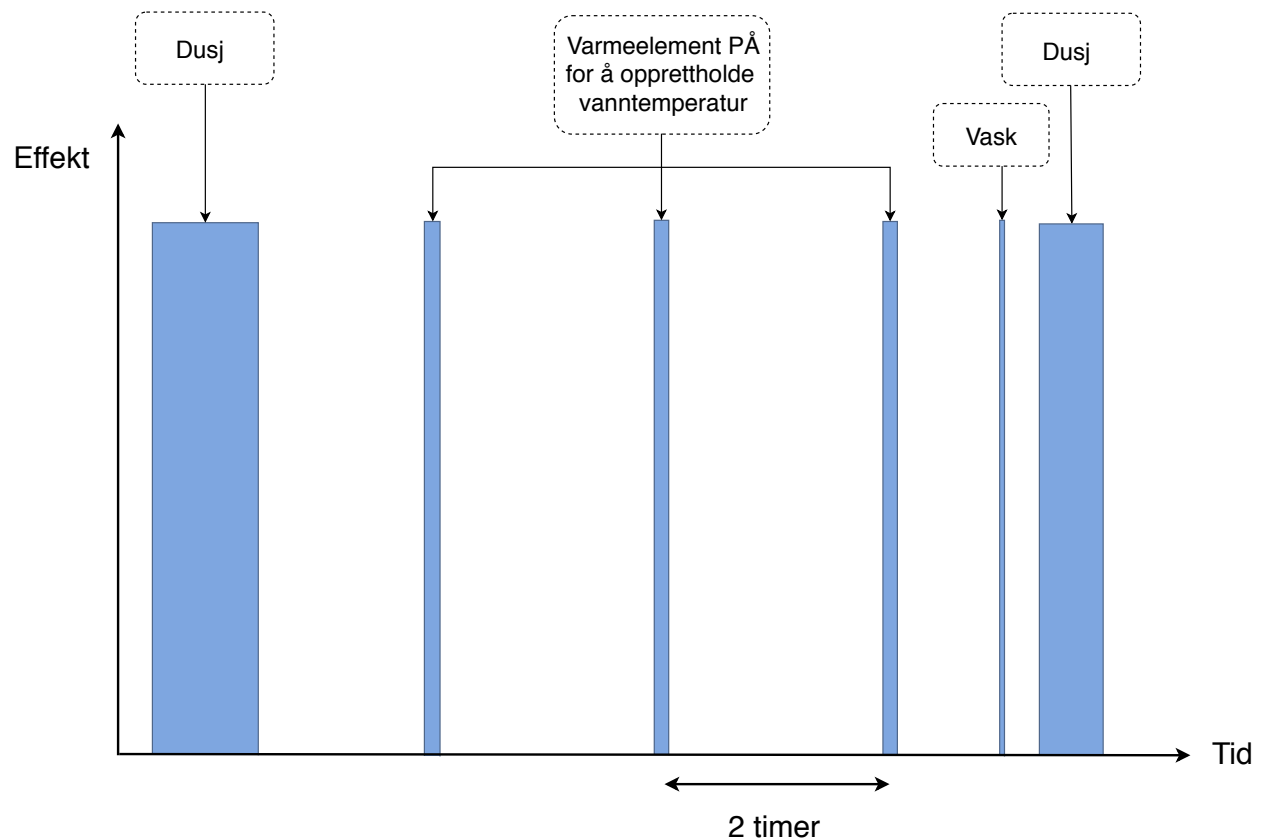
For å hindre at parketten tar skade, anbefaler gjerne parkettleverandører at temperaturen i gulvet ikke overstiger 27 °C. Varmefolie til innendørs bruk leveres i hovedsak med en effekt på 60W/m², og en garanti om at overflatetemperaturen ikke overstiger de anbefalte 27 °C.

4.6 Varmtvannsbereder

Virkemåte

Vannet i berederen varmes opp av ett eller flere varmelementer som styres av en termostat. Ønsket temperatur T_s i tanken settes av brukeren og kan typisk velges mellom 60-90°C. Temperaturen på vannet som føres til uttakene i boligen reguleres av en blandeventil, som tar inn kaldt vann og blander med varmt vann fra tanken.

Avhengig av berederens isolerende evne vil noe av varmeenergien tapes til omgivelsene. Dette kompenseres for ved å skru varmeelementene på i korte tidsintervaller, slik at ønsket temperatur opprettholdes. Figur 4.4 viser typisk effektprofil for en varmtvannsbereder. Den første toppen kan for eksempel være som følge av en dusj, mens de tre neste kompenserer for varmetap.



Figur 4.4: Typisk effektprofil for en varmtvannsbereder. Basert på målinger i smarthuslaboratoriet og [2].

4.6.1 Anbefalinger og krav til driftsforhold

Når varmtvannsberederen skal inkluderes i et styringssystem er det viktig å sørge for at den ikke driftes på en måte som fører til oppblomstring av farlige bakterier. Det innebærer i hovedsak bakterien legionella, som kan føre til sykdommen legionellose, med symptomer som alvorlig lungebetennelse eller feber. Boblebad, dusjanlegg og kjøletårn er de vanligste kjente smittekil-dene. I Norge registreres det hvert år rundt 20 tilfeller av legionellose. Det har også vært store alvorlige utbrudd, det siste i Østfold 2005 der 103 antas å ha blitt smittet og 11 døde. [29]

Legionella trives i fuktige omgivelser, og finnes naturlig i små mengder overalt. Vekstforholdene er optimale mellom 20 og 50 °C , mens ved temperaturer over 60 °C vil ikke bakterien etablere eller formere seg. Ved oppblomstring over lengre tid i installasjoner med lunkent vann kan legio-nella utgjøre en smittefare. [30]

En varmtvannstank kan ha grobunn for legionella bakterier ettersom

- sjelden bruk kan gi stillestående vann med liten gjennomstrømning
- vanntemperaturen kan i perioder ligge mellom 20 og 50 °C
- bunnen av berederen kan ha potensial for bakterievekst. Kaldt vann føres inn i bunnen av berederen, ofte under varmeelementet, slik at vannet i bunnen har lavere temperatur enn i resten av tanken. Det kan også dannes slam på bunnen som gir gode vekstforhold for bakterien.

Folkehelseinstituttet gir i [30] veiledning til hvordan legionellasmitte kan forebygges. I anlegg hvor temperaturen tidvis ligger mellom 20 og 60 °C, kan smittefaren minimeres ved å la tem-peraturen i vannet overstige 70 °C, slik at bakteriene dør. Dette bør skje daglig eller minimum ukentlig.

4.7 Ikke-fleksible laster

Typiske eksempler på ikke-fleksible husholdningslaster, med tilhørende nominelle effekt, er presentert i tabell 4.2. Effektforbruket til apparatene kan variere mellom forskjellige leverandører og modeller, så verdiene i tabellen er kun eksempler.

Tabell 4.2: Eksempler på husholdningsapparater og tilhørende effekt. Verdiene er hentet fra en liste med gjennomsnittlig effektforbruk for elektriske apparater, fra hjemmesidene til Haugaland Kraft [11].

Apparat	Effekt [W]
Støvsuger	1000
Hårtørker	750
Brødrister	1000
Elektrisk klokke	2
Vaffeljern	800
Fjernsyn	100
Kjøleskap	160
Fryseboks	175
Kjøkkenvifte	75
Komfyr	2200
Motorvarmer	500
Kaffetrakter	1500
Stereoanlegg	25

Kapittel 5

Nytteverdi av effektreduksjon for forbruker

Tidligere har smarthusløsninger vært for de spesielt interesserte. Nytteverdien har ligget i økt komfort ved å kunne fjernstyre lys, lyd eller varme. Det har også vært muligheter for å redusere energiforbruket ved å bruke bevegelsessensorer eller kalenderfunksjoner for å skru av lys eller senke temperaturer når det ikke er noen hjemme.

Dersom en algoritme for effektkontroll implementeres, kan den kommende effekttariffen føre til at smarthusløsninger i større grad gir en økonomisk nytteverdi. Eventuelle besparelser vil avhenge av tariffen for beregning av nettleie, kostnaden ved å installere et effektkontrollsystem og den resulterende reduksjonen av effekt og energi.

I dette kapitlet presenteres

- en metode for lønnsomhetsberegninger
- et beregningsgrunnlag med investeringskostnader for et effektkontrollsystem, og eksemplertariffer for nettleie

5.2 Beregningsgrunnlag

For nåverdiberegninger av et effektkontrollsystem basert på Sikoms løsninger benyttes Sikoms egne kostnadsoverslag, presentert i tabell 5.1. Investeringsbeløpet I_0 for en ny kunde, er et overslag for prisen av to releer med tre innganger, en sentral, effektkontrollenheten (HAN-pluggen) og installasjon med elektriker. For eksisterende kunder vil beløpet ligge på rundt 2000 kroner for effektkontrollenheten.

Tabell 5.1: Kostnadsanslag for nettonåverdiberegninger basert på informasjon fra Sikom [12].

I_0 ny kunde	I_0 eksisterende kunde	Årlig kostnad
13000 kr	2000 kr	1500 kr

Grunnen til at det skilles mellom eksisterende og nye kunder, er at de eksisterende allerede har installert de mest sentrale komponentene som er nødvendige for å drifte et automatisk styringssystem. Dermed vil investeringskostnaden kun dreie seg om nødvendig utvidelse, eller programvareoppdatering.

Kostnadene for strøm beregnes ut i fra eksempeltariffer presentert i NVEs høring om endring av tariffer fra 2017 [13]. Priser for dagens tariff, abonnert effekt og time-of-use er presentert i tabell 5.2. Vinter er definert som tidsrommet fra starten av november til og med mars. Valg av de nevnte tariffene som beregningsgrunnlag er basert på signaler fra NVE og andre aktører i kraftbransjen. NVE har presentert abonnert effekt som forslag til ny modell fra og med 2021, mens aktører som blant annet Hafslund og Energi Norge ikke støtter dette, men foretrekker en variant med varierende energiledd som i time-of-use. Dagens tariff er inkludert for å undersøke om systemet kan være lønnsomt med energitariff.

Tabell 5.2: Eksempeltariffer for beregning av nettleie, hentet fra [13].

Energitariff	
Fastledd	Energiledd
1749 kr/år	19,4 øre/kWh

Time-of-use			
Fastledd	Energiledd		
	Sommer	Vinter	Vinter hverdag kl. 06-20
1749 kr/år	12,2 øre/kWh	15,2 øre/kWh	38 øre/kWh

Abonnert effekt			
Fastledd	Abonnement	Energiledd	Overforbruk
1060 kr/år	689 kr/kW/år	5 øre/kWh	1 kr/kWh/h

Kapittel 6

Smarthuslaboratoriet

Begrepet *smarthus* er ikke et entydig definert begrep, men brukes ofte om bygninger som bruker teknologi med en målsetning om økt energieffektivitet, fleksibilitet og tilpasningsevne, produktivitet, sikkerhet og bedre innemiljø [34]. I førte etasje på elektrobygget ved NTNU Gløshaugen pågår ferdigstillingen av et smarthuslaboratorium, videre omtalt Smarthuset. Laboratoriet er utformet som en leilighet med mulighet for å installere styrings- og overvåkningssystemer.

I dette kapitlet beskrives:

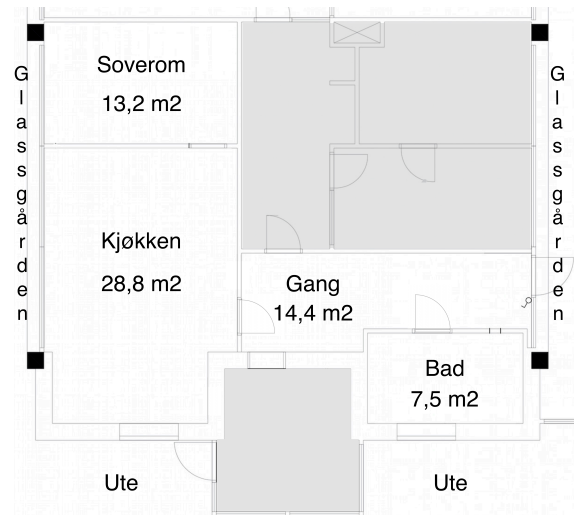
- Smarthusets struktur
- Den fysiske og logiske oppbygningen til styrings- og målesystemet som har blitt utviklet for testing av algoritmen
- Spesifikasjonene til de fleksible og ikke-fleksible lastene i Smarthuset

6.1 Bygningsstruktur

Bygningsstrukturen til Smarthuset er en del av elektroblokk E, som ble tatt i bruk på midten av 80-tallet. Vinduer og andre byggt tekniske komponenter vil dermed ha egenskaper som fører til større varmetap enn i nye bygg, som er underlagt krav til energytelse fra de byggt tekniske forskriftene TEK10 eller TEK17. Det foreligger ikke detaljert informasjon om varmetap gjennom smarthusets vegger, vinduer eller tak.



Figur 6.1: Oversiktsbilde av Gløshaugen. Den røde sirkelen markerer Smarthusets plassering. Utsnitt fra kartprogrammet MazeMap.

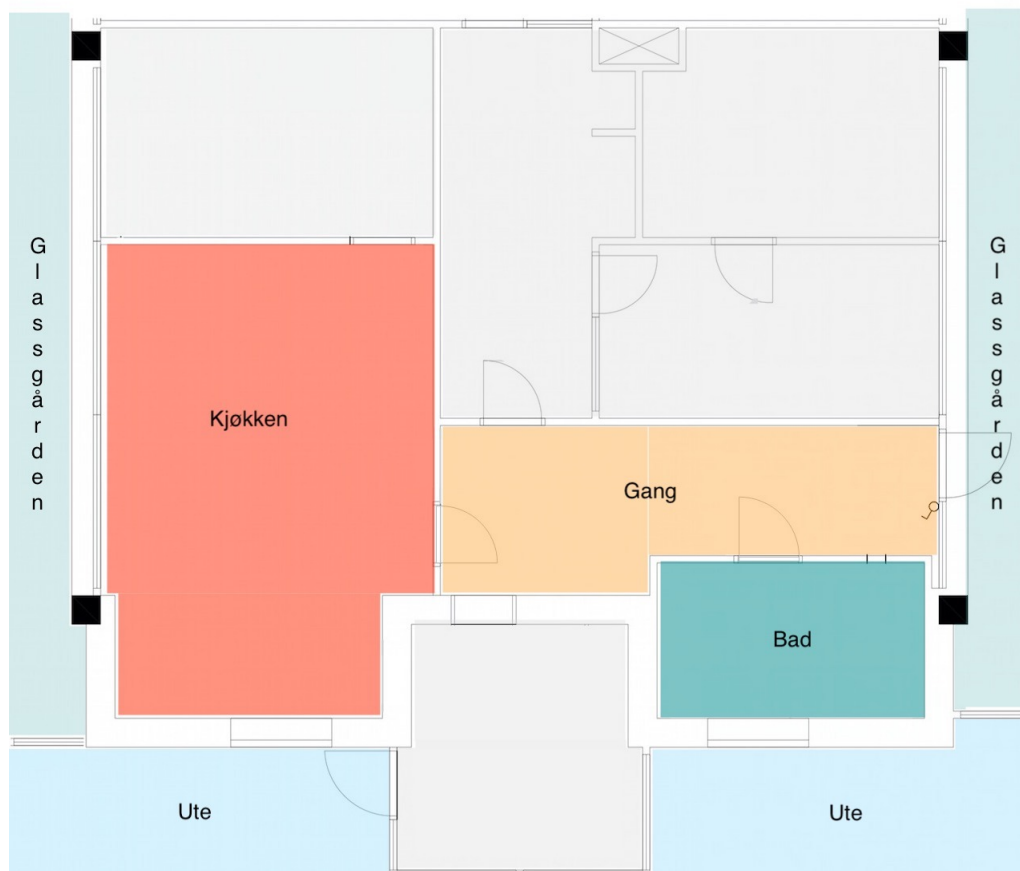


Figur 6.2: Plantegning av Smarthuset.

Smarthuset er utformet som en leilighet med bad, gang, kjøkken/stue og soverom. Rommenes gulvareal og utforming er vist i figur 6.2. Kjøkkenets langside er dekket av vinduer som vender mot glassgården, et atrium med glasstak som omkranser bygningsblokkene på elektrobygget. Kortsiden har et vindu som vender mot sør-vest og grenser mot friluft, som illustrert i figur 6.1. Gangens langside ligger vegg i vegg med andre rom i elektrobygget. På kortsiden er utgangsdøren og et vindu, som vender mot glassgården. Badet har ingen vinduer. I simuleringene vil ikke varmestyring eller temperaturmåling for soverommet inkluderes.

6.1.1 Temperatursoner

Smarthuset deles inn i tre adskilte temperatursoner vist i figur 6.3, med separate varmelaster og temperatursensorer. Det er også en temperatursensor plassert utenfor kjøkkenvinduet, i glassgården. På grunn av vindusflatene på kjøkkenet og døren i gangen påvirkes temperaturen i Smarthuset i stor grad av glassgårdens temperatur. Den blir igjen påvirket av svingninger i utetemperaturen som følge av varmetap gjennom de store vinduene og taket.



Figur 6.3: Temperatursoner i og utenfor smarthuset

De grå feltene representerer andre rom i elektroblokka hvor det ikke gjøres temperaturmålinger. Der regulerer varme- og ventilasjonsanlegg inneklimate, så temperaturen forventes å være relativt stabil. Det er ingen vindusflater mellom de grå feltene og Smarthuset, så varmetap eller temperaturøkning på kjøkkenet og i gangen forventes å hovedsaklig påvirkes av temperaturen i glassgården og ute.

6.1.2 Kursinndeling

Kursinndelingen er noe uvanlig i forhold til tradisjonelle leiligheter. Varmelaster som varmtvannsbereder, varmekabler på badet, varmefolie på kjøkkenet og varmefolie i gangen er alle koblet på separate kabler i sikringsskapet. Dette gir mulighet for styring av enkeltlaste ved å bryte strømmen med et rele.

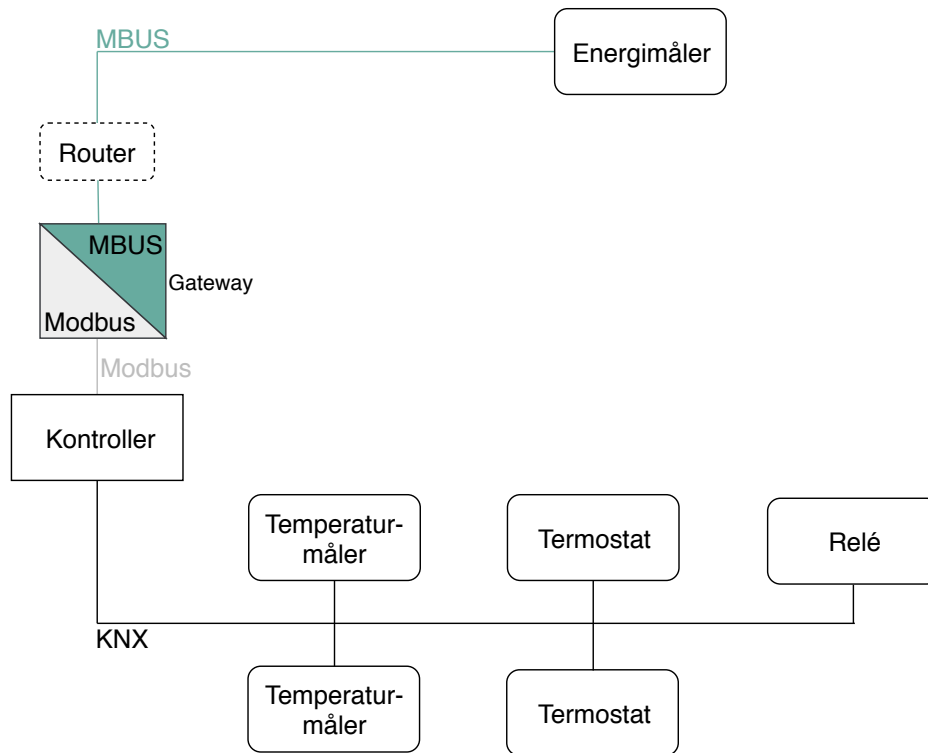
6.2 Styringssystem

Drift av et styringssystem for effektkontroll krever sammenkobling av logiske funksjoner og fysiske komponenter. Det betyr at enheter, som aktuatorer og sensorer, må ha mulighet til å kommunisere med hverandre direkte eller via en felles sentral eller "hjerne". Komponenter og logisk struktur som benyttes for å teste algoritmen, er en utvidelse av systemet utviklet i [35]. Fullstendig liste over komponentene i styringssystemet er vedlagt i tabell A.1.

6.2.1 Logisk struktur

Systemets logiske struktur omfatter kommunikasjonen mellom de fysiske komponentene. For at to komponenter skal kunne lese og sende informasjon til hverandre, må de bruke samme kommunikasjonsregler. Disse reglene kalles protokoller. Systemet bruker i hovedsak protokollen KNX, som har et åpent grensesnitt. Parametere og driftsbetingelser for KNX komponentene konfigureres med programvaren ETS4. Temperatursensorene, releene og sentralenheten Logic Machine 4 (LM4) kommuniserer via KNX.

Energimåleren i systemet skal simulere en AMS-måler. Den kommuniserer derfor over MBUS, som er den valgte protokollen for AMS-målerne. LM4 er ikke kompatibel med MBUS, så det er nødvendig å inkludere en gateway som oversetter til den LM4-kompatible protokollen MODBUS. Fullstendig oversikt over den logiske strukturen er illustrert i figur 6.4.



Figur 6.4: Logisk struktur for styringssystemet

Hver funksjon som utføres av komponentene defineres som et objekt med en logisk adresse på formen 'X₁/X₂/X₃', som velges i ETS4. Den logiske adressen gjør det mulig å hente ut informasjon fra bussen, for eksempel temperaturer eller statusen til en bryter. For styringsalgoritmen er det valgt et oppsett hvor det første nummeret i adressen betegner komponenttypen, det andre nummeret forteller hvor den fysiske komponenten er plassert, mens det tredje betegner funksjonen. Objektet 'Temperatur bad' (°C) har for eksempel adressen '4/1/0', der 4- sensor, 1 - bad og 0- temperaturmåling.

6.2.2 Fysisk struktur

Den fysiske kommunikasjonen mellom komponentene foregår ved hjelp av elektriske impulser som sendes på en felles busskabel. Alle komponentene i systemet har en unik fysisk adresse, som muliggjør kommunikasjon og programmering av komponentens virkemåte. Termostaten på badet har for eksempel adressen 1.1.21. Det er ikke valgt et system for de fysiske adressene, når en ny komponent legges til blir den gitt første ledige adresse. Hver komponent har en rekke objekter som forteller om de fysiske funksjonene som kan utføres. Et objekt for den nevnte termostaten er målt temperatur, mens et annet er strømbryting. Virkemåten til de fysiske objektene tilknyttet KNX bussen kan tilpasses i ETS4, for eksempel kan det velges om temperaturen skal måles av den interne sensoren eller ved hjelp av en ekstern sensor. Funksjonaliteten til systemet bestemmes ved å knytte sammen fysiske og logiske objekter i ETS4.

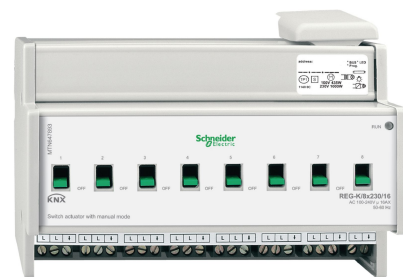
6.2.3 Komponenter

Logic Machine 4

LM4, illustrert i figur 6.5 er en kontroller som kan kommunisere over mange forskjellige grensesnitt, blant annet KNX/EIB, Modbus, DALI og EnOcean. Den fungerer som systemets sentralenhet og behandler informasjon fra alle komponentene. Programmering, kjøring av algoritme og overvåking av tilstander i systemet gjøres via et nettbasert brukergrensesnitt som er tilgjengelig via enhetens IP-adresse. Logiske objekter som er tilgjengelige på kommunikasjonsbussene kan legges til i LM4 sin objekt-database. I programmeringsfunksjonen er det mulig å lage logiske programmer som kan hente ut verdier fra, og skrive til bussen, altså overvåke og styre de fysiske objektene. Registrering av aktiv effekt og temperaturer i systemet gjøres via LM4 sin trend logg. Gjennomsnittlig absoluttverdi av effekt og temperatur lagres med en oppløsning på 5 minutter.



Figur 6.5: Kontrolleren Logic Machine 4. Bilde fra [3].



Figur 6.6: Schneider REG-K/8x230/16. Relémodul for kontroll av de fleksible lastene. Bilde fra [4].

Binærutganger

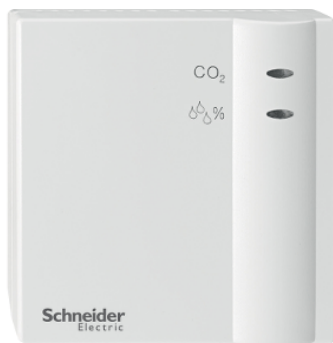
Strømforsyningen til de styrbare lastene kontrolleres av relémodulen illustrert i figur 6.6.

Fordelingen på reléene er som følger:

1. Varmtvannsbereder
2. Varmekabler
3. Varmefolie gang
4. Varmefolie kjøkken
5. Panelovn kjøkken (Hele stikkontaktkursen langs veggen under vinduet på kjøkkenet)

Temperatursensorer

Temperaturen i gangen og på kjøkkenet registreres av den veggmonterte temperaturmåleren vist i figur 6.7. På badet og i glassgården benyttes den innebygde temperatursensoren til termostaten vist i figur 6.8 som temperaturmåler. Termostatene er ikke veggmontert, men henger fritt ca 1 meter over gulvet på badet, og 1 meter lavere enn toppen av kjøkkenvinduenevindue, i glassgården. Objektet for temperatur ($^{\circ}\text{C}$) sendes syklisk på bussen hvert minutt for begge temperaturmålerene og termostatene.



Figur 6.7: Schenider Electric, temperatur-sensor MTN6005-0001. Bilde fra [5].



Figur 6.8: GIRA Stetigregler, KNX tempera-turregulator. Bilde fra [6].

Energimåler

Energimåleren i systemet er illustrert i figur 6.9. Den måler aktiv effekt for hele smarthuset og fungerer på den måten som en AMS-måler. Effekten (W) måles og sendes til LM4 via MBUS hvert 15. sekund. For mer detaljert informasjon om kommunikasjonsprotokollen og konfigurering i LM4, refereres det til [35] eller enhetens brukermanual.



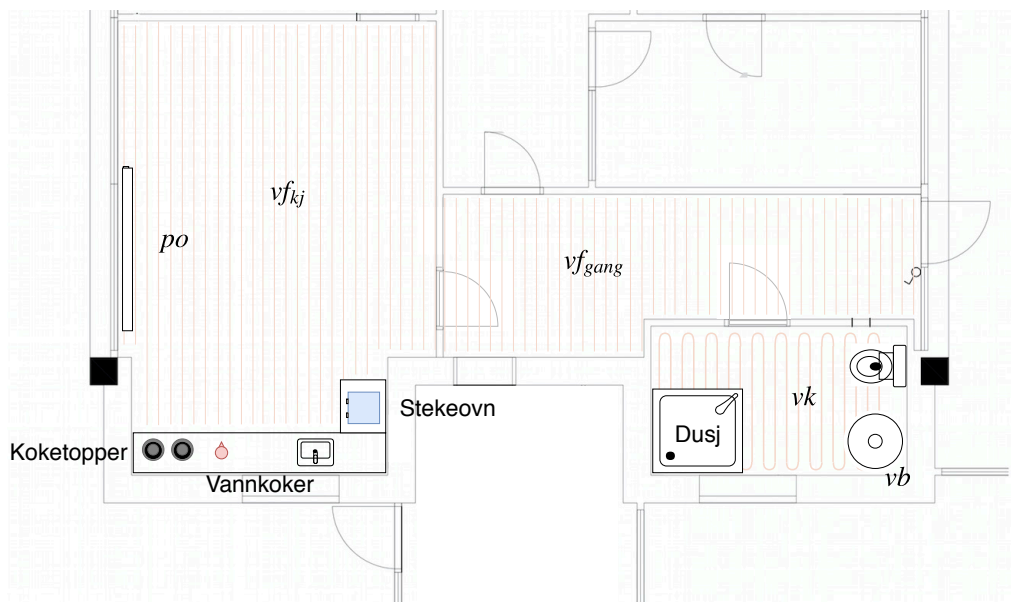
Figur 6.9: Schneider Electric, energi-måler A9MEM3135. Bilde fra [7].

6.3 Laster

Det totale effektforbruket i Smarthuset er et resultat av forbruket til følgende laster:

- Belysning
- Styringssystem
- Fleksible laster: Varmtvannsbereder (vb), Varmekabler(vk), Varmefolie i gang(vf_{gang}), varmemefolie på kjøkken(vf_{kj}) og panelovn(po).
- Ikke-fleksible laster: Koketopper, vannkoker og stekeovn

Plasseringen til de fleksible og ikke-fleksible lastene i Smarthuset er illustrert i figur 6.10. Informasjon om lastenes effektforbruk er presentert i tabell 6.1 og 6.2. Komponentene i belysnings- og styringssystemet utdypes ikke ettersom belastningen er liten. Basert på målinger er belysnings- og styringssystemets effekt rundt 200W totalt, mens styringssystemet bruker omkring 50W.



Figur 6.10: Plassering av fleksible og ikke-fleksible laster i smarthuset

6.3.1 Fleksible laster

De fleksible lastene styres lokalt av tradisjonelle termostater, hvor ønsket temperatur stilles manuelt. Ettersom lastene ligger på separate kabler koblet til hver sin inngang på relémodulen i sikringsskapet, er det mulig å overstyre varmeelementene ved å bryte strømmen. Reléene på relémodulen kan ha følgende tilstander:

$$B = \begin{cases} 0 & \text{av: ingen strøm} \\ 1 & \text{på: strøm} \end{cases} \quad (6.1)$$

Basert på målinger av den totale effekten i systemet ved 230 V, og informasjon om hvilke laster som er påskrudd, har effekten til varmefolien blitt beregnet. Avrundede verdier gjengis i tabell 6.1. Nominell effekt for de andre fleksible lastene er gitt av leverandør. Andre forhold og spesifikasjoner knyttet til lastene presenteres under.

Tabell 6.1: Nominell effekt for de fleksible lastene i Smarthuset.

Last	Nominell effekt [W]
Varmtvannsbereder	3000
Varmekabler	900
Panelovn	800
Varmefolie gang	800
Varmefolie kjøkken	1450

Varmtvannsbereder

Varmtvannsberederen som er installert i Smarthuset er en 3000W bereder fra OSO. Den har beregnet kapasitet for 5,5 personer. Tiden som er nødvendig for å øke temperaturen på vannet med 65 °C, $\Delta t_{oppvarming}$, er fra leverandør oppgitt til 7,2 timer. Temperaturen i vannet reguleres av en innebygd termostat.

Varmekabler

Varmekablene på badet reguleres av en termostat med gulvføler. Ønsket temperatur styres ved å manuelt endre T_s på termostaten. Kabelen er en 2-leder varmekabel med total effekt på 900W, som tilsvarer 126 W/m².

Varmefolie

Varmefolien i gangen og på kjøkkenet styres av veggmonterte termostater med innebygd måler for romtemperatur. Den totale målte effekten er henholdsvis 800 og 1450 W. Folien er levert med temperatursperre, slik at temperaturen i gulvet ikke overstiger de anbefalte 27°C.

Panelovn

I Smarthuset er det installert en panelovn med nominell effekt 800W på kjøkkenet under vinduet mot glassgården. Ovnens varmeelement reguleres av en innebygd termostat. Den ønskede romtemperaturen T_s kan velges manuelt ved hjelp av et reguleringshjul på siden. Ovnen har ikke mulighet for fjernstyring eller automatisk temperatursenking på natt- og dagtid, så det må reguleres manuelt.

6.3.2 Ikke-fleksible laster

Ettersom Smarthuset ikke er ferdig utstyrt med elektriske apparater for matlaging og underholdning, benyttes det laster med lignende effektprofil for å simulere de mest effektkrevene operasjonene. Som illustrert i figur 4.2, gjelder dette i hovedsak apparater til matlaging. Det er derfor valgt å kun simulere ikke-fleksible kjøkkenapparater. Matlaging på komfyr simuleres ved å bruke to separate koketopper, en tradisjonell kokeplate og en induksjonsplate. Toppene har nominell effekt på henholdsvis 2000 og 1800W. Stekeovn simuleres ved en tørrsterilisator med nominell effekt 1430W. Den fungerer som et varmeskap med stabil temperatur, som kan velges opp til 250 °C. I tillegg benyttes det en vannkoker med nominell effekt på 2200W.

Tabell 6.2: Nominell effekt for de ikke-fleksible lastene i Smarthuset.

Last	Nominell effekt [W]
Stekeovn	1430
Keramisk koketopp	2000
Induksjonstopp	1800
Vannkoker	2200

Kapittel 7

Algoritme

De siste årene har det blitt publisert flere artikler om temaet *Home Energy Management* (HEM), med metoder og algoritmer for reduksjon av effekttopper i husholdninger. Felles er at de ønsker å redusere kundens elektrisitetsregning samtidig som det tas hensyn til nettoperatorens behov for reduserte effekt i høylasttimer, gjerne uttrykt ved prisintensiver i form av prismodellen time-of-use eller sanntidsprising.

Algoritmen som er utviklet i denne oppgaven tar utgangspunkt i prinsippene for prioritet som presenteres i artikkelen *An Algorithm for Intelligent Home Energy Management and Demand Response Analysis* av IEEE medlemmene Manisa Pipattanasomporn, Murat Kuzlu og Saifur Rahman [8]. Det er gjort tilpasninger til norske forhold med en forbruksprofil som i hovedsak består av laster til oppvarming. I tillegg er det lagt inn funksjonalitet for å hindre store overskridelser av brukerens komfortpreferanser, samt planlagt belastning før høylastperioder.

I dette kapittelet redegjøres for

- valg av metode for lastkontroll
- algoritmens virkemåte
- planlagte hendelser

7.1 Tidligere arbeid

Automatisk effektkontroll kan gjennomføres med forskjellige strategier. En av de mer brukte metodene er å lage en optimalisert timeplan for bruk av husholdningsartikler. Dette gjøres blant annet i [36] ved hjelp av lineær programmering, for å minimere kostnader, og ventetid før apparater skrur seg på. I tillegg benyttes et erfaringsbasert system for å forutse de kommende strømprisene. Artikkelen [37] presenterer en optimeringsmodell som planlegger bruk av termostatstyrte husholdningslaster basert på sanntidsprising av elektrisitet og forbruksprognoser, samtidig som det tas hensyn til brukerkomfort. Modellen ønsker å optimalisere for eksempel kostnad eller komfort. Artiklene viser til gode resultater for reduksjon av kostnader og effekttopper i høylasttimer. Det må likevel vurderes om løsningene er passende for implementering i norske hjem. Begge modellene består av mange parametere som krever detaljkunnskap om systemet de skal implementeres i, som lastprofiler, nødvendig energibruk for de planlagte operasjonene, prisprognoser og forbruksprognoser. For dagens situasjon er denne informasjonen ofte ikke tilgjengelig, eller mangelfull.

En fremgangsmåte som i større grad involverer brukeren presenteres i [38]. Dersom forbrukeren skrur på et effektkrevende apparat undersøkes strømprisen i sanntid, for å se om tidspunktet er gunstig. Hvis det ikke er tilfellet, presenteres et alternativt starttidspunkt som forbrukeren må godkjenne. Behovet for brukerens tilbakemelding kan være positivt ettersom det bidrar til bevissthet rundt eget forbruk. I tillegg kan det ifølge [15] gi høyere reduksjon av energi og effekttopper dersom brukeren får opplæring og tilbakemelding om forbruk. En ulempe med systemet i [38] er at det kan oppleves krevende å måtte respondere ofte, noe som kan føre til lav motivasjon. Under pilotprosjektet for abonnert effekt i Steinkjer ble det for eksempel observert et mulig trøtthetsfenomen blant forbrukerne mot slutten av testperioden [39].

I artikkel [8] og [40] styres laster basert på prioriteringer satt av brukeren. Dersom det en periode er høy belastning og algoritmen ønsker å holde effekten under et gitt nivå, vil lasten med lavest prioritet bli skrudd av først. Systemet i [40] vektlegger reduksjon av forbrukerens kostnader, ikke kutting av effekttopper, ved å inkludere fornybare kilder og batteri. Dersom det ikke er tilgjengelig energi fra fornybare kilder og strømprisen er høy, flyttes laster med lav prioritet til et billigere

tidspunkt. Algoritmen i [8] har som mål å tilfredsstillte ytre forespørsler om effektreduksjon over en gitt tidsperiode. Forespørslene kan for eksempel være gitt av nettoperør som følge av knapphet i nettet, eller simulere endringer i prisen for effekt. Algoritmen sørger for at husholdningens totale effektbruk holdes under effektgrensen gitt i forespørselen, ved å skru av apparater i henhold til prioritet satt av brukeren. I tillegg tas det noe hensyn til brukerpreferanser for temperatur, samt betingelser knyttet til lastene, som for eksempel når elbilen skal være ferdig ladet. Algoritmene som presenteres i [8] og [40] er forholdsvis enkle. De er hendelsesbaserte, som vil si at de har regler for hvordan de skal reagere når bestemte hendelser inntreffer. Evnen til å redusere effekttopper ser ut til å være god, men ettersom forbruket av laster ikke planlegges kan det tenkes at optimal reduksjonen av kostnader og effekttopper ikke oppnås. En fordel med et prioriteringsbasert system er at behovet for informasjon bergenser seg til brukerpreferanser om komfort, prioritet og muligens lastenes nominelle effekt.

7.2 Ønsket funksjonalitet for effektkontrollalgoritme

Valg av metode for effektalgoritme avhenger av hvilke spesifikasjoner det er ønskelig at systemet skal ha. I lys av den varslede innføringen av abonnert effekt, bør systemet være i stand til å kutte effekttopper, ikke bare flytte de til et annet tidspunkt ettersom effektgrensen gjelder hele døgnet. Dette brukes som et utgangspunkt selv om NVE revurderer valget av abonnert effekt [18], og det derfor er usikkert hvilken form tariffen vil ha. Et system som reduserer effekttopper kan også tenkes å fungere godt for en tariff med differensiert prising i løpet av døgnet (time of use), ettersom effekten som flyttes fra toppene må tas igjen etter en periode med høy belastning. Dette vil typisk skje midt på dagen eller natta når prisene normalt er lave.

Andre ønskede spesifikasjoner er som følger:

Systemet bør

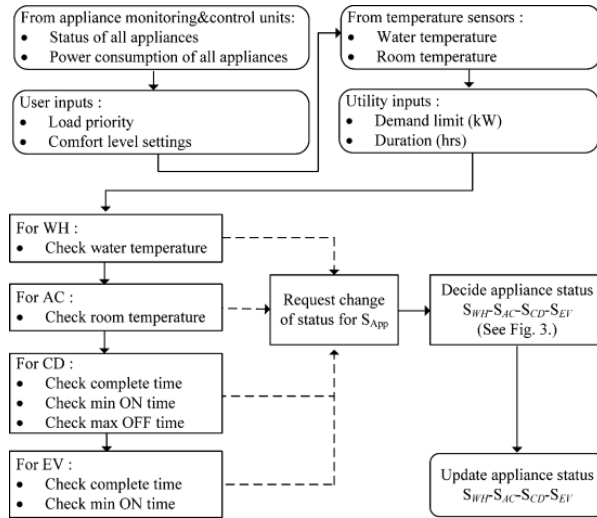
- kunne implementeres i de fleste typer boliger og husholdninger uten at det er behov for mye informasjon om boligspesifikke forhold
- være lønnsomt med norske tariffer
- ikke gå merkbart utover brukerens komfort
- ikke føre til vesentlig økning i forbrukt energi
- være tilpasset norske forhold med en høy andel elektrisk oppvarming
- holde den totale effekten i systemet under valgt grense (Såfremt den er riktig satt i forhold til kundens forbruk)

7.3 Valg av metode for effektkontroll

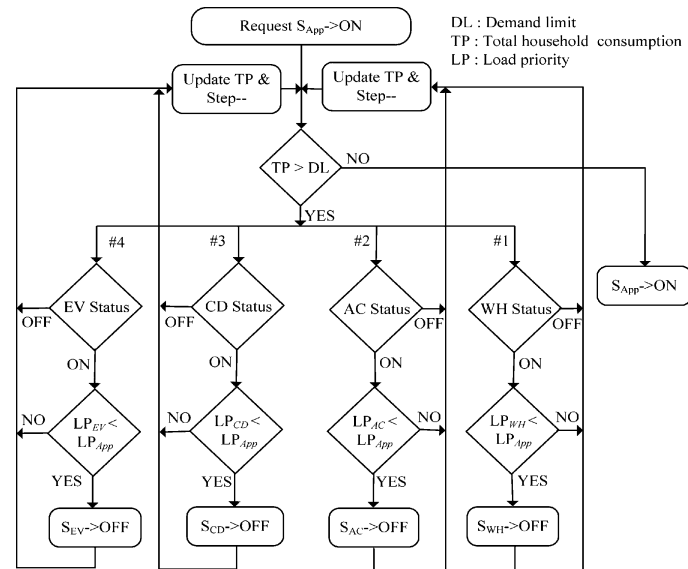
Ettersom målet er å lage et enkelt system som passer for ulike typer boliger og husholdningsapparater, uten tilgang på detaljert informasjon, velges ikke en løsning med kun optimalisert timeplan. For å løse store optimeringsproblemer kreves det også egnet programvare, noe som ikke er tilgjengelig i kontrolleren LM4. Det defineres likevel noen faste planlagte hendelser i systemet, for å dra nytte av fordeler med planlegging. Disse beskrives nærmere i kapittel 7.6.

Artikkel [8] er et godt utgangspunkt for et system som skal være tilpasset abonnert effekt. De ytre forespørslene om effektreduksjon kan modifiseres til å gjelde for hele døgnet istedenfor en begrenset periode. I tillegg er systemet fleksibelt når det gjelder å inkludere flere laster, og den eneste nødvendige informasjonen om systemet kan defineres av brukeren. Lastene som styres i [8] er en varmtvannsbereder, air-condition, tørketrommel og elbil. Algoritmen testes for en varm sommerdag i USA ved digitale simuleringer av en gjennomsnittlig amerikansk bolig. Det påpekes i konklusjonen at algoritmens potensiale begrenses av brudd på komfortpreferanser, i hovedsak økt temperatur ettersom air-condition i en periode er avskrudd. En norsk lastprofil med mange varmelaster kan tenkes å fungere bedre. Gulvvarme er for eksempel en tregere last enn air-condition, i tillegg til at det kan være flere varmelaster i et rom (eller en temperatursone), slik at ønsket temperatur i større grad kan opprettholdes.

På bakgrunn av argumentene over er det valgt å benytte algoritmestrukturen presentert i [8], *An Algorithm for Intelligent Home Energy Management and Demand Response Analysis*, som basis for utvikling av en effektkontrollalgoritme. Flytskjema for systemet og algoritmen for effektkontroll fra artikkelen er vist i figur 7.1 og 7.2. Det er gjort endringer for å tilpasse systemet til norske forhold, presentert i avsnitt 7.3.1. I tillegg er det inkludert funksjonalitet som i større grad sørger for at komfortbetingelser overholdes. Utvidelsene forklares kort i avsnitt 7.3.2, og mer detaljert i delkapittel 7.5 om effektkontrollalgoritmen.



Figur 7.1: Overordnet flytskjema for systemet i [8], der WH er varmtvannsbereider, AC er air-condition, CD er tørketrommel og EV er elbil.



Figur 7.2: Effektkontrollalgoritmen i [8].

7.3.1 Tilpasninger til norske forhold

- Hvis algoritmen implementeres med abonnert effekt, altså en konstant effektgrense hele døgnet, kan systemet få uheldige utfall dersom effektgrensen er satt for lavt. Lastene kan bli stående av en lang periode hvis den totale effekten er over tillatt grense. Når forbruket reduseres og lastene igjen kan skrues på, tillates ikke den kompenserende effekttoppen som er nødvendig for tilfredsstillende komfort. Lastene med lavest prioritet kan risikere å ikke bli skrudd på slik at for eksempel elbilen ikke er ferdig ladet til ønsket tidspunkt. Det kan også gi mer alvorlige utfall, som lav temperatur i bolig.
- Resultatene vil ikke basere seg på digitale simuleringer en varm sommerdag, men på tester utført i Smarthuset hvor det er forsøkt å simulere en vinterdag.
- Gulvvarme er en tregere last enn air-condition. Ved å implementere planlagt oppvarming før en forventet effekttopp, kan det bedre muligheten for å opprettholde komfort og at den totale effekten forblir lavere enn satt effektgrense.
- I artikkelen må lastene få tillatelse av algoritmen dersom de vil skru seg på. Varmtvannstanken må for eksempel få tillatelse til å koble inn varmeelementet. Dette vil ikke være

mulig dersom systemet skal fungere på tradisjonelle laster uten intelligens og mulighet for detaljert kontroll. I smarthuset er det termostater som kontrollerer om laster til oppvarming er av eller på, algoritmen kan kun overstyre ved hjelp av reléer. Det må derfor inkluderes ekstra funksjonalitet som skrur av laster dersom den totale effekten er større enn den abonnerte.

7.3.2 Forbedringer

- **Problem:** Laststyringsalgoritmen i artikkelen tvinger den totale effekten under forespurt effektgrense. Komfortpreferansene kommer i annen rekke og vil brytes dersom det er behov for å redusere total effekt ytterligere. Brukeren har ikke valget om å overholde effektgrensen eller betale kostnaden ved å overstige abonnert effekt for å sikre komforten. Dette kan føre til missnøye med styringssystemet.

Løsning: Det implementeres funksjonalitet som prioriterer komfort høyere enn effektgrensen. Brukeren velger det største tillatte temperaturavviket, og dersom det overskrides får ikke algoritmen lov til å skru av varmelasten. I stedet for varsles brukeren om høy effekt i systemet, slik at den kan velge å skru av ikke-fleksible laster. Ved å koble algoritmen opp mot et brukergrensesnitt hadde det også vært mulig å la brukeren velge om komfort eller effektgrense skal ha høyest prioritet.

- **Problem:** En last spør om å skru seg på, men effekten i systemet er for høy, så det tillates ikke. Lasten vil bli værende i løkken helt til effekten blir lav nok til at den får lov til å skru seg på. Dette betyr at den kan bli stående av lenge, noe som vil gå utover komforten og føre til unødvendig mye datatrafikk i systemet.

Løsning: Det legges inn funksjonalitet som hindrer at forespørselen blir værende i løkken. Hvis alle lastene har blitt forsøkt skrudd av, men effekten fortsatt er for høy går forespørselen ut av løkken. Komfortbetingelser for lasten undersøkes, og hvis de er kritiske skrur lasten på og brukeren varsles om at effekten i systemet er høy.

- **Problem:** Dersom den totale effekten i systemet er lavere enn den satte effektgrensen får laster lov til å skru seg på. En konsekvens er at den totale effekten igjen kan bli for høy

etter lasten skrus på, slik at algoritmen må kjøres på nytt for å skru av laster. Dette kan føre til hyppig veksling mellom av og på, noe som kan være et problem for spenningskvalitet, levetiden til komponentene og brannsikkerhet.

Løsning: Det legges inn et strengere effektkriterie for at laster skal få lov til å skru seg på. En last får kun lov til å skru seg på dersom den total effekten i systemet pluss lastens nominelle effekt er lavere en effektgrensen.

7.4 Algoritme for styring av laster

Styringsalgoritmen som har blitt utviklet begynner med å undersøke om komfortpreferansene og den abonnerte effekten satt av brukeren er tilfredsstilt. Dette gjøres hvert minutt. Dersom preferansene ikke er tilfredsstilte sendes forespørsel F1 om å skru på en last, eller F2 om å skru laster av, som illustrert i figur 7.3. Deretter kjøres effektkontrollalgoritmen vist i figur 7.5 som behandler forespørslene og skrur laster av og på.

7.4.1 Parametere

Konstanter

Konstantene i systemet, presentert i tabell 7.1, settes av brukeren.

Tabell 7.1: Konstanter i styringssystemet.

Konstant	Beskrivelse
$T_{s, \text{komfort}}$	Komforttemperatur i en gitt temperatursone (°C)
$T_{s, \text{spare}}$	Sparetemperatur i en gitt temperatursone (°C)
$\Delta T_{\text{komfort}}$	Den minste temperaturdifferansen mellom ønsket og målt temperatur, hvor varmelastene i rommet vil spørre om å skru seg på
$\Delta T_{\text{kritisk}}$	Den største temperaturdifferansen mellom ønsket og målt temperatur, som tillater at varmelaster i rommet kan skrues av
P_{abb}	Abonnert effekt (W)

For hver av de styrbare lastene velger brukeren prioritet, temperatursone og nominell effekt. I tillegg bestemmes bryterens fysiske adresse på bussen, men det gjøres automatisk eller av elektriker. Parameterene for de styrbare lastene er vist i tabell 7.2.

Tabell 7.2: Konstanter definert for alle de styrbare lastene i systemet.

Konstant	Beskrivelse
ad	Bryterens fysiske adresse på bussen
k	Lastens prioritet
rom	Temperatursonen lasten er plassert i
P	Lastens nominelle effekt (W)

For varmtvannsberederen defineres i tillegg en tidskonstant $t_{\text{oppvarmet}}$, som gjerne oppgis av produsenten og forteller hvor mange timer berederen bruker på å varme opp vannet 65 °C.

Kalenderfunksjonaliteten som er brukt i simuleringene er enkel og tar kun utgangspunkt i fire hendelser som styrer skiftet mellom komfort- og sparetemperatur:

1. Stå opp
2. Dra på jobb
3. Komme hjem fra jobb
4. Legge seg

Variable

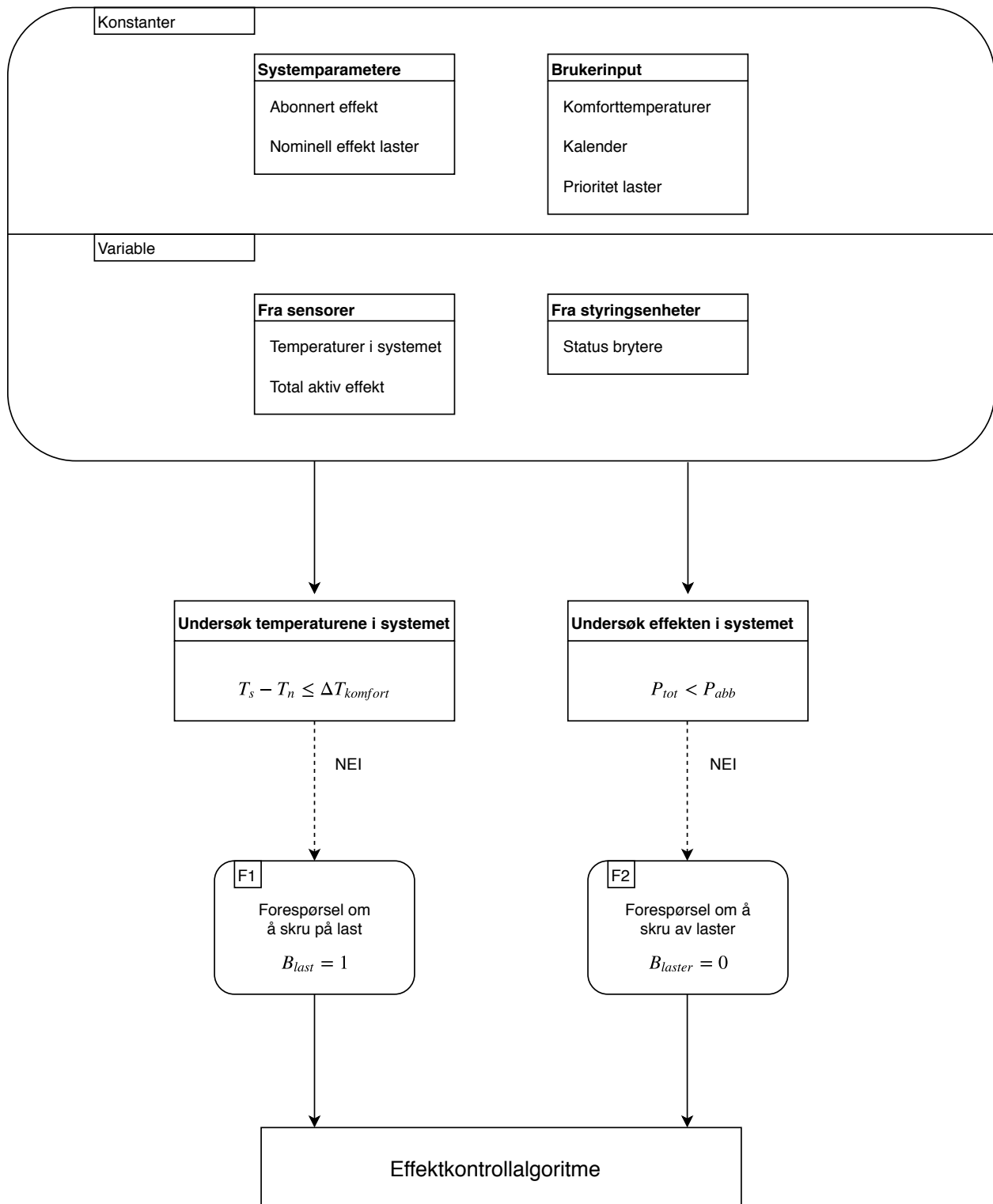
Tilstandsvariablene i systemet registreres av sensorer og sendes på bussen. Aktuelle variable er gitt i tabell 7.3. De styrbare lastene er koblet opp mot tilhørende relé, og temperaturen i rommet hvor de er plassert.

Tabell 7.3: Tilstandsvariable i systemet.

Variabel	Beskrivelse
T_n	Temperaturen i et gitt rom ved tidspunkt n
P_{tot}	Den totale aktive effekten (W) som forbrukes i systemet ved tidspunkt n
B_{last}	Statusen (av/på) til reléet som styrer en gitt last ved tidspunkt n

Vanntemperaturen i varmtvannsberederen er ukjent. For å kunne anslå om temperaturen er tilfredsstillende defineres en global variabel $t_{\text{sist oppvarmet}}$, som registrerer når berederen er fullt oppvarmet. Den aktuelle timen og dagen i året lagres i variabelen hver gang ligning 7.2 er tilfredsstillt.

7.4.2 Overordnet flytskjema



Figur 7.3: Overordnet flytskjema for styringsalgoritme

7.4.3 Forespørsel om redusert effekt

Dersom den totale effekten i systemet P_{tot} er større enn eller like stor som den abonnerte effekten P_{abb} , sendes en forespørsel om å skru av laster, $B_{last} = 0$. I figur 7.3, er forespørselen betegnet F2.

7.4.4 Forespørsel om å skru på varmelaster

Varmelastene sender en forespørsel om å skru seg på dersom strømtilførselen er brutt, $B_{last} = 0$, og temperaturkravet gitt i ligning 7.1 ikke er tilfredsstillt, altså hvis forskjellen mellom målt og ønsket temperatur er større enn $\Delta T_{komfort}$. Temperaturen T_s er enten $T_{s, komfort}$ eller $T_{s, spare}$ avhengig av tidspunktet på dagen. Forespørselen er illustrert i figur 7.3, hvor den har fått betegnelsen F1.

$$T_s - T_n \leq \Delta T_{komfort} \quad (7.1)$$

7.4.5 Forespørsel om å skru på varmtvannsbereder

I artikkel [8] kan varmeelementet i varmtvannsberederen skrues av eller på avhengig av temperaturen til vannet i berederen. Etersom styringssystemet i denne oppgaven også er beregnet for hjem uten smarte laster, vil vanntemperaturen antas å være ukjent. Algoritmen baserer seg istedenfor på virkemåten til en typisk bereder.

Vannet i varmtvannsberederen er fullt oppvarmet dersom bryteren er på og termostaten skrur av varmeelementet, uttrykt ved 7.2, der P_{vb} er effektforbruket til berederen.

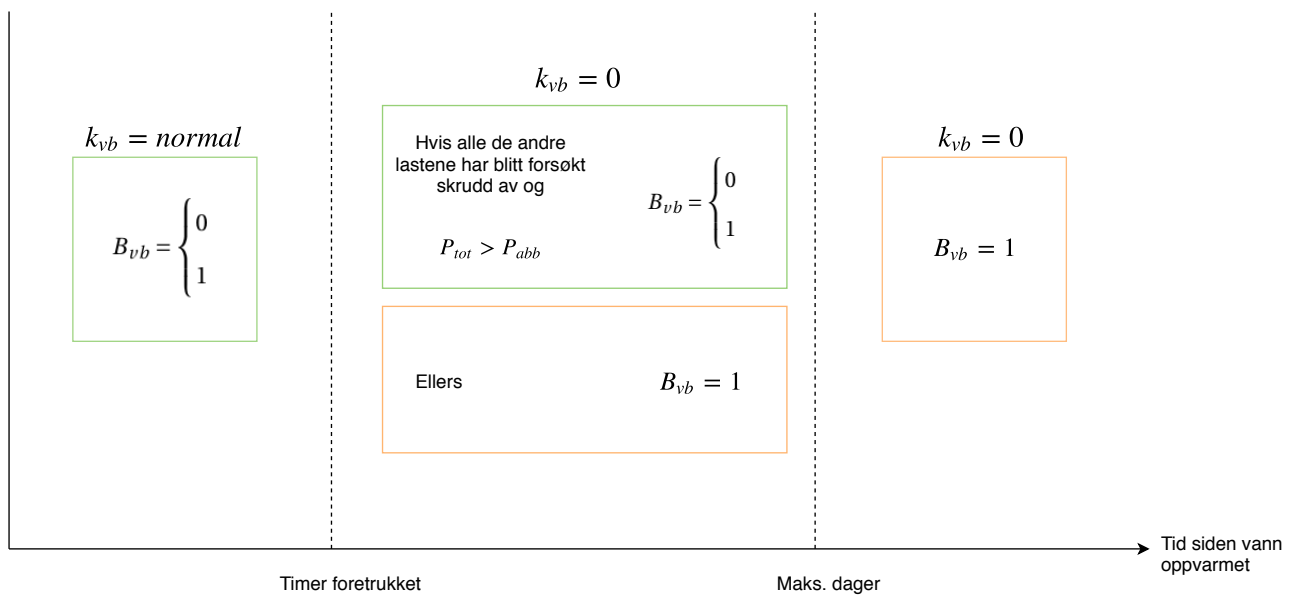
$$(B_{vb} = 1) \quad \& \quad (P_{vb} = 0) \quad (7.2)$$

Dette registreres ved å undersøke den totale effekten i systemet hvert femtende sekund. Dersom differansen tilsvarer den nominelle effekten til berederen, lagres tidspunktet i variabelen

$t_{sist\ oppvarmet}$. For å ta hensyn til unøyaktigheter i målingene, eller variabel effektforbruk for berederen, benyttes grensene beskrevet i ligning 7.3.

$$P_{vb} - 150 \leq P_{differanse} \leq P_{vb} + 150 \quad (7.3)$$

Selv om $B_{vb} = 0$ en lengre periode vil det ikke påvirke parametere som måles i systemet. Det må derfor implementeres annen funksjonalitet, som gjør at koden sender en forespørsel om å skru på igjen B_{vb} . Dette gjøres ved å definere tre tidsintervaller som bestemmer hvordan varmtvannstankens bryter og prioritet skal oppføre seg basert på hvor lenge det er siden vannet var fullt oppvarmet. De tre tidsintervallene er vist i figur 7.4.



Figur 7.4: Tidsintervaller for bestemmelse av varmtvannsberederens prioritet og bryterstatus

Tidsintervall 1 er uttrykt ved ligning 7.4. Tiden det tar å varme opp tanken er trukket fra 24 timer som representerer anbefalt oppvarmingsintervall på minst en gang i døgnet.

$$\text{Timer foretrukket} = 24 - t_{oppvarmet} \quad (7.4)$$

Dersom tidspunktet vannet sist var fullt oppvarmet befinner seg innenfor det første interval-

let, har algoritmen alltid tillatelse til å kutte strømmen til berederen, $B_{vb} = 0$. Det sendes ikke forespørsel om å skru på strømtilførselen.

I tidsintervallet mellom *Timer foretrukket* og *Maks dager* har algoritmen betinget mulighet til å kutte strømmen. Dersom den totale effekten i systemet er høyere enn P_{abb} og alle de andre lastene har blitt forsøkt skrudd av, kan berederen kobles ut. Dette gjennomføres ved å gi varmtvannsberederen høyest prioritet, det vil si 0. Deretter sender berederen forespørsel om å skru seg på. Dette er likt som for varmelastene, altså forespørsel F1.

Det tredje tidsintervallet betegner tidspunkter som er lenger siden enn *Maks dager*, satt til 6. I dette intervallet får algoritmen aldri lov til å skru av strømtilførselen til berederen, altså er $B_{vb} = 1$. På den måten tilfredsstilles kravet om at vannet må være fullt oppvarmet minst en gang i uka.

7.5 Effektkontrollalgoritme

Effektkontrollalgoritmen skruer av laster etter prioritet, for å sikre at effekten i systemet holder seg under en gitt grense. Det tas også hensyn til komfort ved å ikke tillate at laster skrur av dersom temperaturen i rommet er for lav, eller det er for lenge siden vannet i varmtvannsberederen har vært fullt oppvarmet.

Algoritmen kjøres dersom betingelsene illustrert i figur 7.3 ikke er tilfredsstillt, slik at F1 eller F2 blir forespurt. Som vist i figur 7.5 settes forskjellige verdier for variablene P_l (effekt) og k_l (prioritet) avhengig av forespørsel. F1 definerer variablene basert på egenskapene til lasten som ønsker å skru seg på. I F2 handler forespørselen kun om å skru av laster, effekten P_l settes derfor lik 0. Prioriteten k_l defineres også lik 0, som tilsvarer en last med høyeste prioritet. Inkrementeringsvariabelen i algoritmen settes lik antall styrbare laster i systemet, $pri = \text{Antall laster}$.

Det neste steget er å undersøke om effekten i systemet er for høy $P_{tot} \geq P_{abb}$ (F2), eller om den vil bli for høy dersom den forespurte lasten får tillatelse til å skru seg på $P_{tot} + P_l \geq P_{abb}$ (F1). Hvis det er tilfellet går algoritmen inn i den delen som skruer av laster. Ved første iterasjon er pri lik prioriteten til lasten med lavest prioritet, som tilsvarer varmtvannsberederen for systemet vist i figur 7.5. Algoritmen undersøker om den har tillatelse til å skru av varmtvannsberederen. Betingelsene for $B_{vb} = 0$, er som illustrert i figur 7.4. For det første må berederen i utgangspunktet være avskrudd. Deretter undersøkes komfortbetingelsene som er beskrevet i avsnitt 7.5.1, og om prioriteten til lasten som ønsker å skru seg på er høyere (lavere nummer, prioritet 1 er høyere enn prioritet 2) enn prioriteten til varmtvannsberederen. Kontrolleren gir beskjed til reléet om å skru av B_{vb} dersom alle punktene er tilfredsstillt. Inkrementeringsvariabelen reduseres med én, $pri = pri - 1$, og effekten i systemet undersøkes på nytt.

I prioritert rekkefølge, fra lavest til høyest, kjører algoritmen gjennom løkken og skruer av laster helt til effekten er lav nok til at den forespurte lasten kan skru seg på. Dette vil ikke alltid være mulig, enten på grunn av begrensende komfortbetingelser, at lasten har lav prioritet, eller høyt forbruk som følge av ikke-fleksible laster. Tre mulige utfall av algoritmen er forklart i avsnitt 7.5.2.

7.5.1 Betingelser for å skru av laster

Varmelaster

En betingelse for laveste aksepterte komfort inkluderes i algoritmen for å hindre store avvik fra ønsket temperatur. På den måten vil algoritmen i større grad prioritere brukerens innstillinger, enn i artikkel [8]. Maksimal differanse mellom valgt temperatur T_s og temperaturen T_n i tidspunkt n , defineres ved ligning 7.5.

$$T_s - T_n \leq \Delta T_{kritisk} \quad (7.5)$$

Ved forespørsel om å skru av en varmelast, undersøkes 7.5 for tilhørende temperatur. Dersom betingelsen ikke er tilfredsstillt, kan ikke lasten skrues av. Algoritmens fleksibilitet og mulighet for effektreduksjon vil bli større ved å øke tillatt differanse ΔT .

Varmtvannsbereder

Tiden siden vannet var fullt oppvarmet må befinne seg innenfor tidsintervall en eller to, som beskrevet i avsnitt 7.4.5, dersom algoritmen skal få tillatelse til å skru av varmtvannsberederen. I tidsintervall to må inkrementerinsvariabelen *pri* være lik null, det vil si at alle de andre lastene må være forsøkt skrudd av, før det tillates å bryte strømmen, $B_{vb} = 0$. I tidsintervall nummer en har algoritmen alltid tillatelse til å skru av varmtvannsberederen.

Tidsforsinkelse

Den totale effekten som brukes i systemet leses via bussen fra energimåleren. Verdien som registreres i kontrolleren LM4 har en forsinkelse på mellom 5 og 15 sekunder. For å ta hensyn til dette i algoritmen legges det inn en tidsforsinkelse på 15 sekunder. Denne hindrer at programmet inkrementerer prioriteringsvariabelen og kjører gjennom $P_{tot} + P_{last} > P_{abb}$, før den nyeste verdien av P_{tot} er registrert. Dette vil gjøre kodens reaksjonstid noe tregere, men sørger for at ikke flere laster enn nødvendig skrues av før den forespurte lasten får tillatelse til å skru seg på.

7.5.2 Utfall av algoritmen

Utgang 1

Utgang 1 er det ønskede utfallet av algoritmen, hvor den forespurte lasten får lov til å skru seg på og effekten i systemet er under ønsket grense. Algoritmen velger utgang 1 dersom summen av den totale effekten i systemet og effekten til lasten som ønsker å skru seg på er mindre enn den abonnerte effekten, $P_{tot} + P_{last} \leq P_{abb}$. Ved forespørsel F1 betyr det at effekten i systemet er lav nok til at lasten får lov til å skru seg på, altså er $B_{last} = 1$. Dersom forespørselen er F2 settes $P_{last} = 0$. Utgang 1 betyr nå at forespørselen om redusert effekt er tilfredsstillt, altså $P_{tot} < P_{abb}$.

Utgang 2

Utgang 2 er utfallet av algoritmen dersom den forespurte lasten har fått tillatelse til å skru seg på selv om effekten i systemet er for høy. Effektkontrollalgoritmen har iterert over alle de fleksible lastene, $p_{ri} < 0$, men P_{tot} er fortsatt større enn P_{abb} . Dermed vil den sjekke om de kritiske betingelsene for lasten i F1 er tilfredsstillt, altså om temperaturen i det tilhørende rommet er kritisk lav. Hvis det er tilfellet skrur lasten på, $B_{last} = 1$. For forespørsel F2, betyr utgang 2 at algoritmen ikke har mulighet til å skru av flere laster og $P_{tot} > P_{abb}$. Dersom algoritmen tar utgang 2 vil det være naturlig å varsle brukerne om at effekten i systemet er høy slik at de kan vurdere å skru av ikke-fleksible laster som er i bruk.

Utgang 3

Utgang 3 betyr at den forespurte lasten ikke får tillatelse til å skru seg på, ettersom effekten i systemet vil bli for høy, $P_{tot} + P_{last} \geq P_{abb}$. Utfallet er kun mulig for F1. Som for utgang 2 har algoritmen prøvd å skru av alle lastene, men den totale effekten vil fortsatt bli for høy. Komfortbetingelsene undersøkes, men er ikke kritisk lave for lasten, altså kan den ikke skru seg på, $B_{last} \neq 1$.

7.6 Planlagte hendelser

7.6.1 Natt- og dagsenking

Det legges inn natt- og dagsenking i systemet, som styres av kalenderdefinerte tidspunkter. Termostaten på romoppvarmingslastene senkes med 5 °C i løpet av natta og midt på dagen når kalenderen forteller at beboerne er på jobb. For å sikre at temperaturen i boligen er komfortabel når beboerne kommer hjem, settes lastene i komfortmodus en gitt tid før. Hvor lang tid som er nødvendig for å heve temperaturen med 5 °C vil avhenge av hvor stor effekt (kW) lastene har, varmetap og varmekapasiteten til gulv og vegger.

7.6.2 Styring før perioder med høy belastning

Morgenen og ettermiddagen er typiske perioder med høy belastning, hvor det benyttes effekt-krevende laster som ikke er fleksible. Dersom effekttoppene skal kuttes i disse periodene uten at det går merkbart utover temperaturen i boligen, kan et tiltak være planlagt innkobling av fleksible laster. Dette gjelder spesielt varmtvannsberederen, som ikke vil spørre om å skru seg på før det har gått flere timer siden vannet var fullt oppvarmet. Ved å skru på strømmen til berederen før forventede høylastperioder, varmes vannet helt opp, slik at berederen kan stå av i en lengre periode og på den måte bidra til at den totale effekten holdes under ønsket grense.

Kapittel 8

Testscenarier

Testene av algoritmen kjøres i Smarthuset. En vilkårlig ukedag simuleres for en husstand med tre personer. Det innebærer at alle i husstanden drar til jobb eller skole i løpet av dagen, og er hjemme på ettermiddagen og kvelden. For å simulere effektbruken benyttes lastene prestentert i kapittel 6.3. Et fast bruksmønster defineres og gjennomføres likt i alle simuleringene. Den abonnerte effekten varieres for å se hvordan det påvirker temperaturen i rommene, samt total effekt- og energibruk. I tillegg gjøres det simuleringer med og uten dagsenking av temperaturen.

I dette kapitlet presenteres

- valg av komforttemperaturer
- forbruksscenario
- de gjennomførte simuleringene

Forbruksscenarioet innebærer hvilke tidspunkter de forskjellige lastene brukes, og hvor lenge.

8.1 Temperaturforhold

8.1.1 Bruk av varmepumpe for å simulere effektbehov en vinterdag

Dagene med høyest nettbelastning i løpet av året foregår på kalde vinterdager, gjerne i januar og februar. For å undersøke algoritmens potensiale er det derfor ønskelig å simulere en vinterdag i januar. Ettersom simuleringene i realiteten foregår midt i juni, benyttes to varmepumper (air-condition) som senker temperaturen i gangen og på kjøkkenet. Den kalde luften fra pumpene simulerer varmetap og sørger for at varmelastene må være på for å unngå temperaturfall. Settemperaturen for varmepumpen velges 2 °C under komforttemperaturen. Dersom $T_{s, varmepumpe}$ settes lavere klarer ikke varmelastene å varme opp Smarthuset til ønsket komforttemperatur.

Bruk av varmepumper for å senke temperaturen er ikke basert på beregninger av kjøleeffekt eller faktiske varmetap i Smarthuset. De benyttes kun for å øke effektbehovet til oppvarming slik at testforholdene muligens ligner mer på en vinterdag. Strøm til varmepumpene hentes fra en forsyning utenfor Smarthuset, så effekten som trengs for å drifte de er ikke inkludert i den totale effekten som måles av energimåleren.

8.1.2 Komforttemperatur

Komforttemperaturen som brukes i simuleringene er valgt på bakgrunn av diagrammet for optimal operativ temperatur, vist i figur 3.2. Det antas et aktivitetsnivå mellom stillesittende og avslappet stående, som tilsvarer 1-1,2 clo. Innendørs vinterbekledning har isolasjonsevnen 1,0 met, som illustrert i tabell 3.2. Dette gir en optimal operativ temperatur på rundt 22 °C. Lufttemperaturene $T_{komfort, kjøkken}$ og $T_{komfort, gang}$ som settes for de respektive termostaterne velges derfor lik 22 °C. På grunn av strålingstemperatur kan operativ temperatur avvike flere grader fra lufttemperaturen, som beskrevet i ligning 3.1. Den valgte komforttemperaturen er derfor kun et utgangspunkt for å undersøke i hvilken grad algoritmen fører til avvik fra ønsket temperatur.

Strålingstemperatur og trekk måles ikke i simuleringene ettersom luften fra varmepumpene vil påvirke målingene og dermed gi et uriktig bilde av den operative temperaturen. Det kan

også tenkes at målt tørrkuletemperatur blir påvirket ettersom varmpumpen er plassert over døren på kjøkkenet slik at termometeret registrerer temperaturen til den kalde luften fra varmpumpa, før den blander seg med varm luft i rommet. Det er ikke tilstrekkelig å kun måle tørrkuletemperaturen for å avgjøre om betingelser for termisk komfort er tilfredsstillende, men det kan gi en pekepinn på hvordan temperaturen påvirkes.

8.2 Basisscenario

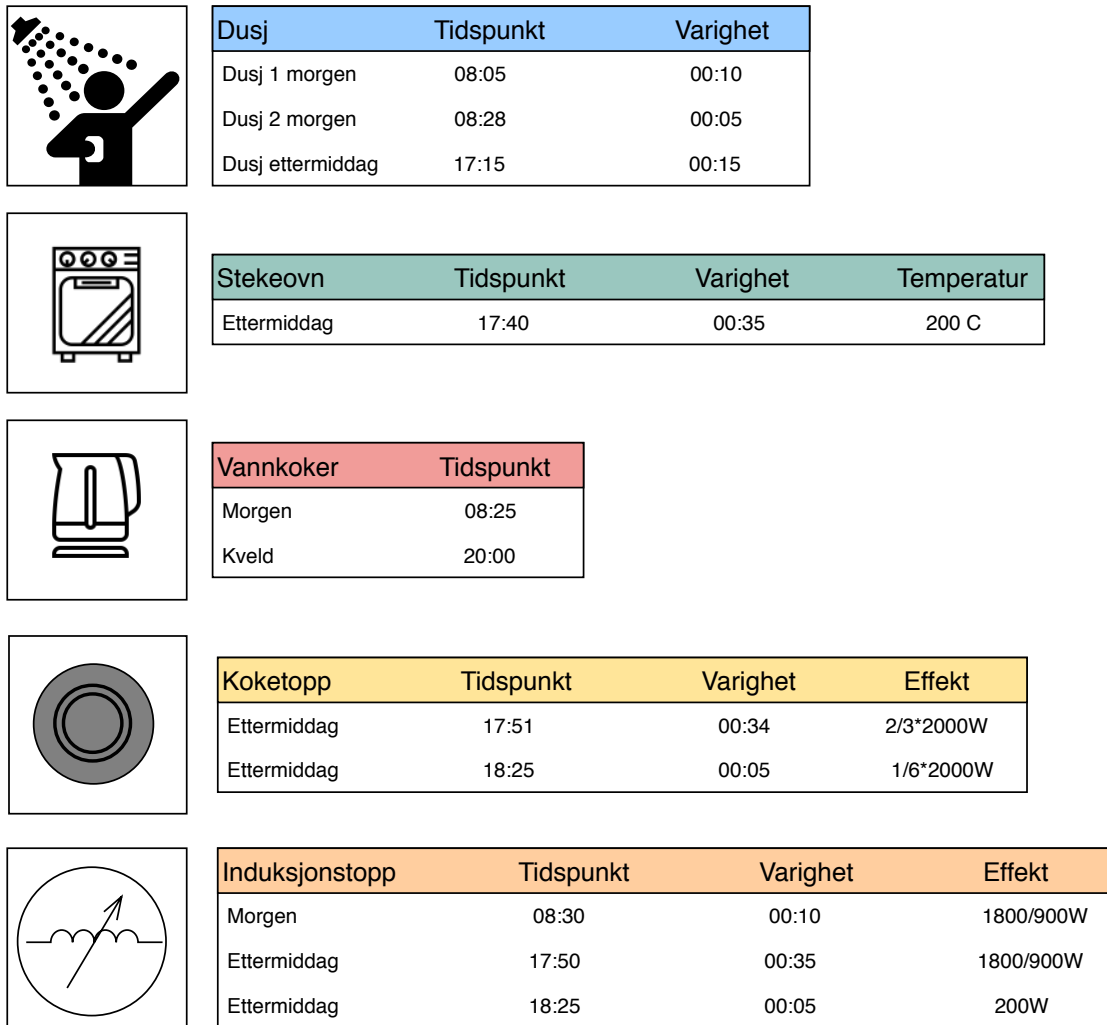
Simuleringene har som mål å etterligne hverdagsforbruk i en typisk norsk husholdning, der effektbruken har en topp på morgenen og igjen på ettermiddagen og kvelden, som illustrert i figur 4.1. Det er tatt utgangspunkt i laster som over 50 % av deltakerene i Sikom sin undersøkelse (figur 4.2) har hjemme og på hytta, nemlig varmtvannsbereder, platetopp, stekeovn, panelovn og gulvvarme. I tillegg benyttes en vannkoker. Det er en vanlig husholdningslast med en effektprofil som samtidig kan representere andre kjøkkenartikler med kort brukstid og nominell effekt i området 1000-2000 W, som for eksempel mikrobølgeovn, kaffetrakter eller brødrister. Over 90% svarte også at de har vaskemaskin og oppvaskmaskin hjemme, men det var ikke installert i Smarthuset på simuleringstidspunktet, og ble derfor ikke inkludert.

Alle simuleringene baserer seg på det samme brukerscenariet, som består av følgende hendelser:

- temperaturendring mellom komfort- og sparetemperatur
- slukking og tenning av lys
- dusjing
- koking av vann i vannkoker
- koking av vann på tradisjonell koketopp og induksjonstopp.
- bruk av stekeovn

8.2.1 Bruksprofil for ikke-fleksible laster

De fiktive beboerne i Smarthuset er hjemme en time fra de står opp til de drar på jobb. I løpet av den tiden dusjer to av dem, for så å koke 1,7 liter vann i vannkokeren og tilberede mat i ti minutter på induksjonstoppen. Matlagingen simuleres ved å varme en liter vann til kokepunktet ved maksimal effekt, for deretter å koke ved halv effekt den resterende tiden. På ettermiddagen er det aktivitet i leiligheten fra fem, til beboerne legger seg klokka elleve. En av dem dusjer, i tillegg til at det lages middag i litt under en time. Stekeovnen varmes opp til 200 °C og blir stående på hele perioden. En liter vann varmes på koketoppen ved to tredjedeler av maksimal effekt og på induksjonstoppen med tilsvarende forløp som på morgenen. Fullstendig oversikt over bruksmønsteret til de ikke-fleksible lastene er illustrert i figur 8.1.



Figur 8.1: Basisscenario, hendelser for de ikke-fleksible lastene.

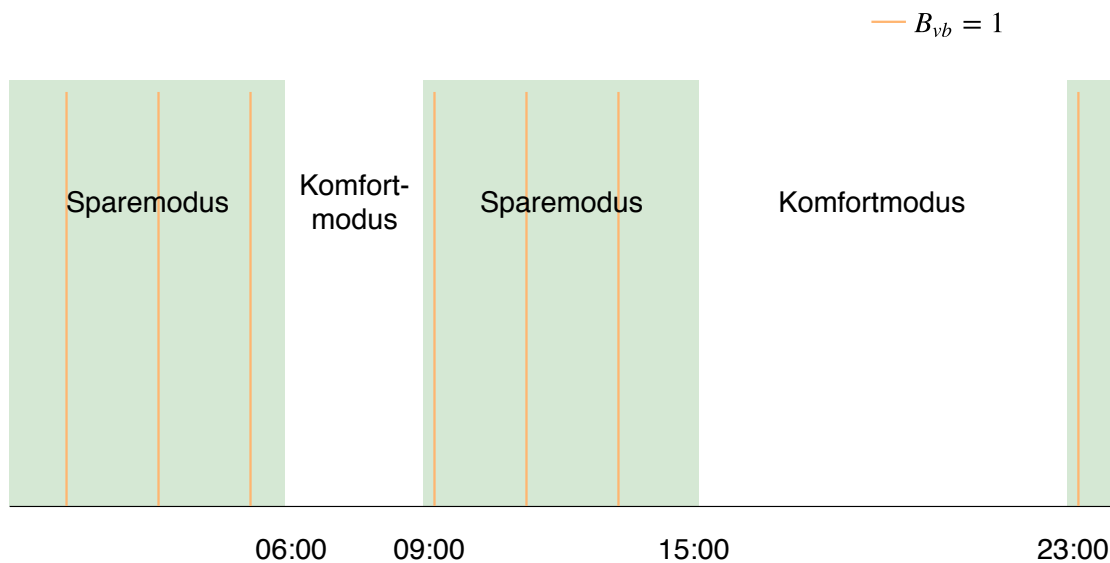
8.2.2 Sparemodus

Varmelastene på kjøkkenet og i gangen settes i sparemodus når beboerne ikke er hjemme. Det gjøres ved å redusere sett-temperaturen på termostatene med 5 °C, til 17°C. Kalenderen til beboerne er illustrert i tabell 8.1.

Tabell 8.1: Kalender for beboerne i Smarthuset.

Tidspunkt	Hendelse
08:00	Stå opp
09:00	Dra på jobb
17:00	Komme hjem fra jobb
23:00	Legge seg

To timer før de står opp eller kommer hjem fra jobb, altså klokka seks på morgenen og tre på ettermiddagen, settes lastene tilbake i komfortmodus. De grønne feltene i figur 8.2 representerer tidspunktene for når lastene er i sparemodus. Bryteren til varmtvannsberederen skrur på 15 minutter inn i hver spareperiode og videre hver andre time, markert av de oransje linjene. Formålet med å skru på berederen når beboerne ikke er hjemme, er at vannet skal være ferdig oppvarmet til de kommer hjem og begynner å bruke andre laster, som igjen kan føre til at berederen skrur av.



Figur 8.2: Tidspunktene når varmelastene er i sparemodus illustreres av de grønne feltene. De vertikale linjene viser når bryteren til varmtvannsberederen skrur seg på.

8.3 Testscenarier

Effektgrensene som testes i Smarthuset er presentert i tabell 8.2. Det er valgt verdier mellom 10 kW og 3,5 kW for å simulere ingen, moderat og betydelig kontroll av lastene. Utvalgte effekt-grenser er også testet uten dagsenking, for å simulere en fridag, eller et hjem som ikke benytter dagsenking.

Tabell 8.2: Scenariene som har blitt testet i Smarthuset.

Scenario	Effektgrense (W)	Natt- og dagsenking	Kun nattsenking
Basis	10000	X	
1	6000	X	
2	5500	X	
3	4500	X	
4	3500	X	
5	10000		X
6	5500		X
7	4500		X

Prioriteringsrekkefølgen som ble benyttet i scenarioene, for de fleksible lastene, er beskrevet i tabell 8.3.

Tabell 8.3: Valgt prioritering for de fleksible lastene i testscenariene.

Prioritet	Last
1	Varmefolie på kjøkken
2	Panelovn
3	Varmefolie i gang
4	Varmekabler på bad
5	Varmtvannsbereder

For alle testscenariene er temperatursjiktene vist i tabell 8.4 benyttet. Varmelastene vil spørre om å skru seg på når temperaturen avviker 0,5 °C fra komforttemperaturen, og vil ikke få lov til å skru seg av dersom avviket er 5 °C eller større.

Tabell 8.4: Parametere benyttet i testscenariene.

Parameter	Verdi
$\Delta T_{komfort}$	0,5 °C
$\Delta T_{kritisk}$	5 °C

Kapittel 9

Resultater

Resultatene i dette kapitlet er basert på simuleringene beskrevet i kapittel 8, som har blitt utført i Smarthuset.

I dette kapitlet presenteres

- effektprofil og temperaturer i Smarthuset for scenariene i tabell 8.2
- reduksjon av energi og maksimal effekt med og uten dagsenking
- endring i nettleie når effektkontrollsystemet benyttes
- estimert tilbakebetalingstid for styringssystemet

9.1 Måleresultater

I dette kapitlet presenteres resultatene for testscenariene presentert i tabell 8.2. Måleresultatene består av målt effektprofil, temperaturer og beregnet kostnad. Tariffene beskrevet i kapittel 5.2 er brukt for å beregne nettleie. Den månedlige kostnaden estimeres ved å multiplisere nettleien for den simulerte dagen med antall dager i januar.

Alle grafene som viser total aktiv effekt har en oransje linje som markerer den satte effektgrensen P_{abb} . For temperaturgrafene representerer den grønne linja temperaturgrensen for når lastene kan skrus av $T_{s,komfort} - \Delta T_{kritisk}$, som i dette tilfellet er lik temperaturen i sparemodus $T_{s,spare}$. De oransje linjene viser sjiktet med ønsket komforttemperatur, altså $T_{s,komfort} - \Delta T_{komfort}$. I gangen og på kjøkkenet ligger temperaturen utenfor komfortsjiktet, rundt 20°C, store deler av døgnet. Dette skyldes den kalde luften fra varmepumpene, og er ikke et resultat av brutt komfort som følge av effektkontrollalgoritmen. Simulering med varmepumpe gjør det derfor vanskeligere å bedømme konsekvensene algoritmen har for den ønskede komforten. Temperaturen på badet ligger litt under komfortsjiktet ettersom komforttemperaturen styres av en termostat med gulvføler, men registreres av en termometer i rommet. De grønne feltene i grafene viser periodene hvor systemet er i sparemodus, det vil si dag- og nattsenking. På badet er temperaturen alltid i komfortmodus, så derfor har temperaturgrafene fra badet ikke grønne felter. Det samme gjelder glassgården.

9.1.1 Basisscenario

Basisscenariet har en effektgrense på 10kW. Det er høyt nok til at effektkontrollalgoritmen aldri aktiveres (forutsatt at varmtvannsberederen ikke skrur seg på idet den høyeste effekttoppen inntreffer), som vil si at Smarthuset i praksis ikke har et smart styringssystem. Den resulterende effektprofilen, samt temperaturen i og utenfor huset er vist i figur 9.1.

Effekt og energi

Fra grafen med total aktiv effekt i figur 9.1 er den maksimale effekten, total energi, samt energi i perioden 06:00-20:00 beregnet. Resultatene er presentert i tabell 9.1.

Tabell 9.1: Målt energi og effektforbruk i basisscenariet.

Maksimal effekt	9205 W
Total energi	52,65 kWh
Energi 06-20	40,45 kWh

Kostnader

Beregnet månedlig nettleie basert på målt effekt og energi vises i tabell 9.2.

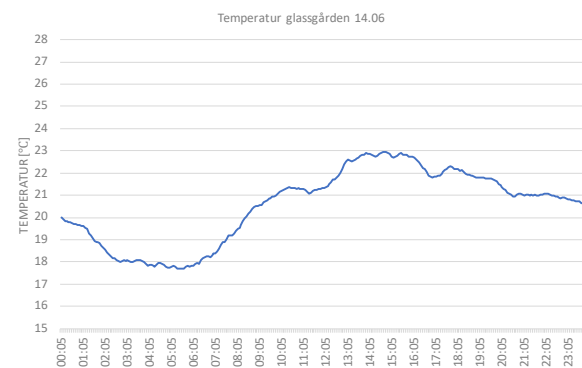
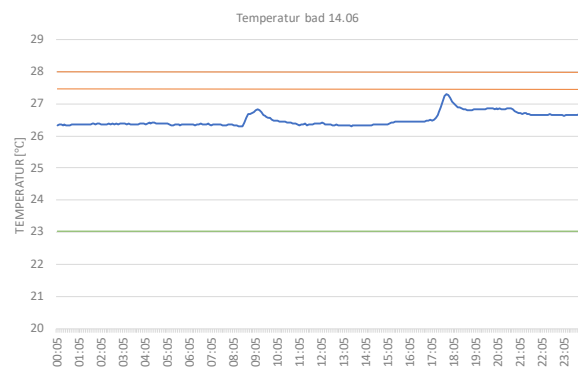
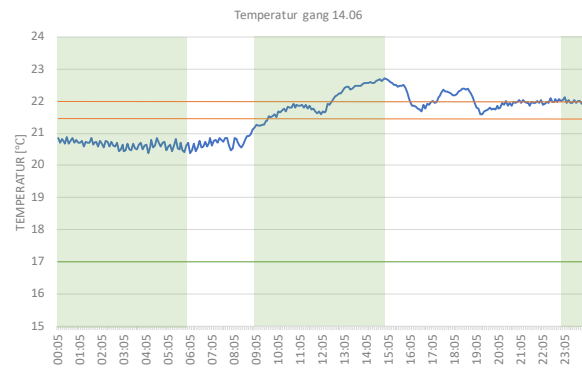
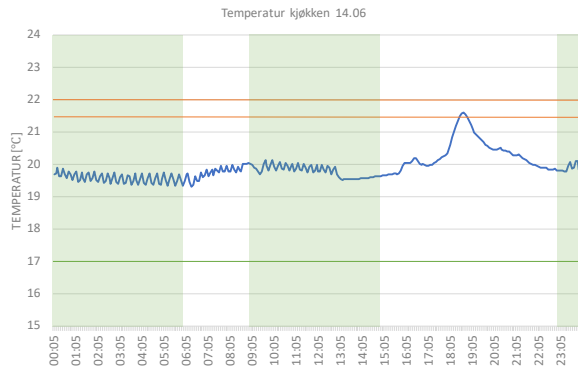
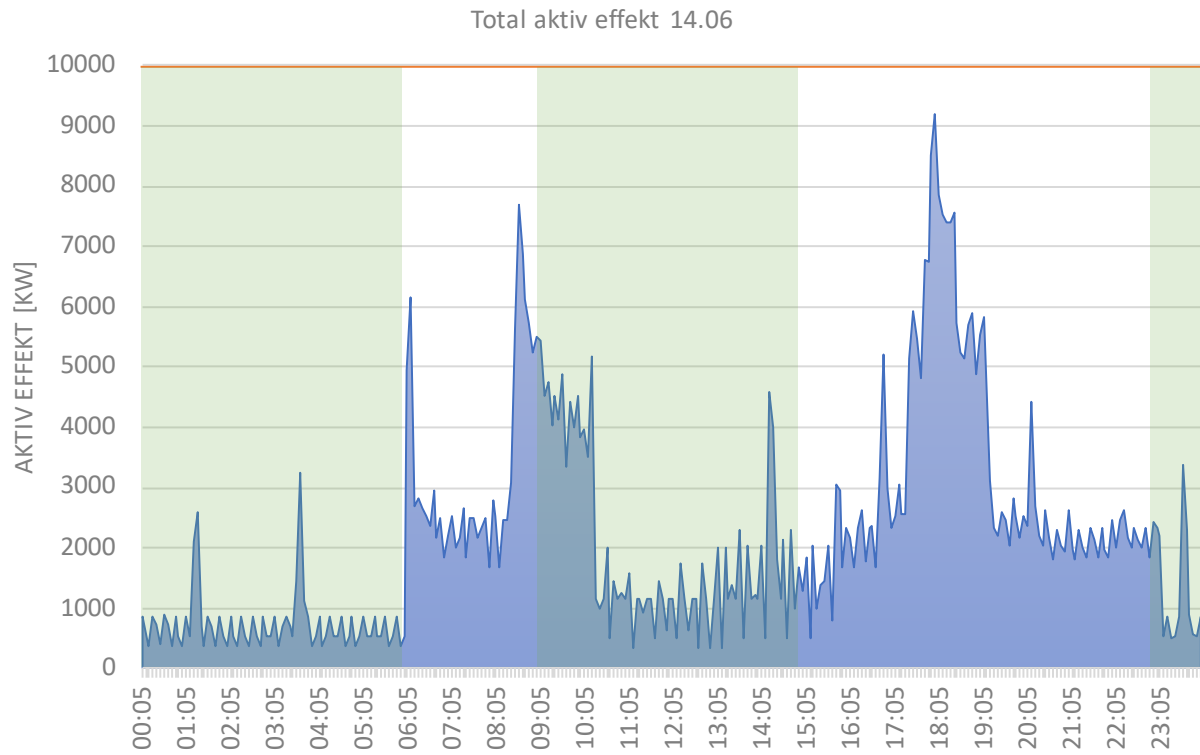
Tabell 9.2: Månedlig nettleie for P_{abb} lik 10 kW.

Energitariff	Time-of-use	Abonnert effekt
462 kr	680 kr	744 kr

Kommentarer

Figur 9.1 viser en klar sammenheng mellom temperaturen i gangen og glassgården. På ettermiddagen fra klokka ett til fire ligger temperaturen mellom 22 og 23 °C. Dette er ikke realistisk for et vinterscenario ettersom temperaturen skulle sunket når sparemodus med $T_s=17^\circ\text{C}$ er aktivert. Den høye temperaturen fører til mindre energibehov for oppvarming enn hva det sannsynligvis ville vært en januardag.

Simuleringen startet 20 minutter for sent, altså 08:20 på grunn av problemer med å komme seg inn i Smarthuset. Termostatene ble satt i komfortmodus 30 minutter for sent etter dagsenking, altså 15:30, hvilket kan medføre noe lavere energiforbruk.



Figur 9.1: Resultater basisscenario

9.1.2 Scenario 1

Parametere

Effektgrensen i scenario 1 er på 6 kW. Det tilsvarer at alle varmelastene og én kritisk last kan være på samtidig, uten at grensen brytes. Eventuelt kan stekeovnen og de to koketoppene kjøres på maksimal effekt samtidig, med alle de fleksible lastene avskrudd.

Effekt og energi

Total energi og maksimale effekt for scenario 1, vist i tabell 9.3, er beregnet fra profilen presentert i figur 9.2.

Tabell 9.3: Målt energi og effekt i scenario 1.

Maksimal effekt	6074 W
Total energi	58,17 kWh
Energi 06-20	40,96 kWh

Kostnader

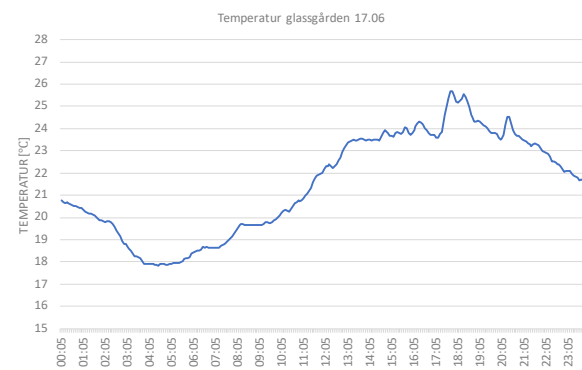
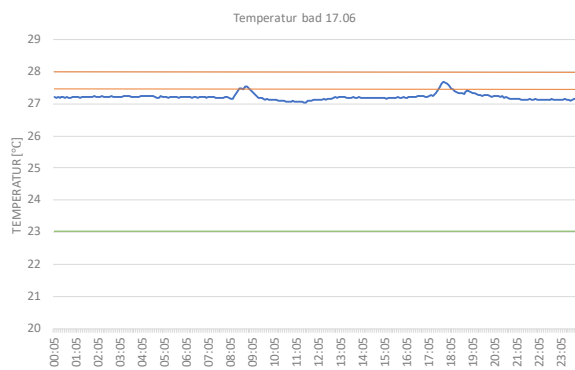
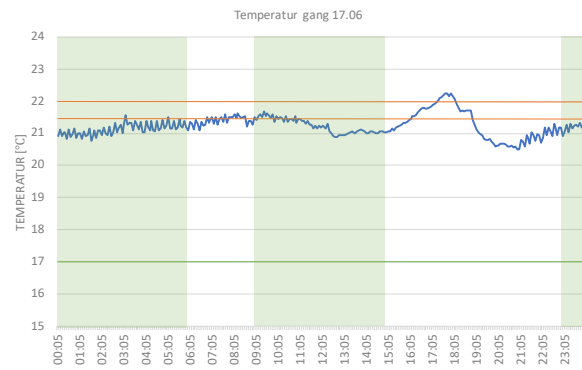
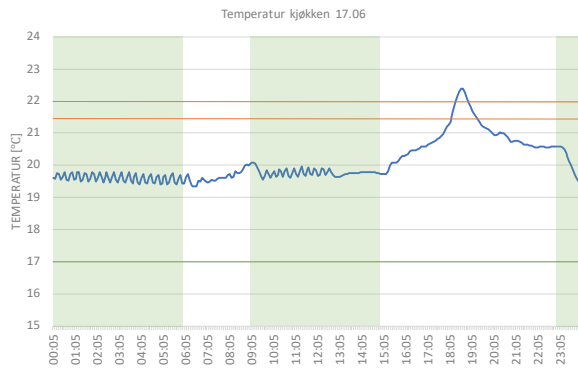
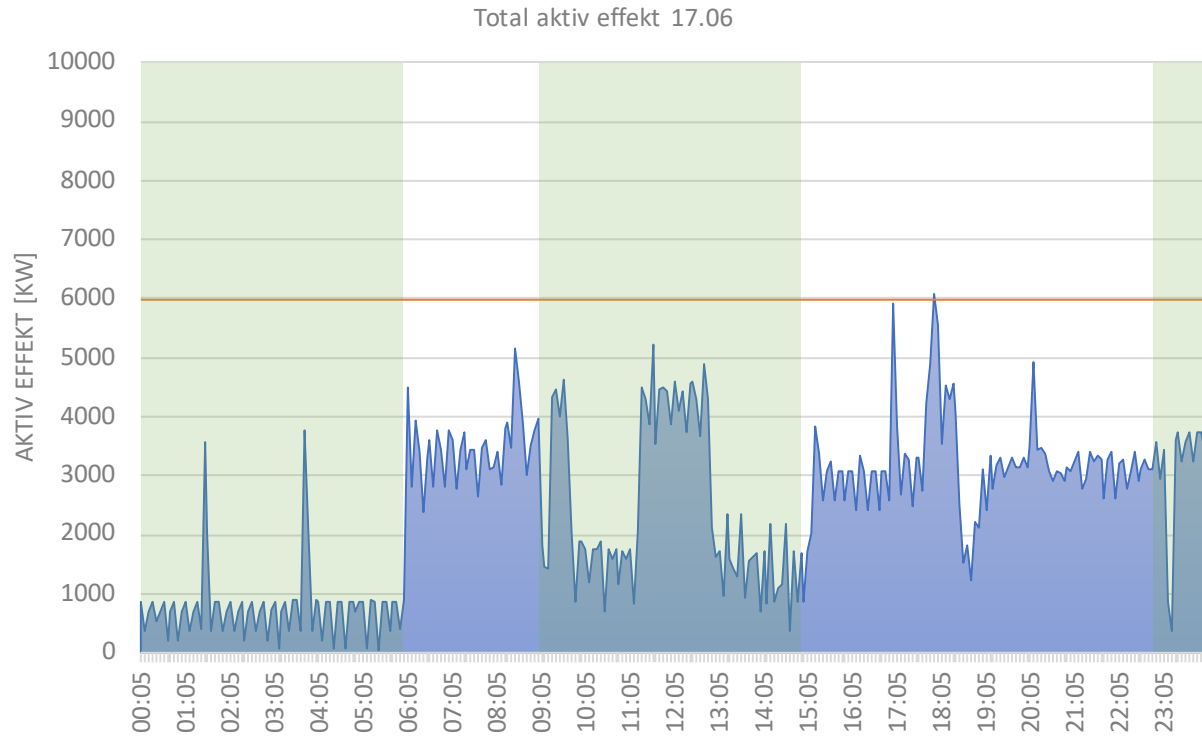
Den beregnede nettleien er vist i tabell 9.4.

Tabell 9.4: Månedlig nettleie for P_{abb} lik 6000W.

Energitariff	Time-of-use	Abonnert effekt
496 kr	709 kr	523 kr

Kommentarer

Som det fremkommer av figur 9.2 har temperaturen på kjøkkent og badet en topp som sammenfaller med temperaturøkningen i glassgården. På badet er temperaturen stabil, og ser ikke ut til å være påvirket av effektgrensen. Effekttoppen mellom 11:15 og 13:00 skyldes varmtvannsberederen. Vannet varmes opp etter dusjene på morgenen, når berederen ikke fikk tillatelse til å skru seg på.



Figur 9.2: Resultater scenario 1

9.1.3 Scenario 2

Parametere

Effektgrensen benyttet i scenario 2 er på 5,5 kW. Det betyr at alle varmelastene og stekeovnen kan benyttes samtidig med maksimal effekt. Andre mulige kombinasjoner med total belastning under grensen er stekeovn og koketopper, eller panelovn, varmemefolie kjøkken og vannkoker.

Effekt og energi

Total energi og maksimale effekt for scenario 2, vist i tabell 9.5, er beregnet fra profilen presentert i figur 9.3.

Tabell 9.5: Målt energi og effekt i scenario 2.

Maksimal effekt	5747 W
Total energi	58,20 kWh
Energi 06-20	38,76 kWh

Kostnader

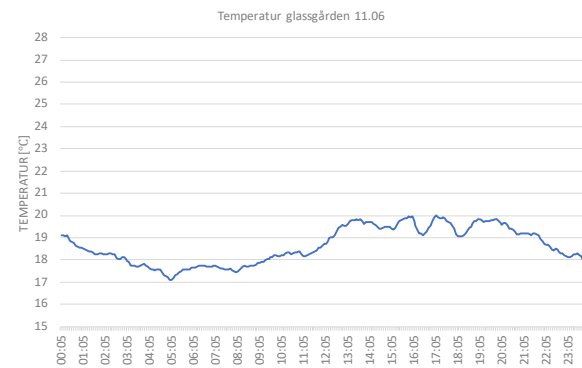
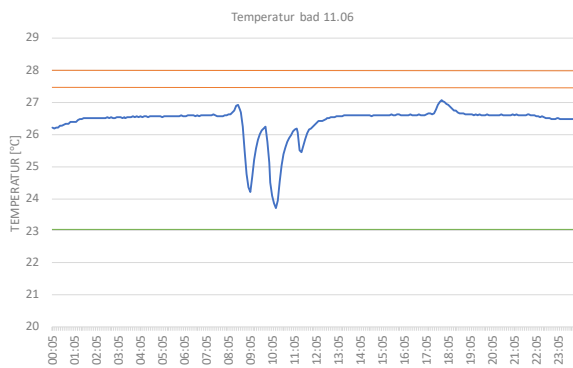
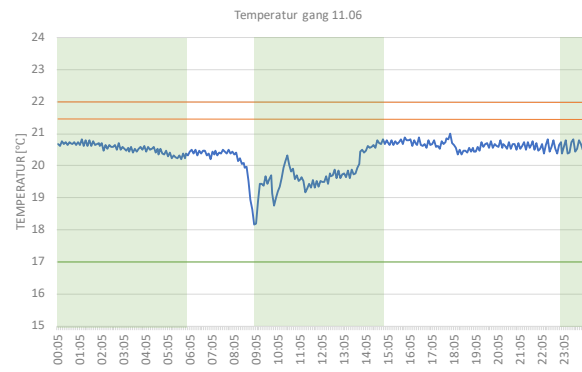
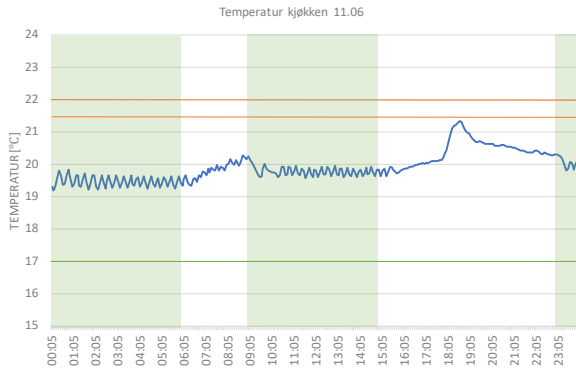
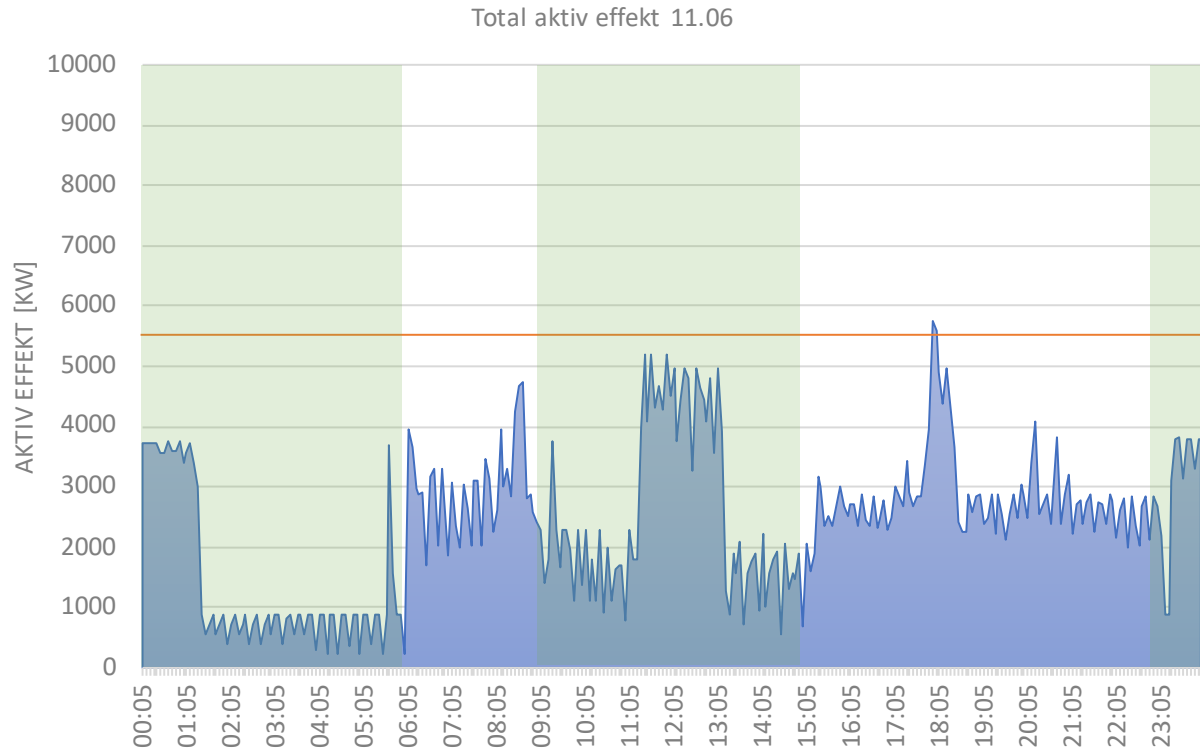
Den beregnede nettleien er vist i tabell 9.6.

Tabell 9.6: Månedlig nettleie for P_{abb} lik 5500W.

Energitariff	Time-of-use	Abonnert effekt
496 kr	694 kr	494 kr

Kommentarer

Temperaturfallene på badet og i gangen, illustrert i figur 9.3, er som følge av arbeid i smarthuset som førte til at døren på badet og ut til glassgården sto åpen i en periode.



Figur 9.3: Resultater scenario 2

9.1.4 Scenario 3

Effektgrensen som er valgt for scenario 3 er på 4,5 kW. Det tilsvarer for eksempel at alle varmelastene kan være skrudd på samtidig, varmtvannstanken og en varmelast eller varmefolien på kjøkkenet, panelovnen og vannkokeren.

Effekt og energi

Total energi og maksimale effekt for scenario 3, vist i tabell 9.7, er beregnet fra profilen presentert i figur 9.4.

Tabell 9.7: Målt energi og effekt i scenario 3.

Maksimal effekt	5532 W
Total energi	54,66 kWh
Energi 06-20	34,91 kWh

Kostnader

Den beregnede nettleien er vist i tabell 9.8

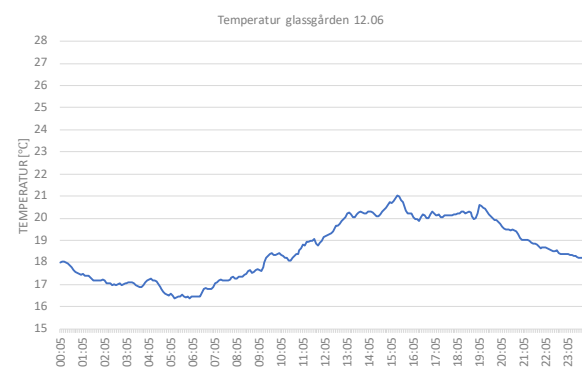
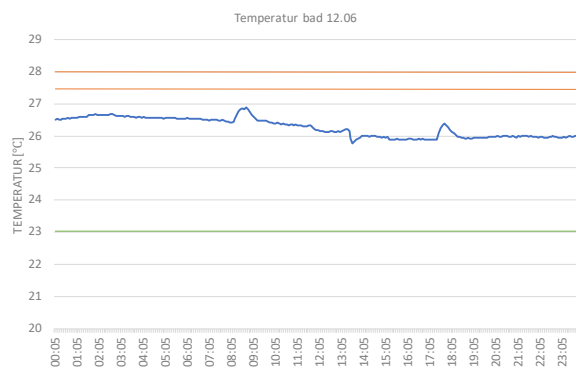
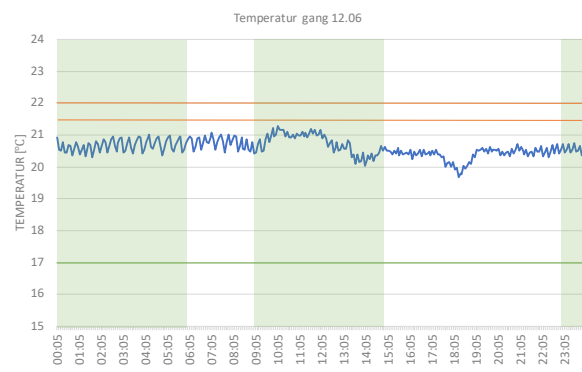
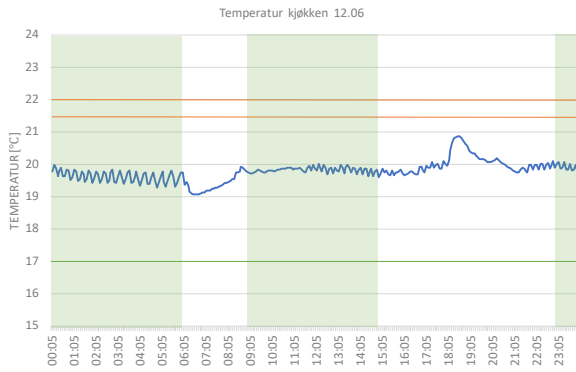
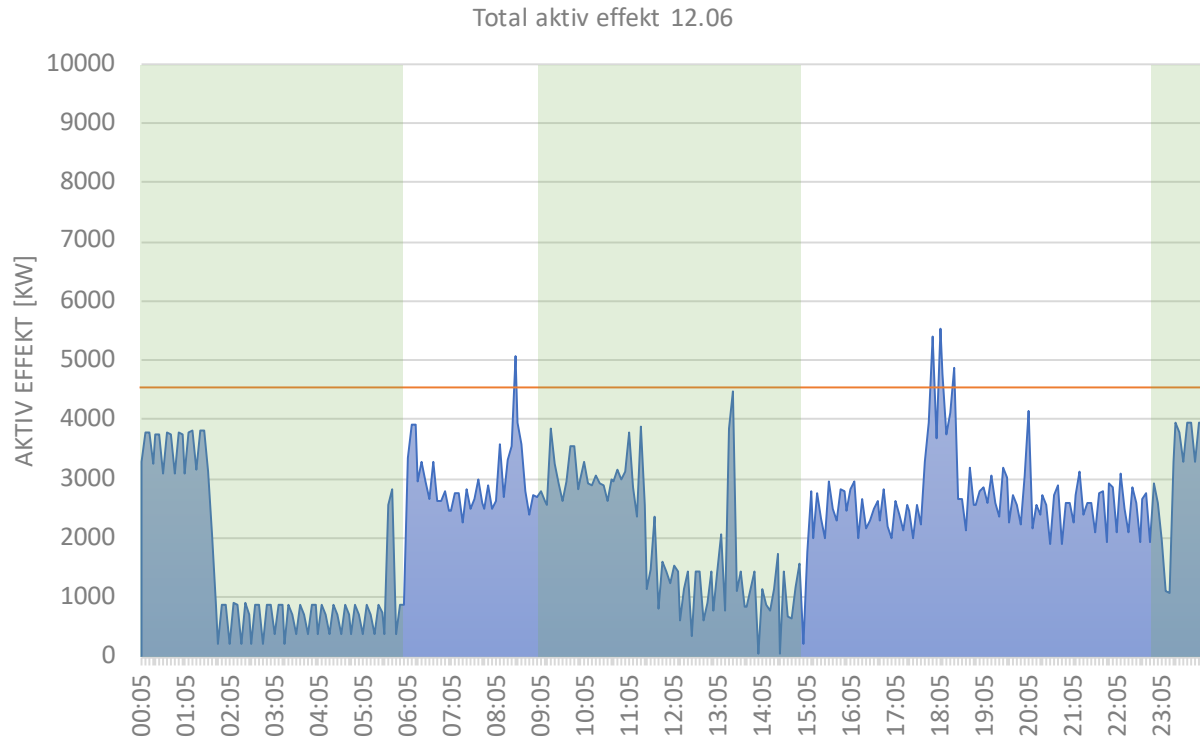
Tabell 9.8: Månedlig nettleie for P_{abb} lik 4500W.

Energitariff	Time-of-use	Abonnert effekt
474 kr	650 kr	431 kr

Kommentarer

Det høye energiforbruket frem til 01:30 og etter 23:00 skyldes at varmtvannsberederen varmer opp vannet etter å ha stått avskrudd i høylastperioden på ettermiddagen og kvelden. Effektkontrollalgoritmen klarer ikke å holde den maksimale effekten under grensen på 4,5kW, hvilket skyldes de ikke-fleksible lastene. Effekten er kun høyere enn grensen i et veldig kort tidsrom, så den resulterende kostnaden for overforbruk er på under en krone, og dermed neglisjerbar.

Termostatene ble stående i komfortmodus til klokka 11:30, noe som kan resultere i høyere energiforbruk.



Figur 9.4: Resultater scenario 3

9.1.5 Scenario 4

Effektgrensen valgt for scenario 4 er på 3,5kW. Dette tilsvarer at alle varmelastene bortsett fra en kan være på samtidig. Andre alternativer er varmtvannsberederen alene, komfyren og en av koketoppene eller varmefolien på kjøkkenet og en av de ikke-fleksible lastene.

Effekt og energi

Total energi og maksimale effekt for scenario 4, vist i tabell 9.9, er beregnet fra profilen presentert i figur 9.5.

Tabell 9.9: Målt energi og effekt i scenario 4.

Maksimal effekt	5317 W
Total energi	42,78 kWh
Energi 06-20	29,08 kWh

Kostnader

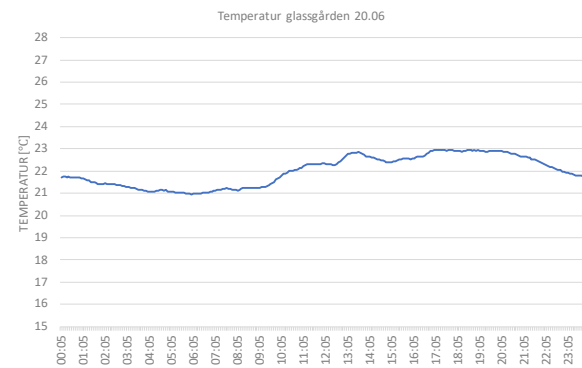
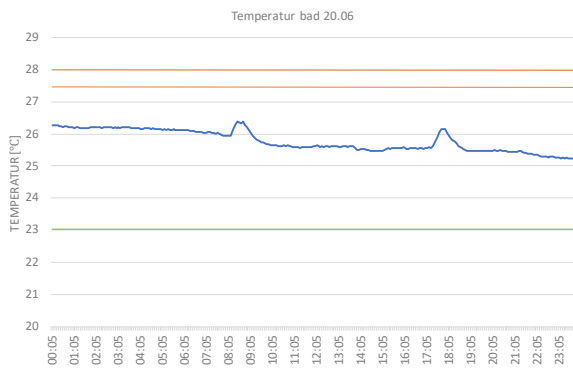
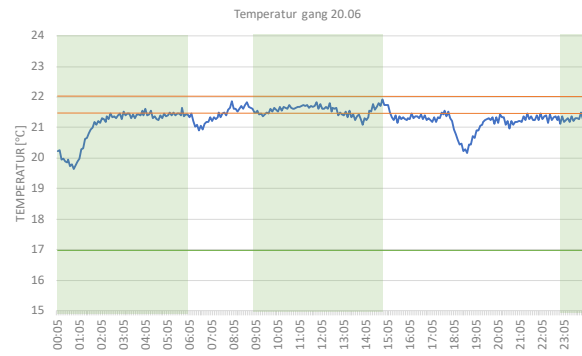
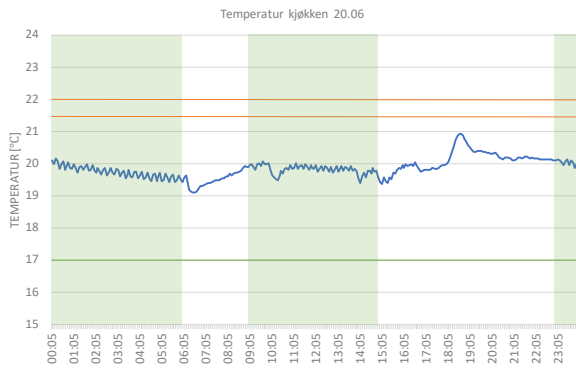
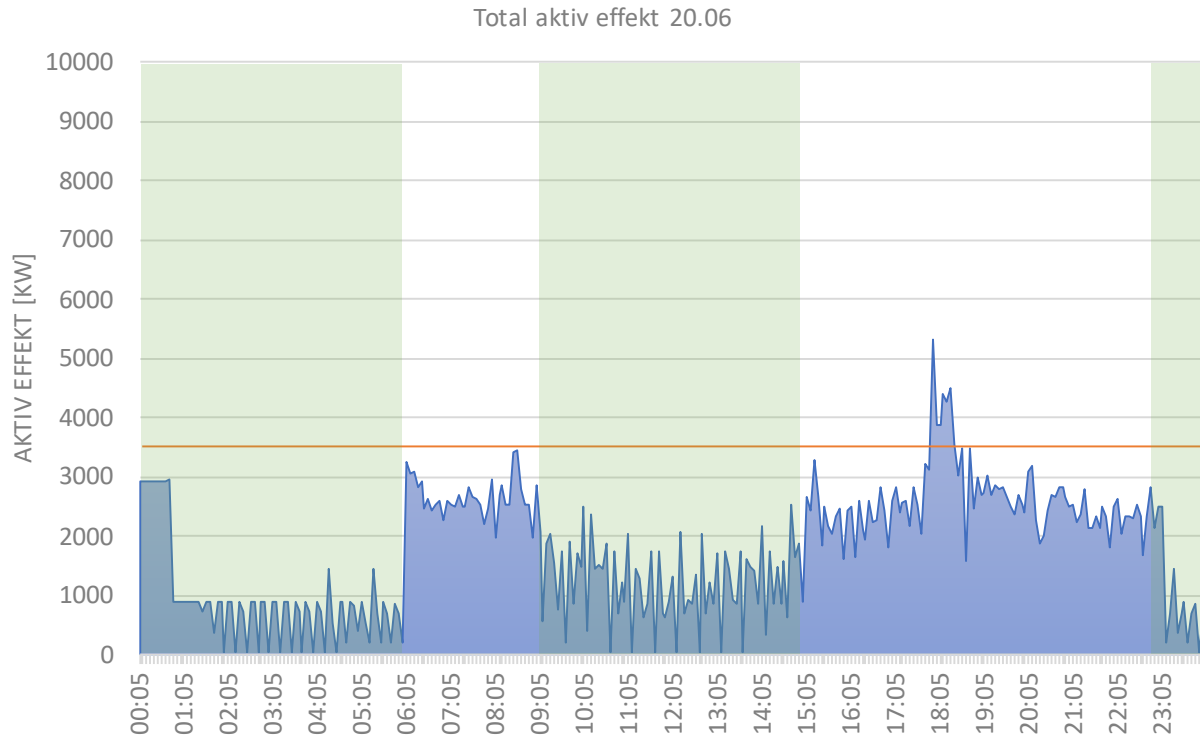
Den beregnede nettleien er vist i tabell 9.10.

Tabell 9.10: Månedlig nettleie for P_{abb} lik 3500W.

Energitariff	Time-of-use	Abonnert effekt
403 kr	553 kr	356 kr

Kommentarer

Effektgrensen på 3,5 kW ble også simulert den påfølgende dagen, 21. juni. I løpet av begge dagene fikk varmtvannsbereder aldri tillatelse til å skru seg på. Algoritmen registrerte ved en feiltagelse at den hadde vært fullt oppvarmet mellom 5:00 og 6:00 den 20. slik at funksjonaliteten som øker prioriteten til berederen ikke slo inn. Vannet var derfor lunkent og kaldt den 21.06. Temperaturen på badet synker med nesten en grad i løpet av dagen, noe mer enn for de andre scenarioene hvor temperaturen holder seg relativt stabil. Reduksjonen fortsetter utover den 21. juni hvor temperaturen synker under 25 °C. Grunnen til temperaturreduksjonen er uvisst, ettersom varmekablene kun er avskrudd i korte perioder.



Figur 9.5: Resultater scenario 4

9.1.6 Scenario 5

Effektgrensen i scenario 5 er igjen satt til 10 kW, som i basisscenariet. Forskjellen er at simuleringen vist i figur 9.6 ikke har dagsenking av temperaturen.

Effekt og energi

Total energi og maksimale effekt for scenario 5, vist i tabell 9.11, er beregnet fra profilen presentert i figur 9.6.

Tabell 9.11: Målt energi og effekt i scenario 5.

Maksimal effekt	9717 W
Total energi	67,86 kWh
Energi 06-20	44,13 kWh

Kostnader

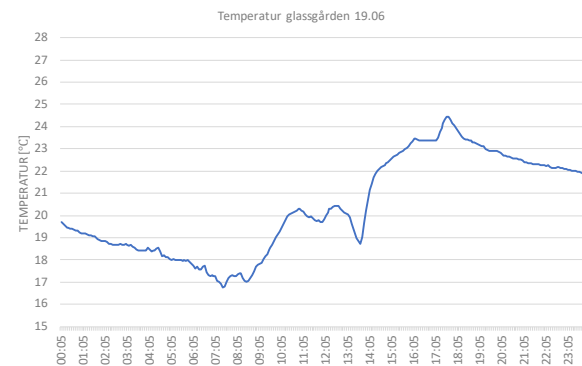
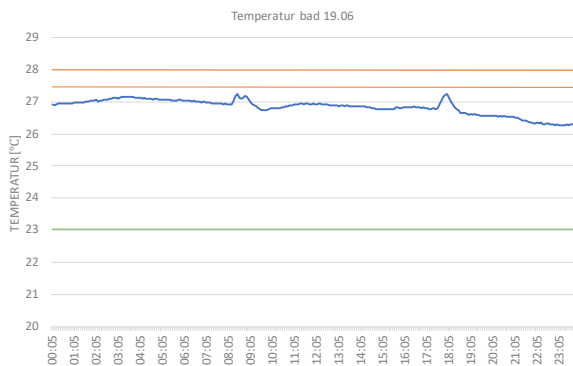
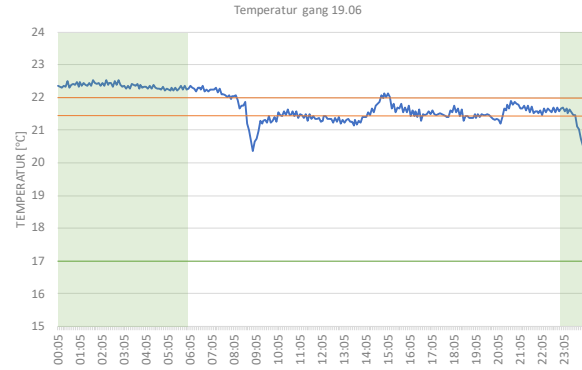
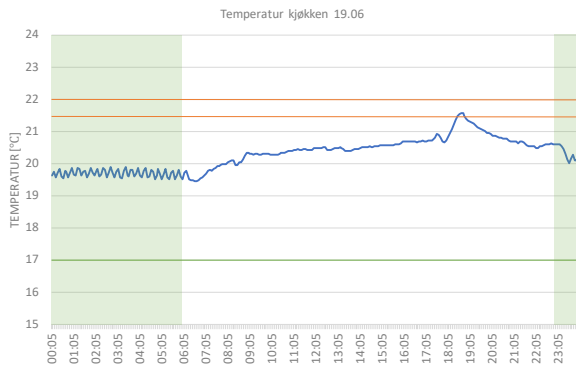
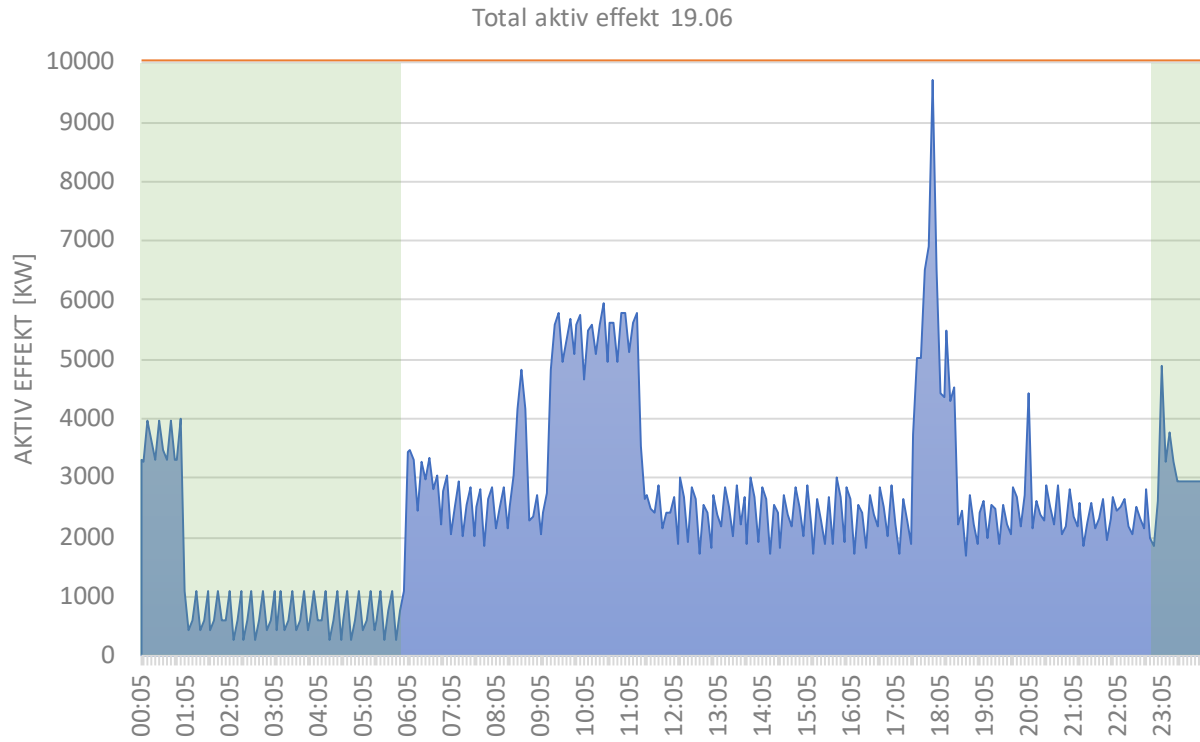
Den beregnede nettleien er vist i tabell 9.12.

Tabell 9.12: Månedlig nettleie for P_{abb} lik 10000 W, uten dagsenking.

Energitariff	Time-of-use	Abonnert effekt
554 kr	777 kr	768 kr

Kommentarer

Den høye effekttoppen på ettermiddagen skyldes at varmtvannsberederen skrudde seg på samtidig som toppen til de ikke-fleksible lastene. Dette førte til at effekten oversteg 10 kW og berederen ble skrudd av. Ettersom målingene er basert på et gjennomsnitt over fem minutter, var den momentane toppen i realiteten høyere enn figur 9.6 viser. Strømmen til smarthuset ble kuttet uventet klokka 12:00. Det var derfor ingen kommunikasjonen mellom energimåleren og kontrolleren LM4 frem til 15:30, da problemet ble oppdaget. Effekten i dette tidsrommet, vist i figur 9.6, er derfor en tilnærming basert på effektprofilen før og etter. Som forventet er energibruken høyere enn i basisscenariet, hele 14,6%. Noe skyldes varmtvannsberederen som sto på frem til 01:00 i scenario 5, på grunn av simulering dagen før. Temperaturen i glassgården er forholdsvis lik som i basisscenariet, med en dupp under 18 °C på morgenen, og en topp på minst 23 °C utover ettermiddagen.



Figur 9.6: Resultater scenario 5

9.1.7 Scenario 6

Effektgrensen i scenario 6 er igjen satt til 5,5 kW, som i scenario 2, men uten dagsenking. Resultatene er vist i figur 9.6.

Effekt og energi

Total energi og maksimale effekt for scenario 6, vist i tabell 9.13, er beregnet fra profilen presentert i figur 9.7.

Tabell 9.13: Målt energi og effekt i scenario 6.

Maksimal effekt	5797 W
Total energi	58,19 kWh
Energi 06-20	40,98 kWh

Kostnader

Den beregnede nettleien er vist i tabell 9.14.

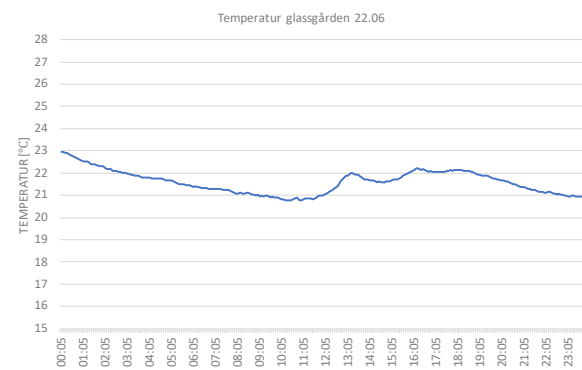
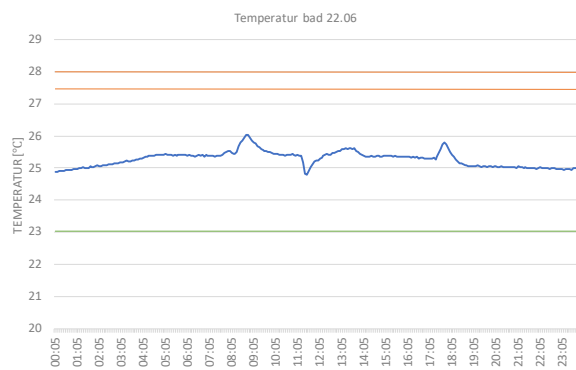
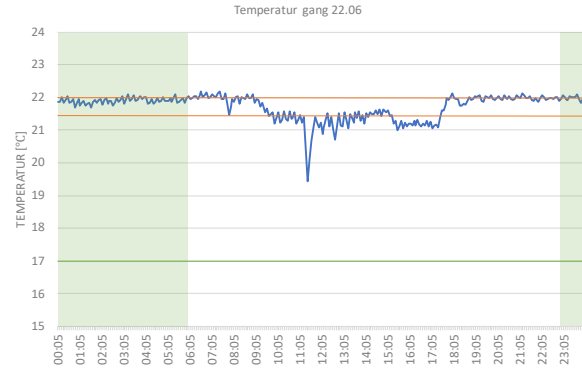
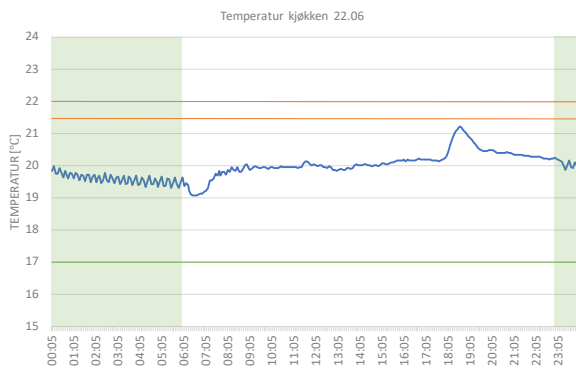
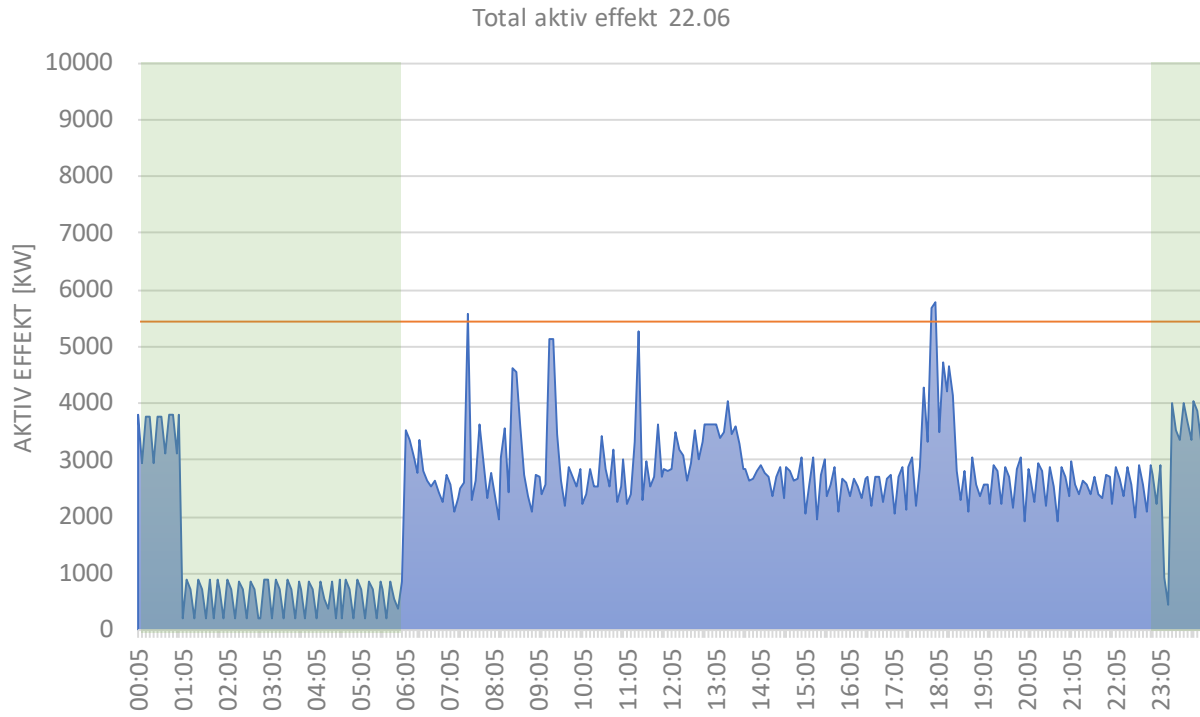
Tabell 9.14: Månedlig nettleie for P_{abb} lik 5500 W, uten dagsenking.

Energitariff	Time-of-use	Abonnert effekt
496 kr	710 kr	494 kr

Kommentarer

På grunn av en simulering med effektgrense 3,5 kW den 21. juni, brukte varmtvannsberederen strøm fra midnatt helt til klokka 04:30 den 22. juni. Effektprofilen i figur 9.7 har derfor blitt korrigert slik at energibruken for scenario 6 ikke skal bli feilaktig høy. Basert på simuleringen den 18. juni (scenario 7), antas oppvarmingen av vannet å vare fram til ca 01:00.

Det er usikkert hvorfor temperaturen på badet er nesten to grader lavere enn for de andre scenariene. Reléet til varmekablene har kun vært avskrudd i svært korte perioder på morgenen og ettermiddag, og det er heller ingen andre åpenbare forhold som kan forklare den lave temperaturen.



Figur 9.7: Resultater scenario 6

9.1.8 Scenario 7

Effektgrensen i scenario 7 er satt til 4,5 kW, som i scenario 3, men har ikke dagsenking. Resulterende effektprofil er vist i figur 9.8.

Effekt og energi

Total energi og maksimale effekt for scenario 7, vist i tabell 9.15, er beregnet fra profilen presentert i figur 9.8.

Tabell 9.15: Målt energi og effekt i scenario 7.

Maksimal effekt	5279 W
Total energi	54,54 kWh
Energi 06-20	36,51 kWh

Kostnader

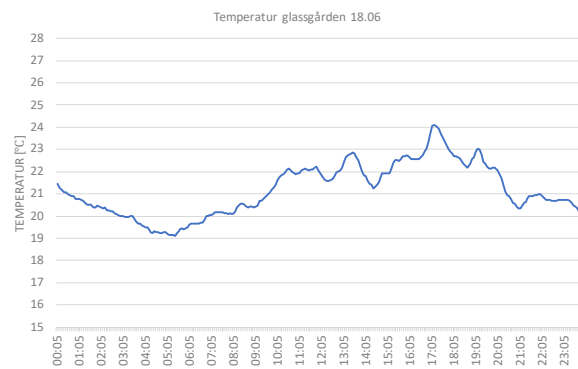
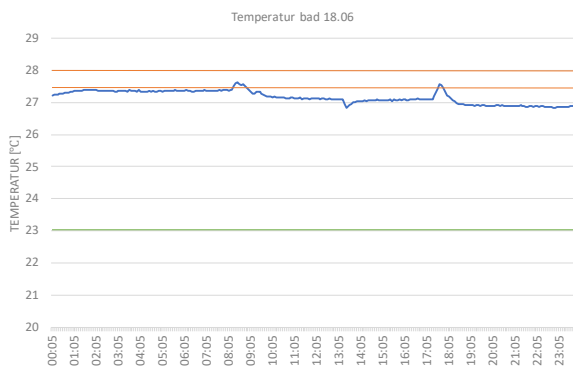
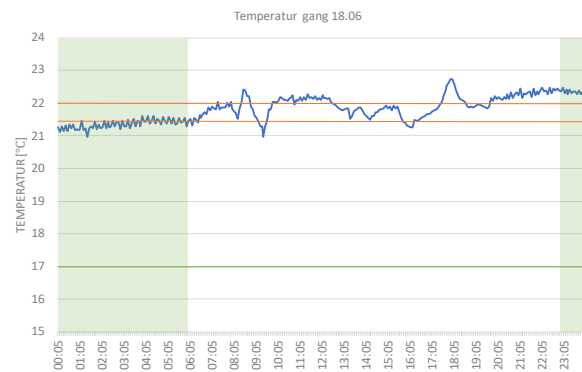
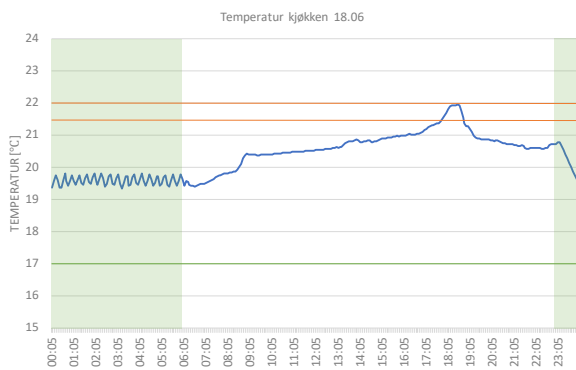
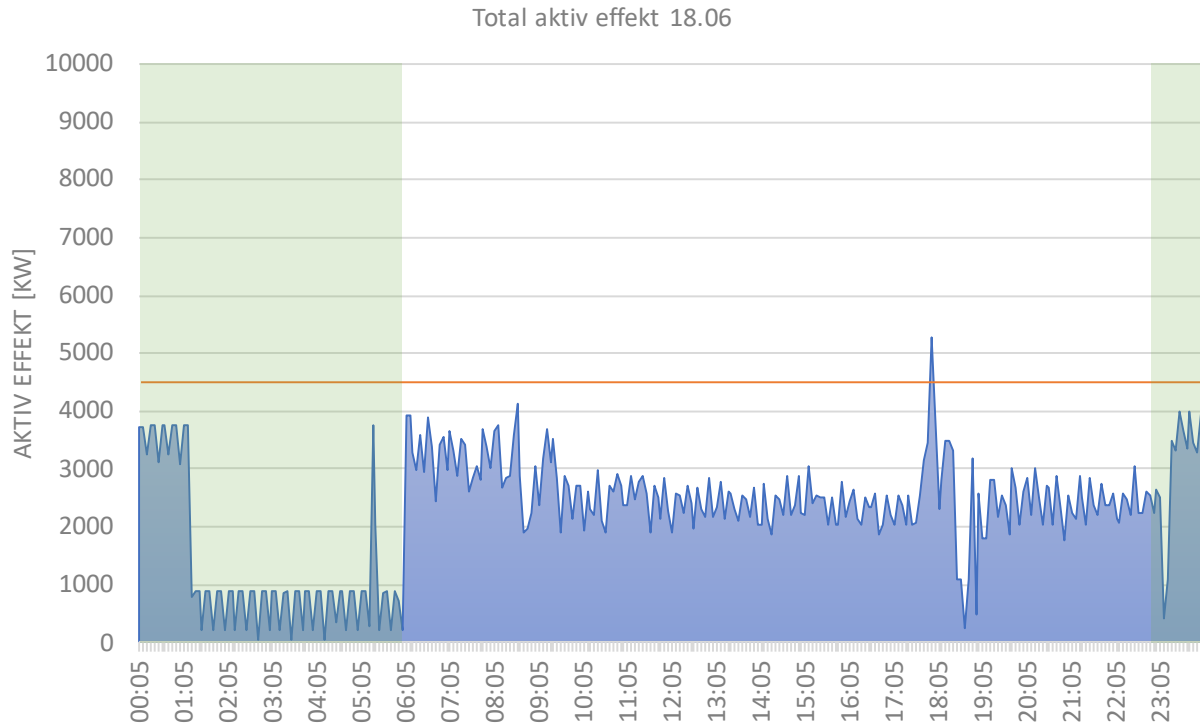
Den beregnede nettleien er vist i tabell 9.16.

Tabell 9.16: Månedlig nettleie for P_{abb} lik 4500W, uten dagsenking.

Energitariff	Time-of-use	Abonnert effekt
474 kr	661 kr	431 kr

Kommentarer

Den forbrukte energien er tilnærmet lik for de to scenariene med effektgrensen 4,5 kW. Dette påvirkes av at temperaturen i scenario 3 ikke ble redusert før 11:30, slik at bare en tredjedel av dagsenkingen ble gjennomført. Likevel er det noe overraskende at energiforbruket er så likt, men dette kan skyldes andre faktorer. Temperaturen i glassgården lå mellom 16 og 21 °C for scenario 3, signifikant lavere enn i scenario 7, hvor temperaturen lå mellom 19 og 24 °C. Dette kan til en viss grad forklare at energiforbruket var like høyt med og uten dagsenking.

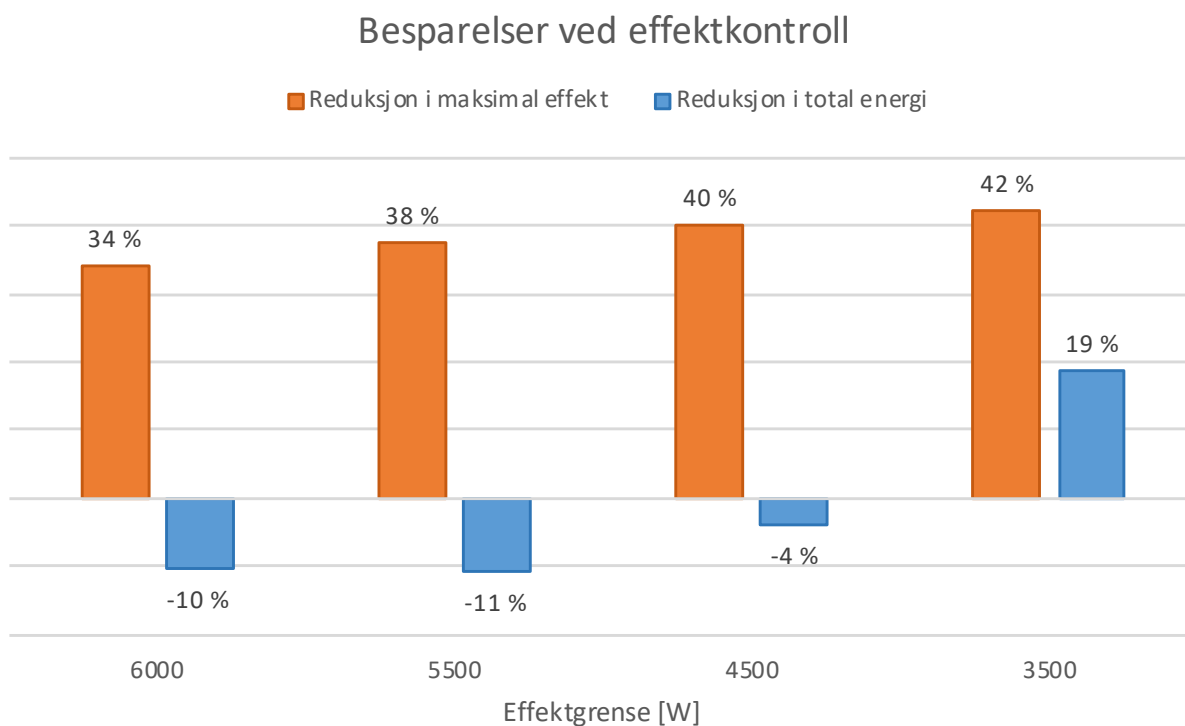


Figur 9.8: Resultater scenario 7

9.2 Reduksjon av energi og maksimal effekt med dagsenkning

Maksimal effekt

Figur 9.9 viser reduksjon av energi og maksimal effekt for de forskjellige scenariene sammenlignet med basisscenariet. Den maksimale effekten, altså den høyeste effekttoppen i løpet av en simulering, reduseres ettersom effektgrensen settes lavere. Til tross for en effektgrense på 3500 W kommer ikke den maksimale effekten under 5200W. Dette skyldes at begge koketoppene og stekeovnen brukes samtidig på ettermiddagen, hvilket har en samlet effekt på rundt 5200W. Det er altså bruksmønsteret og effekten til de ikke-fleksible lastene som setter den nedre begrensningen. Hvor mye den maksimale effekttoppen kan reduseres avhenger av belastningen til de fleksible lastene, og om de kan skrus av. For alle simuleringene ble den største effekttoppen kuttet med mellom 3000 og 4000W. Dette stemmer godt overens med effekten til varmelastene i systemet som ligger på rundt 3900W. Dersom varmeelementet til varmtvannsberederen hadde vært på, idet toppen i basisscenariet intraff, ville reduksjonspotensialet vært ytteligere 3000W.

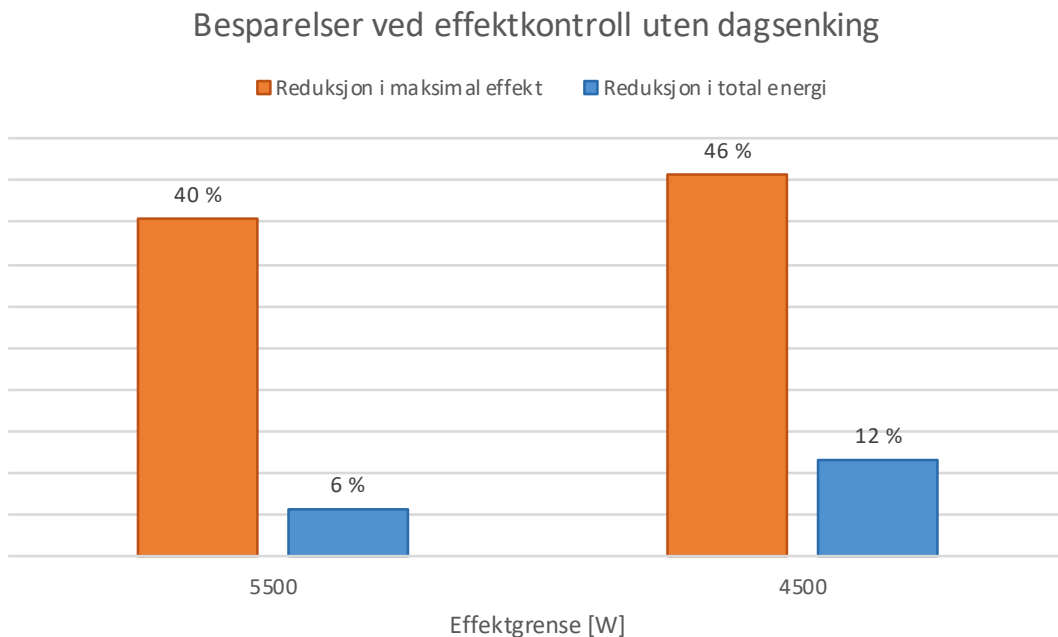


Figur 9.9: Reduksjon i energi og effekt sammenlignet med basisscenariet.

Energiforbruk

Energiforbruket øker når effektkontrollalgoritmen benyttes. Dette var ikke uventet, ettersom anslag gjort i VaasaETT sin rapport [15] viser at det er en mulig konsekvens. Det er derimot noe overraskende at energibruken er lavest for de minste effektgrensene. En forklaring er at laster ikke har fått tillatelse til å skru seg på, noe som kan gå utover komforten. Temperaturmålingene viser imidlertid ingen signifikante endringer, hverken på badet (uten air-condition) eller de andre rommene (med air-condition). Det ser heller ikke ut til å være en tydelig sammenheng mellom temperaturen i glassgården og energiforbruket.

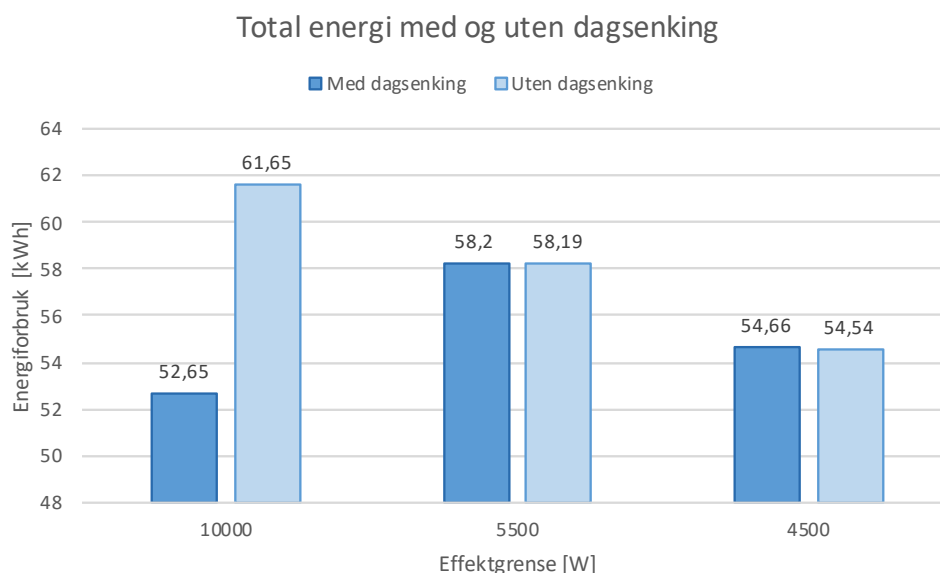
9.3 Reduksjon av energi og maksimal effekt uten dagsenking



Figur 9.10: Reduksjon i energi og effekt sammenlignet med scenario 5 (effektgrense på 10 kW uten dagsenking).

Reduksjon i maksimal effekt for scenariene uten dagsenking, vist i figur 9.10, er høyere enn effektreduksjonen med dagsenking. Dette skyldes at den høyeste effekttoppen i scenario 5, som er sammenligningsgrunnlaget for resultatene, er større enn i basisscenariet ettersom varmtvannsberederen skrudde seg på når de ikke-fleksible lastene hadde sin maksimale topp.

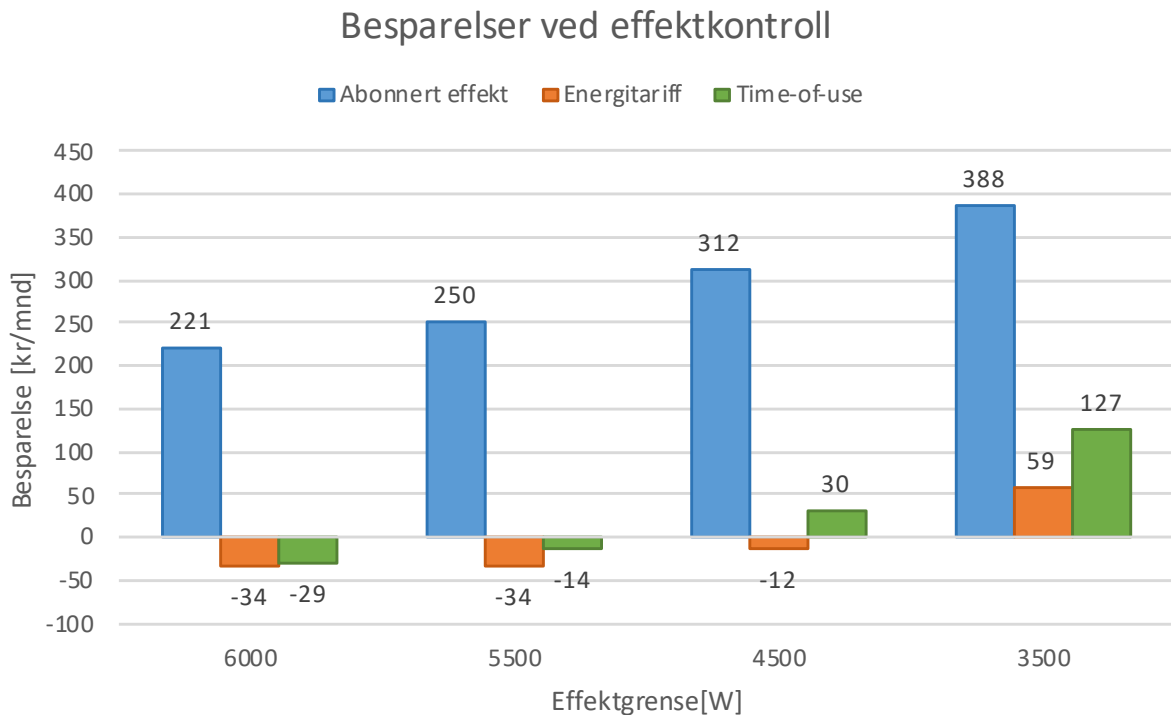
I motsetning til resultatene fra simuleringene med dagsenking er energibesparelsene positive. Dette betyr likevel ikke at en forbruksprofil uten dagsenking er å foretrekke. Som figur 9.11 viser er energiforbruket, noe overraskende, tilnærmet likt for simuleringene med effektprofil på 5,5 kW eller 4,5 kW. Energiforbruket for simuleringene med effektgrense på 10 kW er den utslagsgivende faktoren for om energibesparelsene blir positive eller negative. Av resultatene i figur 9.11 kan det sees en tendens til synkende energibruk for lavere effektgrense, som antyder at effektkontrollsystemet fører til redusert energiforbruk.



Figur 9.11: Sammenligning av totalt energiforbruk (kWh) med og uten dagsenking for effektgrensene 10kW, 5kW og 4,5 kW.

I 10 kW scenariet med dagsenking er energiforbruket lavere enn uten senking, som forventet. Det at forskjellen er så mye større enn for simulering med effektgrense på 5,5 kW og 4,5 kW kan skyldes forhold med simuleringene. Under basissimuleringen med dagsenking førte problemer med Smarthuset til at energiforbruket kan ha blitt noe lavere enn forventet. Oppvarming av varmtvann på natta som følge av simuleringen dagen før kan ha ført til at energibruken for scenario 5 (uten dagsenking), kan ha blitt noe høy, og dermed økt forskjellen i målt energi ytterligere. En annen mulig forklaring på at differansen i energiforbruk er større enn for scenariene med lavere effektgrense, er at styringsalgoritmen bidrar til at forskjeller i energiforbruket jevnes ut mellom bruksprofiler med og uten temperatursenking.

9.4 Besparingspotensiale



Figur 9.12: Reduksjon i nettleie sammenlignet med basisscenariet for de forskjellige effektgrensene og tariffene

Med tariffen *abonnert effekt* reduseres nettleien betydelig når effektkontrollsystemet benyttes. Reduksjonen ligger mellom 221 og 388 kroner, som tilsvarer en nettleie som er fra 30 til 52% lavere. For dagens energitariff og tariffmodellen *time-of-use* øker nettleien for effektgrensene på 6 og 5,5 kW, som vist i figur 9.12, til tross for at den største effekttoppen er redusert med 38% for effektgrensen 5,5 kW. En merkbar reduksjon i nettleien oppstår ikke før effektgrensen presses helt ned til 3,5 kW, som er 65% lavere enn for basis-scenariet. Besparelsen på 59 og 127 kroner skyldes med stor sannsynlighet det reduserte energiforbruket som følge av at varmtvannsberederen ikke hadde tillatelse til å skru seg på. Dette er ikke en ønsket situasjon, ettersom det vil gå utover brukerens komfort, så resultatene for effektgrensen på 3,5 kW er ikke representative for algoritmens besparingspotensiale.

9.4.1 Tilbakebetalingstid

Det er kun effekttariffen *abonnert effekt* som gir betydelig redusert nettleie for alle effektgrensene. Tilbakebetalingstiden for effektkontrollsystemet beregnes derfor kun med abonnert effekt. Resultatene er vist i tabell 9.17. Beregningen er forenklet med følgende uttrykk for den årlige kontantstrømmen:

$$\text{Årlig besparelse (kr/år)} = 12 * \text{månedlig besparelse (kr/mnd)}$$

De beregnede tilbakebetalingstidene er dermed noe korte ettersom det kun tas hensyn til vinterforhold. Potensialet for besparelse forventes å være mindre om sommeren ettersom effektbehov og strømpriser er lavere.

Tabell 9.17: Tilbakebetalingstid for effektkontrollsystemet, beregnet ved metoden for diskontert tilbakebetalingstid forklart i kapittel 5.1.

Abonnert effekt (W)	Tilbakebetalingstid (år)	
	Ny kunde	Eksisterende kunde
6000	17,03	1,86
5500	11,65	1,42
4500	7,01	0,94
3500	4,73	0,67

For eksisterende kunder er tilbakebetalingstiden kort, under 2 år for alle effektgrensene. Nye kunder er i større grad avhengig av å redusere den abonnerte effektgrensen for at investeringen skal bli lønnsom. Et viktig tiltak for å gjøre effektkontrollsystemet lønnsomt vil derfor være å redusere investeringskostnaden. Dette kan gjøres ved å forenkle styringssystemet slik at det er behov for færre komponenter, eller ved å bruke produkter som ikke må installeres av elektriker. Et eksempel er å eliminere styringssentralen ved at algoritmen ligger implementert i relémodulen, eller at alle komponentene er tilkoblet internett slik at styringsalgoritmen kan ligge online. Lønnsomheten til systemet vil også i stor grad avhenge av den kommende effekttariffen. Dersom modellen ligner time-of-use tariffen benyttet i denne oppgaven, vil ikke systemet redusere nettleien. Det må gjøres tilpasninger for at algoritmen er bedre tilpasset time-of-use prisingen, ved å for eksempel ha en lavere effektgrense mellom 06:00 og 20:00 enn i de resterende timene.

Kapittel 10

Diskusjon

I dette kapitlet diskuteres forhold ved algoritmen og resultatene fra de gjennomførte simuleringene i Smartuset.

Temaer som belyses er

- nytteverdi for forbrukeren
- komfortbetingelser
- energiforbruk og reduksjon av effekttopper
- algoritmens funksjonalitet
- videre arbeid

10.1 Nytteverdi forbruker

10.1.1 Økonomiske besparelser

De økonomiske besparelsene som er beregnet fra simuleringene er i utgangspunktet ikke overførbare til andre boliger. Nettleien er et resultat av maksimal effekt og energiforbruk, som igjen avhenger av boligens varmetap, lastene i boligen og forbruksmønsteret. Likevel kan resultatene gi en pekepinn på algoritmens evne til effektreduksjon. Med informasjon om den nominelle effekten til de fleksible lastene i systemet går det an å anslå den maksimale effekten algoritmen klarer å kutte. Dersom forbruksmønsteret består av kortvarige topper, går det også an å presse effektgrensen lavere ettersom toppene gir små utslag på prisen.

Algoritmen gir forbrukeren mulighet til betydelig reduksjon i abonnert effekt dersom effektgrensen settes lavt. Dette kommer tydelig frem av simuleringene, hvor reduksjonen ligger på over 30% for alle scenariene. Det må påpekes at effektprofilen som simuleres har høye, kortvarige topper, over 9 kW, med en grunnlast på mellom 3 og 5 kW, som illustrert i basis-scenariet. Mulighetene for å redusere effektgrensen med flere kW er dermed gode.

For effekttariffen *abonnert effekt* er det reduksjon av den abonnerte effektgrensen som er utslagsgivende for nettleien. Boliger med mulighet for betydelige kutt i effekttopper kan derfor ha best forutsetninger for en lønnsom investering i et effektkontrollsystem. Husholdninger med en stor andel fleksibel grunnlast vil også ha god mulighet til å variere belastningen om det skulle være nødvendig. Et styringssystem vil i så tilfelle legge til rette for at effektkrevende belastninger med kort brukstid, som hurtigvannvarmere, kan inkluderes i systemet uten at det får nevneverdige utslag for den maksimale belastningen.

10.1.2 Bedre oversikt over eget forbruk

Et oversiktlig brukergrensesnitt tilknyttet styringssystemet kan sikre at energi- og effektforbruket formidles til forbrukeren på en god måte. Ved å følge med på eget forbruk kan brukeren bli bevisst på hvilke operasjoner som er effektkrevende og gir store topper, slik at disse kan forde-

les utover for å unngå overskridelse av effektgrensen. Et nyttig verktøy for å redusere nettleien kan også være funksjonalitet som gir forbrukeren råd om endringer i forbruket. Basert på brukers typiske effektprofil kan endret forbruksmønster for de ikke-fleksible lastene foreslås. I følge Vaasa EET [15], vil tilbakemelding til forbrukeren i kombinasjon med et automatisk styresystem potensielt redusere energiforbruk og topplast med ytterligere 2%. Det må påpekes at resultatene fra rapporten er usikre, da det ikke kommer tydelig frem hvilket datagrunnlag beregningene er basert på.

10.1.3 Nytteverdi for ulike boligtyper

Hyttekunder kan ha god nytte av et effektkontrollsystem såfremt oppvarming planlegges. Der som en familie skal på hytta en helg kan varmelastene skrus på timer før ankomst, slik at hytta er varm når de kommer fram. Idet matlaging, dusjing, og andre aktiviteter begynner sikrer effektkontrollalgoritmen at effekten holdes under ønsket nivå. På den måten kan styringssystemet bidra til at en helg på hytta ikke blir dyr på grunn av forbruk over abonnert effekt eller behov for et abonnement med høy effektgrense.

Nye boliger og spesielt passivhus er ofte godt isolerte med lavt energibehov til oppvarming. Dette er positivt for komfortaspektet ved styringsalgoritmen, ettersom temperaturen synker sakte dersom laster skrus av. Problemet med å inkludere en effektkontrollalgoritme er at lite behov for oppvarming betyr lite tilgang på fleksibilitet. Dette er i endring som følge av flere elbiler og smarte husholdningsartikler som også kan bidra med fleksibilitet.

Gamle hus er ofte dårlig isolert og har store varmetap. De har derfor behov for mye energi til oppvarming. Varmelastene kan gi tilgang på mye fleksibilitet og dermed gode muligheter for effektreduksjon. Nytteverdien av et effektkontrollsystem vil likevel begrenses, ettersom store varmetap kan føre til at temperaturen i oppholdsrom synker fort hvis en last skrus av.

10.2 Komfortbetingelser

Til tross for at varmepumpene hadde en settemperatur som var kun to grader under komforttemperaturen klarte ikke varmelastene å få romtemperaturen opp på ønsket nivå. Dette gjaldt også for basisscenariet, som illustrert i figur 9.1. Hvilke konsekvenser effektkontrollsystemet har for komforten blir derfor vanskelig å bedømme. Det går likevel an å få en pekepinn ved å se på historikken til bryternes vekslingen mellom av og på.

I Smarthuset lå temperaturen som regel lavere enn komfortsjiktet. Ved å velge $\Delta T_{komfort}$ lik 0,5 °C, spurte lastene om å bli skrudd på igjen nesten umiddelbart etter reléet ble slått av. Kortvarige effekttopper førte derfor til at varmelastene sjeldent ble stående avskrudd i mer enn en time, ofte kun 10-15 minutter. Det kan derfor være rimelig å anta at utslagene på temperaturen ville vært små, muligens ikke merkbare. Lastene på kjøkkenet hadde høyest prioritet og ble derfor sjeldent skrudd av, kun som følge av den største effekttoppen på ettermiddagen. Å gi høyest prioritet til de mest brukte oppholdsrommene er derfor et godt tiltak for å sikre at eventuelle konsekvenser av effektkontrollsystemet ikke legges merke til.

Et annet tiltak som er viktig for å sikre at komforten overholdes er å velge riktig effektgrense. Dersom den settes for lavt kan det gi uheldige utslag. Det var tilfellet i scenario 4 hvor effektgrensen var satt til 3,5 kW, og resultatet ble kaldt vann i varmtvannsberederen. Dette skyldes også en svakhet i algoritmens funksjonalitet, som utdypes senere, men viser likevel hva en pres-set effektgrense kan medføre.

10.3 Reduksjon av effekttopper

Resultatene viser at algoritmen kutter effekttopper på tilfredsstillende vis. Effekten holdes under satt effektgrense, ved å skru av lastene med lavest prioritet først. De korte toppene som overstiger effektgrensen i flere av scenariene skyldes effekten til de ikke-fleksible lastene som brukes samtidig, og kan derfor ikke kuttes. Dette viser hvor avgjørende forbruksmønster og kommunikasjon med brukeren er for muligheten til å redusere effekttopper. Dersom effektgrensen skal settes lavt må forbrukeren være bevisst sitt eget forbruksmønster for å hindre store og langvarige effekttopper med ikke-fleksible laster.

I [8] har varmtvannsberederen høyest prioritet, slik at tidspunktet for dusjing eller annen varmtvannsbruk er avgjørende for den maksimale effekten og reduksjonspotensialet. Simuleringer av hus med og uten varmtvannsbereder viste at berederen begrenset hvor lavt effektgrensen kunne settes, før det gikk utover romtemperaturen, ettersom air-condition ble skrudd av. Ved å gi berederen laveste prioritet utnyttet i større grad fleksibiliteten som ligger i lastens treghet. I stedet for å fungere som en begrensning kan varmtvannsberederen bidra til hurtig effektreduksjon. Ettersom den er Smarthusets største belastning er det også en fordel at den kan varme opp vannet utenfor høylastperioder uten at komforten påvirkes. Det var kun i scenario 4 at effektgrensen gikk utover vanntemperaturen. I de andre scenariene var vannet alltid varmt og berederen var en god kilde til reduksjon av effekttopper, som tilsiktet.

10.4 Energiforbruk

Hvor stor en eventuell endring i energiforbruk vil bli som følge av styringssystemet er vanskelig å anslå basert på simuleringene som er gjort. Antall målinger er ikke tilstrekkelige og utvalget har liten variasjon ettersom det kun benyttes ett hus og samme forbruksprofil. Simuleringene som er gjennomført med dagsenking viser tendenser til en økning i energiforbruket på opptil 11%. Dette trenger ikke å være en følge av effektkontrollsystemet, men kan skyldes lavt energiforbruk i basisscenariet, som illustrert i figur 9.11. Dersom differansen mellom simuleringene betraktes, viser resultatene en trend med synkende energiforbruk for redusert effektgrense, men det er mye usikkerhet knyttet til resultatene. En faktor som kan ha innvirkning er at energikrevende operasjoner som oppvarming av varmtvann flyttes til dagen etter (etter midnatt). Ved å definere starten og slutten på en simulering klokka 05:00 kunne muligens usikkerheten i resultatene blitt redusert noe.

Resultater fra annet arbeid på området gir ingen klar pekepinn på om en økning i energi kan forventes. Alle artiklene om lastkontroll som er nevnt tidligere i oppgaven gjør dessuten digitale simuleringer, som ofte er forenklede modeller. Hovedmål som presenteres i artiklene er reduksjon av kostander eller effektopper, en eventuell endring i energiforbruk nevnes ikke. Testprosjektet på Hvaler og Steinkjær kunne vise til en reduksjon i energiforbruk for over 85 % av deltakerne, i tillegg hadde rundt 90% redusert makslast [39]. Pilotene benyttet seg ikke av automatisk styring, men av fjernstyring og et brukergrensesnitt med oversikt over forbruk av energi og effekt. Det kan dermed stilles spørsmål ved om styring basert på både automatikk og aktiv brukerdeltakelse vil gjøre opp for eventuell energiøkning som følge av det automatiske styringssystemet. Dette støttes også av [15], hvor reduksjon i energibruk er beregnet å være svakt negativ for automatisk styring uten involvering av forbrukerne, mot 2,68 % når brukerne får tilbakemelding og opplæring.

10.5 Vurdering av algoritmens funksjonalitet

10.5.1 Problematikk med lav temperatur

Algoritmens virkemåte gjør at laster med lav prioritet kan bli stående mye av i perioder med høyt forbruk. Det er ingen funksjonalitet som sikrer at ønsket temperatur nås, selv om en nedre grense sikrer at den ikke avviker mer enn 5 °C. Når den kritiske temperaturen er nådd har algoritmen tillatelse til å skru av tilhørende last, noe som kan føre til at temperaturen foblrir lav. Et eksempel kan være et soverom eller kontor som sjelden er i bruk. På en kald vinterdag med høyt forbruk kan brukeren oppleve at rommet blir stående kaldt. Eksempler på funksjonalitet som kan løse dette problemet er:

- Fleksibel prioritet av lastene som kan endres av brukeren eller andre komponenter, som for eksempel tilstedeværelsessensorer. Dersom et rom skal tas i bruk kan lastens prioritet midlertidig settes høyere.
- Overstyring av algoritmen ved hjelp av fysiske knapper eller app, hvor brukeren har mulighet til å overstige effektgrensen.
- Betingelser som sikrer at en last ikke får lov til å skru seg av før komforttemperatur er nådd dersom temperaturen har vært kritisk lav en gitt periode.

10.5.2 Forvarming av rom

I simuleringene skrur varmelastene seg på to timer før beboerne står opp eller kommer hjem fra jobb. Det er vanskelig å bedømme om det er et passende tidsintervall på grunn av varmepumpene, som i stor grad påvirker innnetemperaturen. Når varmelastene bør begynne å varme opp avhenger av varmetap i de forskjellige rommene, temperaturen ute, varmelastenes effekt og varmekapasiteten til mediet som varmes opp. Dette er parametere som kan variere mye i forskjellige boliger. Dersom systemet skal kunne velge det optimale tidspunktet er det nødvendig å implementere en form for erfaringsbasert intelligens som forutser hvor lang tid det vil ta å varme opp rommene, basert på utetemperaturen. Ved å minimere nødvendig energi samtidig som

effektgrensen respekteres er det muligheter for ytterligere økonomiske besparelser.

En annen funksjonalitet som kan vurderes er oppvarming av rom til temperaturer høyere enn ønsket komforttemperatur, før perioder med høy belastning. Når effekttoppene inntreffer og algoritmen begynner å skru av varmelaster vil temperaturen synke, men den allerede høye temperaturen sikrer at ønsket komforttemperatur i større grad opprettholdes. Denne funksjonaliteten var ikke mulig å teste i Smarthuset på grunn av varmepumpene, men kan være interessant å undersøke senere for å se hvilken påvirkning det har på energiforbruk og temperatur.

10.5.3 Registrering av tidspunkt for oppvarmet vann

Registrering av oppvarmet vann i varmtvannsberederen ved å måle effektendring i systemet, viste seg å ikke fungere optimalt under simuleringen av scenario 4. Vannet ble registrert oppvarmet rundt klokka 5 på morgenen, selv om det ikke stemte. Istedenfor at varmtvannsberederens prioritet ble endret ettersom den hadde vært avskrudd i lang tid, ble berederen stående med laveste prioritet. I følge ligning 7.4 skulle prioriteten endret seg igjen 17 timer senere, som vil si klokka 23 på kvelden. Dette skjedde heller ikke, og vitner om at det har vært en feil i implementeringen av prioritetsendringen.

Metoden for registrering av $t_{fullt\ oppvarmet}$ har i hovedsak fungert godt under simuleringene. Berederens unike effektprofil med nominell effekt på 3 kW er en av grunnene til at metoden ble valgt. I andre husholdninger kan berederen typisk være på rundt 2 kW, som også er vanlig for kjøkkenapparater. Da er det stor sannsynlighet for at feil tidspunkt kan registreres. En annen mulig løsning for å registrere når vannet er oppvarmet, er å benytte et relé som registrerer om varmtvannsberederen bruker strøm. Dersom det ikke er registrert strømforbruk over en viss periode mens bryteren har vært på, for eksempel 15 minutter, kan det antas at vannet er fullt oppvarmet.

En alternativ metode for å sikre at berederen ikke blir stående av lenge er roterende innkobling av laster. Ved en lav effektgrense hvor alle varmelastene og berederen ikke tillates å være koblet inn samtidig, kan det introduseres et system som kjører roterende inn og-utkobling av lastene for å sikre at ingen blir stående av for lenge. På den måten kan behovet for å registrere når

vannet sist var oppvarmet, elimineres. Denne tilnærmingen til effektkontroll benyttes allerede i maksimalvoktere, releer som kobler ut laster dersom effekten i en node overstiger satt grense.

Algoritmen registrerer ikke hvor mye varmtvann som forbrukes. Bryteren til varmtvannsberederen kan derfor bli stående av selv om forbruket har vært høyt og alt varmtvannet er brukt opp. En måte å løse dette på er å la forbrukeren gi berederen høyeste prioritet dersom de vet at det for eksempel skal dusjes mer enn vanlig. Dette er ikke ideelt ettersom det krever noe innsats fra forbruker og kan føre til misnøye dersom brukeren glemmer å endre prioritet, eller ikke forstår hvorfor det tar lang tid før vannet varmes opp igjen.

10.5.4 Personvern

Et aspekt som blir viktig med automatisk styring er personvern og datasikkerhet. Dersom utenforstående får tilgang til systemet kan de hente ut detaljert informasjon om forbruksmønster og aktivitet i boligen. For en person med uærlige hensikter kan dette brukes til å kartlegge personlig informasjon og tilstedeværelse, med motivasjon om tyveri eller annen kriminell virksomhet. Dårlig datasikkerhet kombinert med laststyring fører også til sårbarhet for dataangrep hvor det tas kontroll over styringen av lastene.

10.6 Andre bruksområder for algoritmen

En algoritme som kontrollerer belastning etter en prioritetsliste, kan ha andre bruksområder enn å styre laster i boliger. Et eksempel er styring av elbil-lading i et boligområde. På grunn av begrensning i fordelingen kan en ladestasjon ha problemer med å tåle at alle laderne er tilkoblet med maksimal effekt samtidig. Effektkontrollalgoritmen kan benyttes for å hindre overbelastning. I stedet for temperaturbetingelser kan andre forhold være styrende for hvilke ladere som tillates å bli skrudd av i en periode (eventuelt lades på halv effekt hvis det er mulig). Tidspunktet bilen skal være ferdigladd, hvor langt det er planlagt at den skal kjøre eller hvor mye effekt som er på batteriet kan være bestemmende faktorer. En elbil med lite batteri kan for eksempel ha høyere prioritet enn en elbil med større batteri og lengre rekkevidde.

10.7 Videre arbeid

Et utvalg av tiltak som kan gjøres for å videreutvikle og forbedre algoritmen er som følger:

- **Implementere og teste algoritmen hos pilotkunder**

Et naturlig steg for å videreutvikle algoritmen er å implementere den hos pilotkunder. Ved å installere den hos kunder med ulike boliger og forbruksprofiler kan algoritmens allsidighet og besparingspotensiale i større grad bedømmes. Løsninger for hyppig tilbakemelding om kundens opplevde komfort vil også være viktig for å bestemme hvor godt den fungerer, og hvilke forbedringer som kan gjøres.

- **Implementere flere typer fleksible laster**

Lading av elbil er en effektkrevende operasjon som blir mer og mer vanskelig i norske husholdninger. Nye ladestasjoner vil ha smarthusfunksjonalitet, som å regulere ladestrømmen etter behov eller utsette ladingen til et tidspunkt hvor strømmen er billigere [41]. For å få større fleksibilitet i systemet kan elbiler, eller for eksempel intelligente husholdningsapparater inkluderes. Dette er laster som kan settes på pause eller startes på et senere tidspunkt. En fjerde fleksibilitetsklasse kan derfor introduseres, nemlig belastning hvor hele eller deler av effektprofilen kan flyttes til et annet tidspunkt.

- **Inkludere distribuert energiproduksjon eller batteriløsninger**

Solceller i kombinasjon med batterier er en gode kilde til fleksibilitet som kan forsyne boligen med elektrisitet når strømmen fra nettet er dyr. Et effektkontrollsystem vil være et godt supplement som sikrer at effektforbruket ikke overstiger det batteriet kan levere. En naturlig videreutvikling av effektkontrollsystemet kan derfor være å implementere funksjonalitet for batteriløsninger og optimalisert valg av energiforsyning.

- **Kartlegge konsekvenser for spenningskvalitet**

Hyppig inn og utkobling av effektkrevende laster som elbiler eller varmpumper kan skape problemer for spenningskvaliteten i nettet. Det kan være interessant å måle et eventuelt bidrag til redusert spenningskvalitet som følge av effektkontrollsystemet.

- **Benytte maskinlæring i systemet**

Ved å implementere maskinlæring kan brukerenes vaner og timeplaner kartlegges. Et system som i tillegg lærer seg hvordan boligen reagerer på temperaturendringer vil være bedre rustet til å ta gode beslutninger for styring av fleksible laster. Annen funksjonalitet som kan bli tilgjengelig med et mer intelligent system er gjengkjenning av laster i systemet, optimalisering av laststyring med hensyn på kostnader eller koordinering med andre boliger slik at naboer ikke har sin maksimale effekttopp samtidig.

- **Utvikle gode verktøy for interaksjon med bruker**

Dersom et effektkontrollsystemet skal tilfredsstillende individuelle krav til komfort er det nødvendig med interaksjon mellom systemet og brukeren. Da trengs gode verktøy som er enkle å benytte slik at brukeren opplever økt nytte og komfort.

Kapittel 11

Konklusjon

I denne oppgaven har det blitt utviklet en algoritme for automatisk effektkontroll i bolig, med hensikt å vurdere nytteverdien for forbrukeren opp mot eventuell reduksjon i komfort. Basert på testing av algoritmen i smarthuslaboratoriet på NTNU Gløshaugen kan det konkluderes med følgende:

- Effekttopper reduseres på tilfredsstillende vis ved å koble ut laster i prioritert rekkefølge. Reduksjonspotensialet er lik den totale effekten til de fleksible lastene. For alle simuleringene i smarthuset ble den største effekttoppen redusert med mellom 30 og 46%.
- Så lenge effektgrensen ikke var satt for lavt, viste resultatene at lastene kun ble koblet ut i korte perioder. Det kan derfor antas at komforten ikke vil reduseres nevneverdig.
- De maksimale effekttoppene er et resultat av de ikke-fleksible lastene, og kan dermed ikke kuttes. Dersom toppene er kortvarige ser det ikke ut til at overforbruket fører til vesentlig økning i nettleien.
- Resultatene viser tendenser til at energiforbruket synker når grensen for maksimal effekt reduseres. Det er knyttet stor usikkerhet til beregningene på grunn av få simuleringer og at energikrevende operasjoner ble flyttet ut av måleintervallet. Implementering og testing hos forbrukere bør derfor gjennomføres for et større og mer variert beregningsgrunnlag.
- Med tariffmodellen *abonnert effekt* ble nettleien redusert med over 30% for alle de testede effektgrensene. *Time-of-use* og dagens energibaserte tariff ga liten endring i nettleien.

Tillegg A

Komponenter og laster i Smarthuset

Tabell A.1: Komponenter i testoppsettet

Produsent	Modell	Grensesnitt	Funksjon
Aktuatorer			
Embedded Systems	Logic Machine 4	KNX, Modbus, BAC-net, EnOcean, DALI, 1-Wire	Kontroller
Schneider electric	MTN647895	KNX	Relé
Sensorer			
Schneider electric	A9MEM3135 (iEM3135)	M-Bus	Strømmåler
Schneider electric	MTN6005-0001	KNX	CO ₂ -, fuktighets- og temperatursensor
GIRA stetigregler	4504031 / GB210003	KNX	Termostat
Kommunikasjonsenheter			
SIEMENS	5WG1 191-5AB01	KNX	Installasjonsbuss
Schneider	MTN681829	KNX	USB grensesnitt
solvimus GmbH	MBUS-GE20M	M-Bus, Modbus TCP	Gateway
ASUS	RT-AC3200		Trådløs Router
Laster			
ØGLÆND SYSTEM	OS 30-21 900W 55m		Varmekabel bad
Oso Hotwater	S300 - 3kW/1x230V SAGA bereder		Varmtvannsbereder
Wilfa	CP-1		Koketopp
Termaks	TS9026		Tørrsterilisator (Stekeovn)
Wilfa	ICP-2000		Induksjonstopp
Clas Ohlson	KE7709-A-UK		Vannkoker

Tillegg B

Algoritme

B.1 Deklarering

B.1.1 Konstanter

```
-----Constants in the system-----  
P_abb=5500  
  
--Temperature  
T_s={  
  comfort={kj=22,bad=28,gang=22},  
  save={kj=17,bad=28,gang=17}  
}  
  
-- Biggest temperature diff before temp violation  
DeltaT_comfort=0.5  
  
-- Biggest temperature diff before critical , not allowed to turn off loads  
DeltaT_critical=5  
  
--Water heater--  
--Time to heat water 65deg, Specific to heater  
t_to_heated=7.2  
  
-- Preferred max nr of hours since vb fully heated
```

```

Hours_prefered=24-math.floor(t_to_heated)
-- Max nr of days since vb fully heated
Days_max=6

--Schedule
night_save_end=6 --wake up -2
day_save_start=9 -- go to work
day_save_end=15 -- Home from work -2
night_save_start=23 -- Go to bed

```

B.1.2 Variable

```

-----Variables in the system -----

--The controllable loads in the system
loads={
  vb={k=5,room='bad',ad='11/0/0',B=grp.getvalue('11/0/0'),P=2850},
  vk={k=4,room='bad',ad='11/1/0',B=grp.getvalue('11/1/0'),P=850,T=grp.getvalue('4/1/0')},
  po={k=3,room='kj',ad='11/4/0',B=grp.getvalue('11/4/0'),P=800,T=grp.getvalue('0/1/2')},
  vf_gang={k=2,room='gang',ad='11/2/0',B=grp.getvalue('11/2/0'),P=800,T=grp.getvalue('4/2/0')},
  vf_kj={k=1, room='kj',ad='11/3/0',B=grp.getvalue('11/3/0'),P=1450,T=grp.getvalue('0/1/2')}
}

vb_pri_normal=loads.vb.k

```

B.2 Funksjoner

```
-----functions-----

--Counts the elements in a table T
function table_length(T)
  local count=0
  for _ in pairs(T) do
    count=count+1
  end
  return count
end

--Returns true if the current time (h) is within the scheduled save mode (whole hours)
function save_mode()
  local t=os.date("%t").hour
  if (t < night_save_end or t >= night_save_start) or (t<day_save_end and t>=
    day_save_start) then
    return true
  end

  return false
end

--Returns true if the current time is within the scheduled comfort mode
function comfort_mode()
  if not save_mode() then
    return true
  end

  return false
end

--Returns true if the temp diff between T_s and the temperature T in load.room is smaller
  than DeltaT_critical
function check_temp_critical(load)
```

```

if save_mode() and (T_s.save[load.room]-load.T <= DeltaT_critical) then
    return true
elseif comfort_mode() and (T_s.comfort[load.room]-load.T <= DeltaT_critical) then
    return true
else
    return false
end
end

--Returns true if the temp diff between T_s and the temperature T in load.room is smaller
    than DeltaT_comfort
function check_temp_comfort(load)
    if save_mode() and (T_s.save[load.room]-load.T <= DeltaT_comfort) then
        return true
    elseif comfort_mode() and (T_s.comfort[load.room]-load.T <= DeltaT_comfort) then
        return true
    else
        return false
    end
end

----- Functions for vb -----

--sets the time of vb_fully_heated when vb is fully heated
function set_fully_heated()
    local t=os.date('*t')
    local diff_max= loads.vb.P + 150
    local diff_min= loads.vb.P - 150
    --P_tot
    local P_tot1=grp.getvalue('10/0/16')
    --P_tot 15 sec later
    os.sleep(15) -- 10 sec delay
    local P_tot2=grp.getvalue('10/0/16')
    --Difference
    local P_diff=P_tot1-P_tot2

```



```

--if the vb.B is on and the power change is equal to vb.P (+-150W) then the water is
  heated
if loads.vb.B==true and P_diff >= diff_min and P_diff <= diff_max then
  storage.set('vb_heated_yday',t.yday)
  storage.set('vb_heated_hour',t.hour)
end
end

-- Returns number of days since vb fully heated
function days_since_fully_heated()
  local t=os.date("*t")
  local vb_yday=storage.get('vb_heated_yday')
  return (t.yday - vb_yday)
end

--Returns number of hours since vb fully heated
function hours_since_fully_heated()
  local t=os.date("*t")
  local vb_hour=storage.get('vb_heated_hour')
  local hours=24*(days_since_fully_heated()-1)+(24-vb_hour)+t.hour
  return hours
end

--Returns true if turn off conditions of vb are satisfied
function vb_cond_critical()
  local h=hours_since_fully_heated()
  local d=days_since_fully_heated()

  if h < Hours_prefered then
    return true
  elseif d >= Days_max then
    return false
  elseif h > Hours_prefered and d < Days_max and pri==0 then
    return true
  else
    return false
  end
end

```

```

    end
end
-----
--Returns the load{} from loads with priority pri
function get_load(pri)
    for v in pairs(loads) do
        load=loads[v]
        if load.k==pri then
            return load
        end
    end
    return nil -- returns nil if load with priority pri not found
end

-- Returns true if the conditions to turn off load are satisfied
function load_conditions(load)
    if load==loads.vb then
        if vb_cond_critical() then
            return true
        end
        elseif check_temp_critical(load) then
            return true
        end
    return false
end

--Request to turn of load with priority pri. If OK turn off load, B=0, and return true
function request_load_off(pri,k)

local load = get_load(pri)

    if (load and load.B==true and load_conditions(load) and pri>=k) then
        grp.write(load.ad, false) --load.B=0
        return true
    else

```

```
        return false
    end
end

--Sets the variable P_l to 0 if not request_load
function set_P_l (request_load)
    if request_load then
        return request_load.P
    else
        return 0
    end
end

--Sets the variable k to 0 if not request_load
function set_k (request_load)
    if request_load then
        return request_load.k
    else
        return 0
    end
end
```

B.3 Effektkontrollalgoritme

```

-----Load Control algorithm-----
function load_control_algorithm(request_load)

--Set variables

local P_l=set_P_l(request_load)
local k=set_k(request_load)

local n=table_length(loads)
local pri=n

while ((grp.getvalue('Total Aktiv Effekt')+P_l) >= P_abb ) do

    --- Start loop: if pri<0 ---
    if pri < 0 then
        if request_load then
            if load_conditions(request_load) then
                --Request load not allowed to turn on
                return 3
            else
                --Turn on request load
                grp.write(request_load.ad , true)
                return 2
            end
        else
            return 2
        end
        --ALERT
    end
end

--- End inner loop ---

-- Request Turn off load with priority pri
request_load_off(pri ,k)

```

```
-- Increment the iterator (priority variable)
pri=pri-1

-- Delay next command execution for 15 sec to allow updated values of P_tot
os.sleep(15)
end

-- Turn on requested load if  $P_{tot}+P_l < P_{abb}$ 
if request_load then
    grp.write(request_load.ad, true) --request_load.B=1
end

return 1

end -- function
```

B.4 Forespørsel om å skru på laster

B.4.1 Varmelaster

```
request_load=loads.vf_kj

if not check_temp_comfort(request_load) and request_load.B==false then
  local status=load_control_algorithm(request_load)
  if status ==1 then
    --log ('Exit 1:Bryter Varmefolie kjokken PAA')
  elseif status==2 then
    --log ('Exit 2:Bryter Varmefolie kjokken PAA, ALERT: P_tot > P_abb')
  elseif status==3 then
    --log ('Exit 3: Bryter varmemefolie kjokken ikke tillatt aa skru PAA')
  end
end
```

B.4.2 Varmtvannsbereder

```
request_load=loads.vb

local yday=storage.get('vb_heated_yday')
local hour=storage.get('vb_heated_hour')
local hours_heated=hours_since_fully_heated()

if days_since_fully_heated() >= Days_max then
  --give vb highest priority
  loads.vb.k=0
  --turn on vb.B
  grp.write(loads.vb.ad, true)

elseif hours_since_fully_heated() >= Hours_prefered then
  --give vb highest priority
```

```
loads.vb.k=0
--Request vb.B on
load_control_algorithm(request_load)
else
loads.vb.k=vb_pri_normal
end
```


Bibliografi

- [1] Byggforskserien. *Termisk inneklime. Betingelser, tilrettelegging og målinger*, 2017. https://byggforsk.no/dokument/193/termisk_inneklime_betingelser_tilrettelegging_og_maalinge.
- [2] M. Pipattanasomporn, M. Kuzlu, S. Rahman, and Y. Teklu. Load profiles of selected major household appliances and their demand response opportunities. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(2):742–750, March 2014.
- [3] Embedded systems. Logic machine4, product manual, 2014.
- [4] Schneider Electric. Knx actuators mtn647895. <https://www.schneider-electric.com/en/product/MTN647895/switch-actuator-reg-k-8x230-16-w.-manual-mode-and-current-detection%2C-light-grey>. Hentet 17.06.
- [5] Schneider Electric. Knx sensors, mtn6005-0001. <https://www.schneider-electric.com/en/product/MTN6005-0001/knx-co2%2C-humidity-and-temperature-sensor-ap>. Hentet 17.06.
- [6] Micro Matic. Temperaturregulator med 4-kanals binæringang. <https://www.micromatic.no/produkter/styringssystemer/knx/gb210003/?tab=beskrivelse>. Hentet 17.06.
- [7] Schneider Electric. Products a9mem3135. <https://www.schneider-electric.com/en/product/A9MEM3135/iem3135-energy-meter---63-a---m-bus---1-digital-i---1-digital-o-> Hentet 17.06.

- [8] M. Pipattanasomporn, M. Kuzlu, and S. Rahman. An algorithm for intelligent home energy management and demand response analysis. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4):2166–2173, Dec 2012.
- [9] NEK. Han: Informasjon til brukere. <https://www.nek.no/info-ams-han-brukere/>. Hentet 20.06.2018.
- [10] *ENØK i bygninger- effektiv energibruk*. Gyldendal undervisning med NTNU og SINTEF, 3 edition, 2007.
- [11] Haugaland kraft: Elektriske apparater. :<https://www.hkraft.no/spar-strom/elektriske-apparater-article716-578.html>. Hentet 26.06.18.
- [12] Sikom. <http://www.sikom.no/nb/produkter>. Informasjon om produkter, priser og løsninger.
- [13] Kari Løchen Velaug Mook Håvard Hansen, Torfinn Jonassen. Høringsdokument nr 5 - forslag til endring i forskrift om kontroll av nettvirksomhet, utforming av uttakstariffer i distribusjonsnett. Technical report, NVE, 2017.
- [14] Morten Stene Linn Renée Naper, Anne Sigrid Haugset. Innføring av effekttariffer i distribusjonsnett - et forklaringsproblem? Technical report, Trøndelag forskning og utvikling AS for NVE, November 2016.
- [15] VaasaETT. Assessing the potential of home automation in norway. Technical report, Rapport av VaasaETT for NVE, 2017.
- [16] EnergiNorge. Energi norge avviser nves modell for effektprising. <https://www.energinorge.no/fagomrader/stromnett/nyheter/2018/energi-norge-avviser-nves-modell-for-effektprising/>, March 2018. Hentet 25.06.2018.
- [17] Jon Eivind Johannessen. Hafslund nett: Høring om forslag til endringer i forskrift om kontroll av nettvirksomheten - tariffer. <http://webfileservice.nve.no/API/PublishedFiles/Download/201706767/2332302>, March 2018.

- [18] EnergiNorge. Nve revurderer nye effekttariffer etter stor motstand. <https://www.energinorge.no/fagomrader/stromnett/nyheter/2018/nve-revurderer-nye-effekttariffer-etter-stor-motstanden/>, April 2018. Med video av hele foredraget fra Vinterkonferansen. Hentet 25.06.
- [19] NVE. Nettleie for forbruk. <https://www.nve.no/elmarkedstilsynet-marked-og-monopol/nettjenester/nettleie/nettleie-for-forbruk/>, January 2017. Hentet 25.06.2018.
- [20] Olje- og energidepartementet. *Forskrift om måling, avregning, fakturering av nettjenester og elektrisk energi, nettselskapets nøytralitet mv.*, for-1999-03-11-301 edition.
- [21] Roger Ek Leif T. Aanensen, Steinar Fines. Ams + han, om å gjøre sanntid måledata tilgjengelig for forbruker. *NEK*, January 2015. 2. Versjon.
- [22] Thermal environmental conditions for human occupancy. ASHRAE STANDARD 55-2010, ANSI.
- [23] NVE. Energ og effekt. <https://www.nve.no/energibruk-og-effektivisering/energibruk-i-norge/energi-og-effekt/>, June 2016. Hentet 15.06.2018.
- [24] Eric Hsieh and Robert Anderson. Grid flexibility: The quiet revolution. *The Electricity Journal*, 30(2):1 – 8, 2017.
- [25] Glendimplex nordic, hvor stor panelovn trenger jeg? : <https://www.glendimplex.no/produkter/kjoepshjelp/hvor-mye-varme-trenger-jeg/>. Hentet 31.05.18.
- [26] Elkjøp. Panelovn-guiden, alt du bør vite om panelovner og effekt. <https://www.elkjop.no/cms/panelovn-guide/panelovn-guiden-alt-du-bor-vite-om-panelovner-og-effekt/>. Hentet 15.06.2018.
- [27] stikkontakten.no. Hvor stor ovn trenger du. <https://www.stikkontakten.no/blog/hvor-mye-varme-trenger-jeg>. Hentet 15.06.18.

- [28] Nexans. Bad og våtrom. https://www.nexans.no/eservice/Norway-no_NO/navigate_326137/Bad_og_vatrom.html. Hentet 15.06.2018.
- [29] Folkehelseinstituttet. Legionellose. <https://www.fhi.no/nettpub/smittevernveilederen/sykdommer-a-a/legionellose/#forekomst-i-norge>, June 2018. Hentet 15.06.2018.
- [30] Jan Erik Pettersen. Forebygging av legionellasmitte - en veiledning. Technical report, Folkehelseinstituttet, 2015. 4. utgave.
- [31] Johannes Idsø. Nåverdi. *Store norske leksikon*, Mai 2017. <https://snl.no/n%C3%A5verdi>. Hentet 1.Juni 2018.
- [32] Får du nok i avkastning? <https://www.dnb.no/privat/sparing-og-investering/faar-du-nok-i-avkastning.html>. Hentet 1.06.18.
- [33] Det kongelige finansdepartement. *Rundskriv R: Prinsipper og krav ved utarbeidelse av samfunnsøkonomiske analyser mv.*, 2014. Nr. R-109/14.
- [34] Harald N. Røstvik and Fredrick Juul Walløe. Det er på tide vi rydder opp i begrepet ”smarte bygg”. Publisert som en kommentar i Teknisk ukeblad. <https://www.tu.no/artikler/det-er-pa-tide-vi-rydder-opp-i-begrepet-smarte-bygg/407396>, September 2017. Hentet 05.06.18.
- [35] Anders Espeseth. Design og uttesting av smarthus. Master’s thesis, NTNU, 2016.
- [36] A. H. Mohsenian-Rad and A. Leon-Garcia. Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1(2):120–133, Sept 2010.
- [37] P. Du and N. Lu. Appliance commitment for household load scheduling. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(2):411–419, June 2011.
- [38] A. Mahmood, I. Khan, S. Razzaq, Z. Najam, N.A. Khan, M.A. Rehman, and N. Javaid. Home appliances coordination scheme for energy management (hacs4em) using wireless sensor

- networks in smart grids. *Procedia Computer Science*, 32:469 – 476, 2014. The 5th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT-2014), the 4th International Conference on Sustainable Energy Information Technology (SEIT-2014).
- [39] Vidar Kristoffersen Therese Troset Engan. Devid: Abonnert effekt - erfaringer fra hvaler og steinkjer. Power Point fra SmartGrid-konferansen 2014, Oslo http://www.sintef.no/globalassets/project/devid/link1_sg_konferanse_tariff.pdf, September 2014.
- [40] A. R. Boynuegri, B. Yagcitekin, M. Baysal, A. Karakas, and M. Uzunoglu. Energy management algorithm for smart home with renewable energy sources. In *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, pages 1753–1758, May 2013.
- [41] Alt om lading av elbil. Lastet ned fra ladestasjoner.no, en tjeneste levert av Fjordkraft: <https://www.ladestasjoner.no/alt-om-lading-av-elbil/kode-mode/>. Hentet 22.06.2018.