



LUNDS
UNIVERSITET

Modellering och driftoptimering av laststyrning i fjärrvärmesystem

Analys av potentiella styrstrategier

Björn Kjeang Funkqvist

Examensarbete på Civilingenjörsnivå

Avdelningen för...

Institutionen för Energivetenskaper

Lunds Tekniska Högskola | Lunds Universitet



Modellering och driftoptimering av laststyrning i fjärrvärmesystem

Analys av potentiella styrstrategier

Björn Kjeang Funkqvist

Mars 2020, Lund

Föreliggande examensarbete på civilingenjörsnivå har genomförts vid Avd. för Kraftverksteknik, Inst för Energivetenskaper, Lunds Universitet - LTH samt vid Energy Opticon AB i Lund.Handledare på Energy Opticon AB: Jonatan Kuuse; handledare på LU-LTH: Marcus Thern;examinator på LU-LTH: Per-Olof Johansson Kallioniemi.

Examensarbete på Civilingenjörsnivå

ISRN LUTMDN/TMHP-20/5450-SE

ISSN 0282-1990

© 2020 Björn Kjeang Funkqvist samt Energivetenskaper

Avdelningen för Kraftverksteknik

Institutionen för Energivetenskaper

Lunds Universitet - Lunds Tekniska Högskola

Box 118, 221 00 Lund

www.energy.lth.se

Förord

Med detta examensarbete avslutar undertecknad sina studier vid Lunds Tekniska Högskola, på civilingenjörsprogrammet Ekosystemteknik med specialisering mot Energisystem. Arbetet har utförts på plats hos och på uppdrag av Energy Opticon i Lund under höstterminen 2019.

Särskilt tack riktas till Jonatan Kuuse, handledare på Energy Opticon som alltid bidragit med idéer och stöd under arbetet. Jag vill även tacka Marcus Thern och Per-Olof Johansson Kallioniemi, handledare respektive examinator på institutionen för energivetenskaper för stöd och värdefulla kommentarer under arbetet.

Stort tack riktas slutligen till Björn Malmström och övriga anställda på Energy Opticon för alla bidrag, stora som små.

Björn Kjeang Funkqvist

Malmö 24 februari 2020

Sammanfattning

Värmebehov är beroende av rådande temperatur och väder samt kunders förbrukningsmönster. Detta ger upphov till varierande fjärrvärmelast och en konsekvent mer komplicerad värmeproduktion. Denna studie har undersökt potentialen för laststyrning, då byggnader utnyttjas som värmelager under kortare tid. Arbetet har fokuserat på modellering och utveckling av styrregler för laststyrningsmodellen samt implementering av detta i systemmodeller av Eon Malmös respektive EVITAs fjärrvärmenät. Utvärderingen har gjorts med hänsyn till driftoptimering av produktionsenheter i respektive fjärrvärmesystem. Studien har gjorts på uppdrag av Energy Opticon vars programvara Energy Optima 3 har använts för systemmodellering och driftoptimering.

Aktörerna Eon Malmö och Krafringen har bidragit med insyn i sitt arbete med laststyrning i Malmö respektive Lund, den sistnämnde sammankopplad med EVITA. Denna studie utgår från respektive aktörs uppskattade installerad laststyrningskapacitet som anses vara möjlig inom en överskådlig framtid. Dessa har även bidragit till att formulera olika styrregler som begränsar laststyrningens funktion.

De implementerade styrreglerna begränsar tillgänglig effekt och energimängd samt utnyttjandetid för laststyrning. Andra begränsningar som konstant effekt och upprampning av effekt under bortstyrning har testats. Resultatet av denna studie visar på besparingspotential för samtliga utfall med laststyrning implementerat. Med uppskattad installerad laststyrningskapacitet visar resultatet på möjlig besparing upp till mellan 0,11 % och 0,24 % av total produktionskostnad, beroende på systemförutsättningar. Ingen entydig koppling till tillgänglig effekt och energimängd kan dock urskiljas.

Flera olika styrstrategierna har analyserats utifrån besparingspotential och utnyttjande. Genom att styra enligt en förenklad strategi med konstant effekt påverkas inte resultatet påtagligt, jämfört med fri laststyrning. Däremot visas att begränsning av tillåten periodlängd för laststyrning innebär större påverkan på kostnadsbesparing och utnyttjande av laststyrning.

Laststyrning utnyttjas både oftare och till större energimängd i en systemmodell med mindre initial balansförmåga. Under samma förutsättningar visas även en generellt sett större besparingspotential med laststyrning. Laststyrning är därmed en effektiv metod för att bidra till ytterligare flexibilitet i fjärrvärmenät. Vidare, mer komplexa system kan utnyttja relativt stor installerad laststyrningskapacitet. Regionalisering av flera fjärrvärmenät innebär exempelvis att laststyrning i en stad kan utnyttjas i andra städer genom ett sammankopplat nät.

Abstract

Heat load is dependent on outside temperature and weather as well as consumer habits. This leads to a variation in heat load and consequently a more complicated production. This study investigated the potential of demand side management, using load shifting and utilizing buildings for thermal storage. The work focused on modelling and developing operating conditions as well as implementation in district heating system models of Eon Malmö and EVITA. This was evaluated by optimizing the operation of production units in both modelled systems. This study was made by request of Energy Opticon, whose software Energy Optima 3 was used for system modelling and optimization.

Local actors in district heating, Eon Malmö and Kraftringen, contributed with insight to previous work with demand side management in Malmö and Lund respectively. The latter system is connected to a larger network by EVITA. This study is based on soon estimated capacity available for demand side management. Operating conditions were also formulated with their insight.

The implemented operating conditions limit power and amount of heat energy available, as well as time limits, during load shifting. Other limitations such as constant and ramped up power was tested. The result from this study shows potential for cost reduction in all outcomes when a demand side management model was implemented. With estimated capacity applied, up to 0,11 % and 0,24 % savings on total cost was shown for Kraftringen and Eon Malmö respectively. No clear connection was found between cost reduction and available power and heat amount. On the other hand, it was shown that limiting the maximum time allowed for load shifting had the greatest impact on cost reduction.

Demand side management was used more frequently as well as utilizing a bigger amount of heat energy in the system model of Eon Malmö. A higher overall potential for cost reduction was also found here. This is likely due to less initial available capacity for heat accumulation and load balancing, compared to EVITA. On the other hand, a higher load shifting capacity could be utilized in Lund, relative to the size of its heat load. As Lund is connected to a larger network through EVITA, demand side management can here be utilized in other connected cities.

Innehåll

Förord	I
Sammanfattning	II
Abstract	III
Innehållsförteckning	IV
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Mål	2
1.4 Frågeställningar	2
1.5 Avgränsningar	3
1.6 Tidigare studier	3
2 Teori	5
2.1 Fjärrvärme	5
2.2 Produktionsenheter	6
2.2.1 Värmeverk	6
2.2.2 Kraftvärmeverk	6
2.2.3 Panna	8
2.2.4 Turbin	9
2.2.5 Kondensor	9
2.2.6 Pump	10
2.2.7 Brännkammare	10
2.3 Distribution	10
2.3.1 Last	10
2.3.2 Trycksättning	11
2.3.3 Värmelagring	12
2.4 Kostnadsfaktorer	12

2.4.1	Bränsle	12
2.4.2	Start- och stoppkostnader	12
2.4.3	Laständringskostnader	13
2.4.4	Elhandel	13
2.5	Laststyrning som metod för effektutjämning	13
2.5.1	Byggnaden som värmelager	13
2.5.2	Laststyrning i fjärrvärmesystemet	16
2.6	Sammanfattade regler och begränsningar	18
3	Beskrivning av medverkande aktörer	20
3.1	Eon Malmö	20
3.2	Krafttringen	20
4	Metod	22
4.1	Litteraturstudie	22
4.2	Möten med lokala aktörer inom laststyrning	22
4.3	Modellering och simuleringar i Energy Optima 3	22
5	Modellering	24
5.1	Modellerade enheter	27
5.2	Styrregler	28
5.2.1	Konstant effekt under bortstyrning	28
5.2.2	Upprampning av effekt under bortstyrning	29
5.3	Simuleringar	29
5.3.1	Laststyrning modelleras som en ackumulatortank	30
5.3.2	Laststyrning modelleras som försörjning från en extern källa	32
5.4	Optimeringstid	33
5.5	Datahantering	33
6	Resultat	35
6.1	Utnyttjande av laststyrning	35

6.2	Kostnadsbesparing	39
6.3	Påverkan av prissättning på värmeenergi från extern värmekälla	41
6.4	Påverkan av olika styrregler	41
7	Diskussion	45
7.1	Olika förutsättningar för EVITA och Eon Malmö	45
7.2	Skalningsfaktorer	45
7.3	Styrregler	46
7.3.1	Exkludering av samtliga styrregler	46
7.3.2	Sekvenslängder	47
7.3.3	Styrning med konstant effekt	47
7.4	Extern källa som modelleringsmetod	47
7.5	Begränsningar	48
7.6	Analys av metodval	48
7.7	Möjliga förbättringar av detta arbete	49
8	Slutsats	50
9	Förslag på ytterligare studier	52
	Referenser	VII

1 Inledning

Arbetets bakgrund, syfte och mål beskrivs under detta avsnitt. Detta leder vidare till formuleringar av de frågeställningar som ligger till grund för studien.

1.1 Bakgrund

Fjärrvärme har historiskt sett varit drivet av efterfrågan då kunden förväntat sig att få värme levererat vid behov. Variation i värmebehovet skapar ett ojämnt lastmönster som producenten i sin tur måste uppfylla. Exempelvis innebär morgonen i regel en kraftig ökning i värmelast då kontorsbyggnader värms upp samtidigt som morgonduschar förbrukar tappvarmvatten. Kostnadsreduceringar har i första hand nåtts genom effektiviseringar inom produktion och distribution av fjärrvärmen, vilket lett till en överlag minskad värmelast utan direkt påverkan på variationen. (Frederiksen & Werner 1993)

Lastutjämning har presenterats inom flera energigrenar som ett mer flexibelt sätt att åstadkomma optimeringar på systemnivå. Metoden innebär att förflytta spetslast från perioder med hög produktion till perioder med låg produktion utan att nödvändigtvis minska den totala värmelasten. Genom att jämna ut produktionen används baslastenheter till större grad och därmed undviks onödiga starter av spetsenheter samt hög belastning av nätet. Förflyttning från spets- till baslastenheter ger även lägre marginalkostnader i och med att spetsenheter ofta drivs på fossila bränslen med höga bränslekostnader. Då en last förskjuts i tiden finns möjligheten att bättre anpassa sin produktion till efterfrågan och marknadspriserna. (Frederiksen & Werner 1993)

Inom fjärrvärme kan lastutjämning åstadkommas på olika sätt. Ackumulatortankar används idag till hög grad som energilager som kan laddas under perioder med låg last och laddas ur under hög last. Hur stor nytta detta har för systemet beror på den mängd energi som kan lagras i tanken (MWh) samt hur snabbt värme kan matas ut på nätet (MW). En annan metod innebär att använda fjärrvärmenätet som energilager genom att höja framledningstemperaturen innan en lasttopp. I likhet med ackumulatortanken har nätets utformning och dimensioner stor inverkan på systemnyttan. (Frederiksen & Werner 1993)

I likhet med dessa beprövade metoder har ytterligare en metod lyfts fram som bygger på att använda fjärrvärmenätets kunder som energilager. Grundtanken är inte ny då laststyrning undersökts redan på 80-talet av Österlind (1982) och Gellings & Chamberlin (1988). Däremot så är det först under senare år som möjligheten att införa laststyrning inom fjärrvärme har studerats på större skala (Wernstedt et al. 2008, Kensby et al. 2015). Genom att tillåta inomhustemperaturen att tillfälligt variera inom ett intervall som är omärkbart för kunden kan lastprofilen jämnas ut med syfte att effektivisera

produktionen. I motsats till de tidigare nämnda metoderna för laststyrning syftar denna till att jämna ut lasten på sekundärsidan av nätet, bortom eventuella flaskhalsar. En uppenbar begränsning finns i att kundens komfort inte kan försummas och det finns därmed en gräns på hur mycket värme som kan laddas in och ur, samt hur snabbt detta sker. Denna metod kan innebära en potentiell besparing då nätägaren slipper investera i exempelvis en ackumulatortank eller utbyggnad av flaskhalsar (Wernstedt & Johansson 2009).

Energy Opticon är leverantör av sitt egenutvecklade program Energy Optima 3 (EO3). Deras kunder använder detta program som verktyg för att totaloptimera driften av sina energisystem. Kunderna är främst aktiva inom kraftvärmeproduktion. Med EO3 beräknas en optimal drift av systemets enheter och nät ur en ekonomisk och miljömässig synvinkel. Det saknas dock ett sätt att idag modellera laststyrning, vilket är ett intressant komplement till programmet. Ett mål för detta arbete är att utöka det existerande programmet med en modul som motsvarar laststyrning av fjärrvärme. Med detta tillägg får Energy Opticon ett sätt att utvärdera lönsamheten för sina kunder, om laststyrning implementeras i deras fjärrvärmesystem. Vidare utvärderas olika styrregler samt olika storlekar på installation av laststyrning i två existerande fjärrvärmesystem. Dessa utvärderas ur ett lönsamhetsperspektiv samt med hänsyn till hur mycket laststyrningen utnyttjas i de olika fallen. Denna undersökning kan underlätta vid beslut om installationsstorlek och vid införande av styrregler. EO3 används för att modellera fjärrvärmenätet med dess komponenter.

1.2 Syfte

Arbetets övergripande syfte är att ur ett systemperspektiv utveckla laststyrning kopplat till kraftvärmeproduktion samt att utvärdera om detta kan bidra till jämnare kraft- och värmeproduktion och ett effektivare energisystem.

1.3 Mål

Att utvärdera effekterna och lönsamheten av laststyrning ur ett systemperspektiv samt att fastställa vilka styrstrategier som är relevanta att införa till laststyrningsmodellen. Dessa styrstrategier ska utvärderas efter vilken inverkan de har på utnyttjandet och besparingspotentialen av laststyrning. Denna modell av laststyrning ska kunna inkluderas som modul i EO3.

1.4 Frågeställningar

- Vilka parametrar är intressanta vid tillägg av laststyrning som modul till existerande modell?

- Vilka styrregler är relevanta att införa, för att underlätta styrning för operatören samt för att begränsa påverkan på inomhusklimatet?
- Vilken inverkan har dessa styrregler på laststyrningens funktion?
- Visar modellen att laststyrning minskar produktionskostnaderna?
- Vilka systemförutsättningar lämpar sig särskilt bra för laststyrning?
 - Under vilka förutsättningar används laststyrning mer?
 - Under vilka förutsättningar leder laststyrning till större kostnadsbesparingar?

1.5 Avgränsningar

Vid utvärdering av lönsamhet har kostnaden av installationskostnader av styrsystem ej tagits hänsyn till.

Fjärrvärmekunderna representeras under arbetet förenklat som en punktlast där kundernas behov är enhetligt och jämnt fördelat. Eventuella flödesbegränsningar och geografisk spridning av lasten inom städer tas inte hänsyn till i detta arbete.

Denna rapport syftar ej till att utreda laststyrningens interaktion med byggnader. Operatören ser endast en värmeväxlare som kommunicerar med signalerna MW och MWh mot resten av fjärrvärmesystemet.

Tillkommande regler som begränsar laststyrningens funktion är bestämda med syfte att förenkla styrningen från primärsidan av fjärrvärmenätet.

1.6 Tidigare studier

1. Kärkkäinen et al. (2003) studerade pilotstudier av laststyrning i flera byggnader i Finland och Tyskland. Studien visade att spetslasten kan minskas med upp till 20-25 % under 2-3 timmar utan större inverkan på inomhusklimatet. Den termiska effekten borde återställas linjärt för att undvika en efterföljande spets då värmen ska återföras.
2. Myrendal & Olgemar (2010) utvärderar ett fjärrstyrningssystem av flera fjärrvärmecentraler kopplade till bostadshus i Linköping. De fann att lasten under en tretimmarsperiod kan minskas i medel med 20-30 % utan att inomhusklimatet försämras. Efter bortstyrningen ökar i de flesta fallen lasten igen med översläng uppemot 13 %. Energibesparingen är spridd i de olika fallen varför det är svårt att dra en slutsats. Likaså är inte påverkan på inomhuskomforten entydig. Studien visar på en mindre ekonomisk besparingspotential om laststyrning implementeras.
3. Kensby et al. (2015) använde sig av laststyrning under en pilotstudie i Göteborg då signalen från en utomhustemperaturgivare justerades upp

och ned i olika cykler under ett års tid. Sambandet mellan värmelast och utomhustemperatur antas här vara linjär. Studien visar att tunga byggnader, med en stomme av betong, kan utnyttjas som energilager till laststyrning med 0,1 kWh/kvm golvyta utan att inomhustemperaturen varierar mer än 0,5 grader.

4. Kontu et al. (2018) undersöker flera laststyrningsscenarier för tre fjärrvärmesystem med olika värmelastprofiler. Studien påvisar en låg lönsamhet med mindre än 2 % besparing samt att spetslasten inte minskar anmärkningsvärt. Bäst lönsamhet fås för ett mellanstort system och det konstateras även att olika uppbyggda system kräver specifika styrningsmetoder. Större system innebär större komplexitet med fler enheter där spetslastenheter i dagsläget sällan används. Mindre system förlitar sig oftare på spetslastenheter under perioder med hög drift och därför har de större potential att sänka sin maxeffekt.
5. Romanchenko et al. (2018) jämför potentialen för byggnader som energilager med ordinarie centraliserade energilager. Under sin studie fann de att centraliserade energilager används för att lagra dubbelt så mycket energi under ett års tid, detta till följd av mindre värmeförluster än i byggnader. Av den anledningen använder de inte byggnader för värmelagring längre än några dagar.

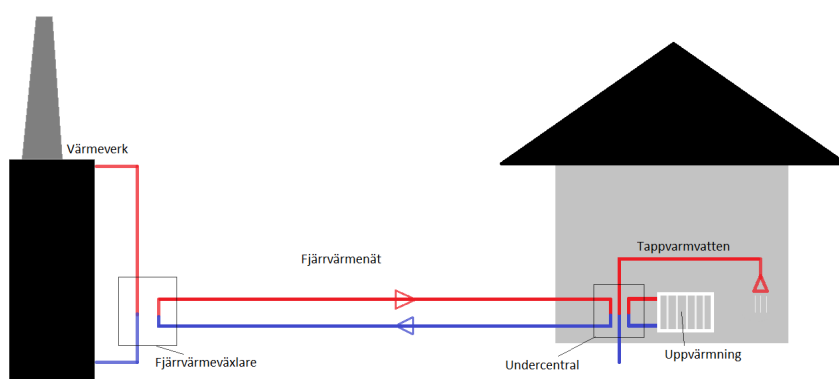
2 Teori

I detta avsnitt följer den teori som laststyrning grundar sig på i detta arbete. Först beskrivs den övergripande teorin bakom produktion och distribution av fjärrvärme samt olika kostnader kopplade till dessa delar. Sedan beskrivs teorin bakom laststyrningens funktion inom fjärrvärme. Detta avser utnyttjandet av byggnaders värmetröghet och dess koppling till flexibilitet i fjärrvärmesystemet.

2.1 Fjärrvärme

I följande avsnitt presenteras en övergripande bild av ett fjärrvärmesystem med dess huvudsakliga komponenter som produktionsenheter, distribution och kostnadsfaktorer. Teorin som presenteras grundar sig huvudsakligen i boken *Fjärrvärme: Teori, teknik och funktion* (Frederiksen & Werner 1993) om ingen annan referens anges.

Den grundläggande tanken bakom fjärrvärmetekniken är att värmen produceras centralt och sedan distribueras för att tillgodose kundernas behov av uppvärmning och tappvarmvatten. Den centraliserade värmeproduktionen innebär att resurser kan användas effektivare då verkningsgrader generellt är högre i större förbränningsenheter än små, samt att lokala värmeöverskott och bränslen av sämre kvalitet kan tillvaratas. Via distributionsledningar transporteras trycksatt varmvatten till kundernas fjärrvärmecentraler där värmen tas upp via värmeväxlare innan det avkylda vattnet leds tillbaka till produktionsanläggningen. I figur 2.1 nedan illustreras fjärrvärmens övergripande funktion.



Figur 2.1: Övergripande bild av ett fjärrvärmesystem.

2.2 Produktionsenheter

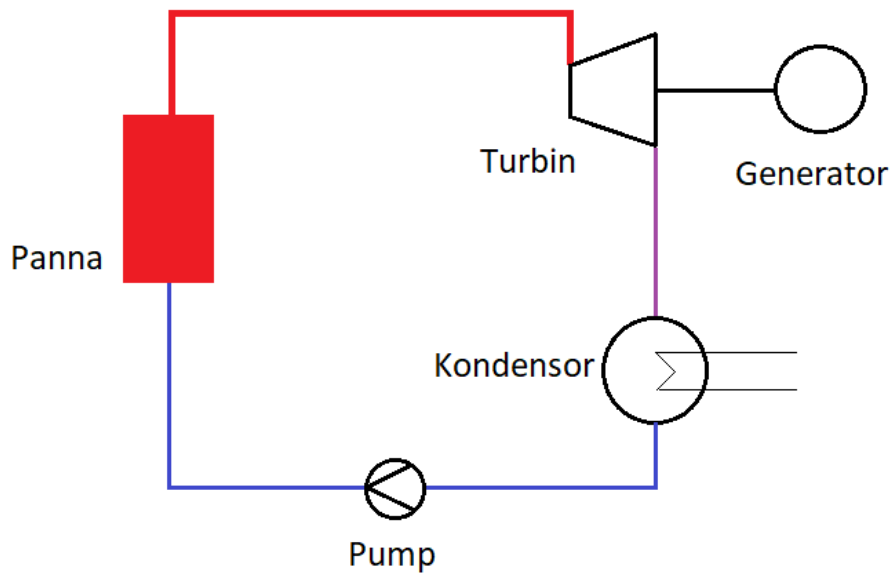
2.2.1 Värmeverk

Med värmeproduktion som sin enda funktion är värmeverk relativt enkla enheter. De består i regel av hetvattenpanna, kondensor och pump där värmen växlas mot fjärrvärmenätet eller industriella processer. Det är vanligt att fjärrvärmesystem kompletteras med rent värmeproducerande spetsenheter som kan starta snabbt vid hög last eller nödsituationer.

2.2.2 Kraftvärmeverk

I Sverige är det vanligt med stora anläggningar som producerar både el och värme, så kallade kraftvärmeverk. Vid denna typ av kombinerad produktion tillvaratas restvärmen till fjärrvärme efter att det värmeenergibärande mediet passerat turbinen och därmed kan en högre verkningsgrad uppnås jämfört med ren kraftproduktion. Med ytterligare en produktionskapacitet ökas dock systemets komplexitet varför det kan vara problematiskt att nå full verkningsgrad i praktiken. Då fjärrvärme utsätts för variationer i temperatur och last innebär det att kraftvärmeproduktionen måste anpassas och därmed inte kan optimeras för att drivas på full kapacitet.

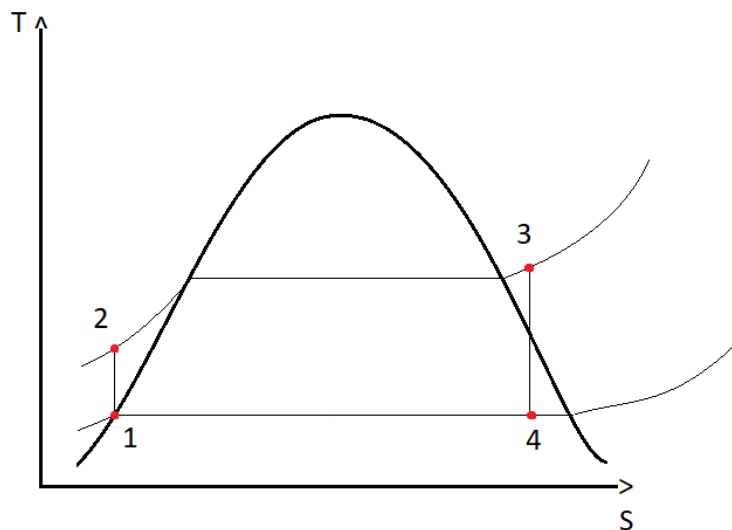
I en ångturbin produceras elektricitet enligt Rankinecykeln med vatten som energibärare. Vatten bär värmeenergin som överhettad ånga från en värmepanna genom turbinen innan det kyls av i en kondensor. I turbinen omvandlas värmeenergin till mekaniskt arbete som driver en generator och producerar el. I kondensorn växlas värmen till fjärrvärmenätet innan vattnet trycksätts och förs vidare till värme pannan. Schematiska bilder över en ångturbin cykel med värmeväxling mot fjärrvärme samt Rankinecykeln presenteras i figur 2.2 respektive 2.3 nedan.



Figur 2.2: Ångturbin cykel

Rankinecykeln kan under ideala förhållanden beskrivas enligt följande steg nedan (Çengel & Boles 2014). Se figur 2.3 för illustrering i T-S diagram.

- 1-2. Isotrop kompression genom en pump
- 2-3. Isobar överhettning genom en panna
- 3-4. Isotrop expansion genom en turbin
- 4-1. Isobar kondensering genom en kondensor



Figur 2.3: T-S diagram för en ideal Rankinecykel.

I ett ångkraftverk sker förbränningen utanför ångcykeln. Detta har fördelen att avgaser med eventuella föroreningar inte kommer i kontakt med cykelns olika delar, där de skulle kunna orsaka skada genom korrosion och avlagringar. Detta ger ångkraftverk fördelen att de kan utnyttja billigare samt ett bredare spektrum av bränslen, som exempelvis avfall.

Den totala verkningsgraden för ett värme- och kraftvärmeverk kan uttryckas enligt ekvation 2.2.1. Även elverkningsgrad samt godhetstal beskrivs i ekvationerna 2.2.2 respektive 2.2.3 nedan.

$$\eta_{\text{total}} = \frac{P_{el} + P_{FV}}{P_{in}} \quad (2.2.1)$$

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{P_{in}} \quad (2.2.2)$$

$$\alpha = \frac{P_{el}}{P_{FV}} \quad (2.2.3)$$

η_{total} = Total verkningsgrad []

η_{el} = Elverkningsgrad []

α = Godhetstal []

P_{el} = Levererad elektrisk effekt [W]

P_{FV} = Levererad effekt fjärrvärme [W]

P_{in} = Förbrukad effekt bränsle och el [W]

Dessa verkningsgrader är resultat av de producerande enheternas ingående delar och respektive verkningsgrader. De ideala cyklerna som tidigare beskrivits är inte en realitet, då förluster alltid tillkommer och verkningsgraden för en process aldrig når 100%. Nedan beskrivs mer ingående de olika delarna i ovan beskrivna processer.

2.2.3 Panna

I hetvattenpannan tillförs värmeenergi genom eldning av bränsle vilket värmer och förångar matavattnet. Effekten med vilket värmen tillförs beskrivs enligt ekvation 2.2.4 nedan (Frederiksen & Werner 2013).

$$V = \eta_p \cdot m_b \cdot H_u \quad (2.2.4)$$

V = nyttiggjord värmeeffekt [W]

η_p = Pannverkningsgrad []

m_b = Bränsleflöde [$\frac{kg}{s}$]

H_u = undre värmevärde [$\frac{J}{kg}$]

I elpannor värms vatten upp med elektricitet. Dessa är direkt tillgängliga och har i regel en mycket hög verkningsgrad. Dess användning styrs även till stor del av elpriset varför de används till störst del vid spetslast och lågt elpris.

2.2.4 Turbin

I turbinen expanderar trycksatt ånga eller rökgaser vilket omvandlar värmeenergi till mekanisk kraft. Kraften driver en generator och omvandlas i sin tur till elektricitet. Den elektriska effekten som utvinns ur turbinen beskrivs enligt ekvation 2.2.5 nedan (Frederiksen & Werner 2013). Se illustrering av isotrop expansion i figur 2.3.

$$P_e = \dot{m} \cdot (h_3 - h_4) \cdot \eta_{\text{turbin}} \cdot \eta_{\text{generator}} \quad (2.2.5)$$

P_e = Elektrisk effekt [W]

\dot{m} = Massflöde av ånga eller rökgas [$\frac{kg}{s}$]

h = Entalpi [$\frac{J}{kg}$]

η_{turbin} = Turbinens verkningsgrad []

$\eta_{\text{generator}}$ = Generators verkningsgrad []

2.2.5 Kondensor

Efter turbinen kyls ångan ned i kondensorn och kondenseras till vatten. I ett kraftvärmeverk används denna process för att överföra värmeenergin till fjärrvärme som sedan distribueras. Den värmeeffekt som växlas i kondensorn beskrivs av ekvation 2.2.6 (Frederiksen & Werner 2013).

$$P_{FV} = \dot{m}_{FV} \cdot (h_2 - h_1) \quad (2.2.6)$$

Där h_1 och h_2 anger entalpi före respektive efter kondensorn. Med antagande om att vattens specifika värmekapacitet vid konstant tryck är konstant inom aktuellt temperaturintervall kan denna ekvation utvecklas till 2.2.7.

$$P_{FV} = \dot{m}_{FV} \cdot c_p \cdot (T_f - T_r) \quad (2.2.7)$$

P_{FV} = Värmeeffekt växlad till fjärrvärmenätet [W]

\dot{m}_{FV} = Massflöde av fjärrvärmevatten [$\frac{kg}{s}$]

c_p = Vattens specifika värmekapacitet [$\frac{J}{kg \cdot K}$]

T_f = Framledningstemperatur [°C]

T_r = Returledningstemperatur [°C]

2.2.6 Pump

Pumpen driver processen genom att trycksätta vattnet på väg tillbaka till pannan. Med antagandet om att vatten är en inkompressibel vätska, kan effekten som pumpen kräver för att arbeta mellan två trycklägen beskrivas av ekvation 2.2.8 nedan (Frederiksen & Werner 2013).

$$P_{\text{pump}} = \dot{V} \cdot \frac{\Delta p}{\eta_{\text{pump}}} \quad (2.2.8)$$

P_{pump} = Pumpens elektriska effekt [W]

\dot{V} = Volymflöde [$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$]

Δp = Tryckhöjning [Pa]

η_{pump} = Pumpens verkningsgrad []

2.2.7 Brännkammare

Liksom i hetvattenpannan tillförs i brännkammaren värmeenergi till cykeln. Komprimerad luft samt bränsle förbränns och leds därefter till turbinen.

2.3 Distribution

2.3.1 Last

Det samlade behovet av värme och tappvarmvatten hos kunderna är det som utgör fjärrvärmelasten. Systemets produktionsenheter måste hela tiden förse tillräckligt med värmeeffekt för att uppfylla denna. Värmebehovet är starkt beroende av rådande utomhustemperatur och varierar därmed över året, med störst behov under vinterhalvåret. Tappvarmvattenbehovet visar däremot en dygnsvariation med tydliga toppar på morgon och kväll.

Det samlade behovet av fjärrvärme uttrycks på samma sätt som fjärrvärmelasten enligt ekvation 2.2.7. Operatören har här möjlighet att påverka två variabler i ekvationen; flödet av vatten, genom kontroll av trycksättningen, samt framledningstemperaturen. I regel är det fördelaktigt att använda sig av en låg framledningstemperatur i nätet eftersom högre temperatur orsakar större värmeförluster, vilket innebär högre kostnader. I större fjärrvärmesystem är det vanligt med kritiska punkter där vattenflödet begränsas genom en flaskhals. Ofta befinner sig dessa punkter i utkanten av distributionssystemet. Då vattenflödet är begränsat tillgodoses värmebehovet genom att framledningstemperaturen höjs. Denna höjning av temperaturen påverkar hela nätet och medför därmed ökade värmeförluster, och konsekvent högre kostnader, för hela systemet.

2.3.2 Trycksättning

Tryckfall förekommer alltid i distributionssystemet på grund av friktion mellan fjärrvärmevattnet och insidan på distributionsledningar samt genom värmeväxlare i undercentraler och liknande. Med antagandet att flödet i ledningarna är fullständigt turbulent kan tryckfallet genom fjärrvärmeledningen uttryckas enligt ekvation 2.3.1 nedan.

$$\Delta p = -\frac{8\lambda L}{d^5 \pi^2 \rho} \cdot \dot{m}^2 \quad (2.3.1)$$

Δp = Tryckfall [Pa]

λ = Friktionsfaktor []

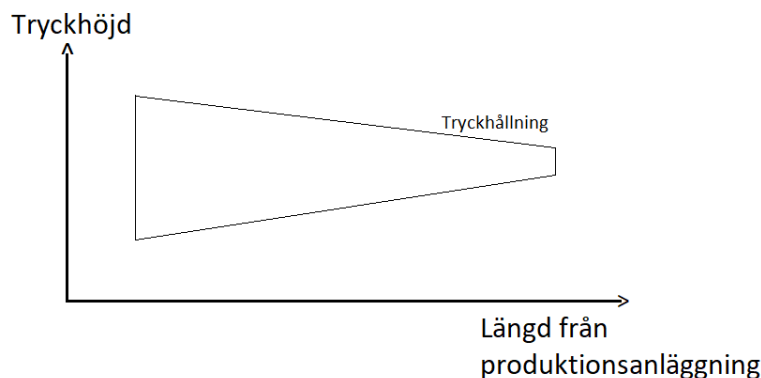
L = Fjärrvärmeledningens längd [m]

d = Fjärrvärmeledningens inre diameter [m]

ρ = Fjärrvärmevattnets densitet [$\frac{kg}{m^3}$]

\dot{m} = Massflöde [$\frac{kg}{s}$]

Trycksättning åstadkoms dynamiskt med pumpar eller statiskt med exempelvis högt belägna ackumulatortankar som placeras på olika platser i distributionsnätet. Den sammanlagda trycksättningen som krävs för att övervinna tryckfallet kan illustreras i ett tryckhöjdsdiagram. I ett sådant uttrycks pumpkapaciteten i tryckhöjd, som kan jämföras med höjden av en vattenpelare. Se figur 2.4 nedan för illustration av ett enkelt tryckhöjdsdiagram. Trycket i ledningen ses här minska med ökande distans från produktionsanläggningen samt då värmen växlas hos kunden längst ut i nätet.



Figur 2.4: Enkelt tryckhöjdsdiagram.

Tryckbegränsningar finns för att skydda distributionsnätet vid för lågt eller för högt tryck. Vid lågt tryck utgör risk för kokning samt problem med leveransen av fjärrvärme begränsningar. Ökad risk för kokning uppstår vid hög temperatur samt vid höga punkter i nätet där trycket är lägre på grund av höjdskillnaden. Uppåt begränsas trycket av distributionsledningarnas hållfasthet. Genom att placera pumpar i utkanten av distributionsnätets behöver

inte de centrala pumparna stå för all trycksättning och tryckbegränsningarna kan därmed undvikas till viss mån. Det differenstryck som behöver skapas av samtliga pumpar i nätet beskrivs nedan i ekvation 2.3.2.

$$\Delta p_{\text{pump}} = \Delta p_f + \Delta p_r + \Delta p_{\text{min}} \quad (2.3.2)$$

Δp_{pump} = Totalt differenstryck [Pa]

Δp_f = Tryckfall ut till distributionsnätets periferi [Pa]

Δp_r = Tryckfall tillbaka från distributionsnätets periferi [Pa]

Δp_{min} = Minsta tillåta differenstryck över fjärrvärmecentral i distributionsnätets periferi [Pa]

2.3.3 Värmelagring

Värme lagras vanligtvis i varmvatten i stora ackumulatortankar som kopplas upp nära produktionssidan på fjärrvärmenätet. Värmeenergi kan laddas in eller ur tanken vid fördelaktiga tidpunkter genom att varmvatten pumpas in i tanken eller ut till fjärrvärmenätet. Syftet med denna energilagring är att bistå produktionsenheter genom att jämna ut förändringar i fjärrvärmelast eller förskjuta produktion till en annan tid. Därmed kan kostnader kopplade till start och stopp av enheter samt laständringar undvikas. Kapaciteten för värmelagring begränsas här av tankens storlek samt hur snabbt varmvattnet kan pumpas in eller ut ur tanken.

2.4 Kostnadsfaktorer

2.4.1 Bränsle

Den sammanlagda kostnaden för den producerade värmen är starkt beroende av vilket bränsle som används. Förmågan hos vissa enheter att använda billigt och lågkvalitativt bränsle är en anledning till att de används till baslast och ofta optimeras för att köras på maximal kapacitet om det är möjligt. Dyrare alternativ, som flertalet fossila bränslen, används i regel endast under spetslast. Då marginalkostnaden för spetsenheter blir relativt hög används dessa så lite som möjligt.

2.4.2 Start- och stoppkostnader

Vid både start och stopp av värmeproducerande enheter sker förändringar i tryck och temperatur vilket innebär materialförslitningar. Dessutom tillkommer servicekostnader. Uppstart innebär ofta en bränsleåtgång då en enhet ska värmas upp till arbetstemperatur. Alternativt kan kallstarter innebära större kostnader än motsvarande bränsleåtgång då detta medför ytterligare materialförslitning.

2.4.3 Laständringskostnader

Baslastenheter som optimerats för att köras på maximal kapacitet kan uppleva större kostnader vid förändrad produktion. Laständringar innebär ökad förslitning och ökat behov av service av enheter. Dessutom påverkar laständringshastigheten hur stora dessa kostnader är.

2.4.4 Elhandel

Producerad el används till viss del internt i kraftvärmesystemet för att driva pumpar, pannor och liknande. Nettoproduktionen kan säljas på elbörsen och räknas då som en negativ kostnad mot produktionen av värme.

2.5 Laststyrning som metod för effektutjämning

För att utnyttja laststyrning på ett effektivt sätt måste energilagringen i byggnader kunna utnyttjas under den tid som är mest optimal för operatören, samtidigt som inomhusklimatet i byggnaden inte försämras märkbart. Hur detta fungerar undersöks i kommande avsnitt.

2.5.1 Byggnaden som värmelager

En eller flera fjärrvärmekunder, kopplade till samma undercentral, kan för enkelhetens skull ses som ett värmelager kopplad till fjärrvärmenätet. Kunden skapar genom sitt värmeeffektbehov en fjärrvärmelast, som leverantören ska uppfylla för att kunden ska vara nöjd. Om värmetillförseln minskar eller ökar i förhållande till lasten leder det till en lägre respektive högre inomhustemperatur. Liknelsen med ett värmelager blir då att en lägre inomhustemperatur innebär att nivån i värmelagret minskar och vice versa då nivån ökar. Wernstedt & Johansson (2009) beskriver smart laststyrning som en samordning mellan två målbilder i konflikt; att ”upprätthålla en acceptabel inomhuskomfort samtidigt som den av operatören önskade systemövergripande konsumtionsprofilen uppnås”. Att under kortare perioder påverka inomhusklimatet med en grad upplevs sällan av de boende. Variationer i samma storleksordning är redan kopplat till det lokala konsumtionsmönstret, varför det i praktiken inte märks. Detta ger operatören en frihet att avvika från den ordinarie lastprofilen inom vissa förutbestämda regler. Att bestämma dessa regler är avgörande för att skapa en fungerande smart laststyrning, där båda målbilderna samordnas.

Mängden energi som kan lagras i en byggnad beror dels på vilken variation i inomhusklimat som är accepterat samt på byggnadstyp. Pilotstudier av Kärkkäinen et al. (2003) samt Kensby et al. (2015) studerade hur olika byggnader svarade på variationer i levererad effekt. Dessa studier utfördes på olika byggnadstyper i Sverige, Finland och Tyskland. Resultatet av studierna

visade på att tunga konstruktioner med betongstomme är bäst lämpade för laststyrning då deras relativt höga värmetröghet möjliggör större variationer i effekt utan försämrad komfort. Hög värmetröghet är ett resultat av god isolering och stor termisk massa i byggnaden och kan även beskrivas av en byggnads tidskonstant, som bestäms enligt ekvation 2.5.1 nedan. Tidskonstanten τ ses här vara proportionell mot kvoten mellan byggnadens värmekapacitet och dess effektförluster. Byggnader med högre tidskonstant reagerar långsammare på förändringar i värmeförsel. Detta innebär att ett system med större andel tyngre byggnadskonstruktioner har bättre förutsättningar för att utnyttja laststyrning då de tolererar högre grad av bortstyrning.

$$\tau = \frac{C \cdot m}{U \cdot A + P_l - P_v} \cdot \frac{1}{3600} \quad (2.5.1)$$

τ = Tidskonstant [h]

C = Byggnadens genomsnittliga värmekapacitet [J/kg/°C]

m = Total massa [kg]

U = Byggnadens värmeväxlingskoefficient [W/m²/°C]

A = Total ytterarea [m²]

P_l = Korrigeringsterm för exempelvis ventilationsförluster [W]

P_v = Korrigeringsterm för fortsatt värmeförsel, som gratisvärme från människor och apparater etc. [W]

Tidskonstanten kan här ses som ett förhållande mellan byggnadens lagringsförmåga och dess energiförluster. Nämnade tunga konstruktioner beräknas av Selinder & Zinko (2003) ha en tidskonstant på 300 timmar vid fullständigt bortfall av värmeförsel. Gratisvärme eller lägre grad av värmeförsel kan tillföras i termen P_v . Vid normalbruk, då tillförd effekt är lika stor som förlusterna, blir tidskonstanten oändligt stor och inomhustemperaturen ändras konsekvent inte. Med utgångspunkt i en halverad värmeförsel resulterar istället detta i en dubbelt så lång tidskonstant. Tidskonstanten är därmed omvänt proportionell mot graden av bortstyrning. Wernstedt & Johansson (2009) föreslår 70 % som ett generellt värde på den maximala andelen av det totala värmeeffektbehovet som kan styras. Anledningen till att inte styra bort värmeeffekten till 100 % är att förhindra radiatorer från att bli helt kalla, även under mycket korta perioder. Under deras projekt användes i regel inte större bortstyrning, varför de motiverar detta som en rimlig maxgräns. Kärkkäinen et al. (2003) samt Myrendal & Olgemar (2010) använder i olika studier bortstyrning i betydligt lägre grad; upp till 25 % respektive 30 % av den tillgängliga värmeeffekten.

Tidskonstanten kan även användas för att beskriva förändringen i inomhus-temperatur, givet utomhus-temperatur och inomhusstarttemperatur, enligt ekvation 2.5.2 nedan (Selinder & Zinko 2003).

$$\frac{T_{\text{rum}}(t) - T_{\text{ute}}}{T_{\text{rum},0} - T_{\text{ute}}} = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.5.2)$$

τ = Tidskonstant [h]

$T_{\text{rum}}(t)$ = Inomhustemperatur vid tiden t [°C]

T_{ute} = Utomhustemperatur [°C]

$T_{\text{rum},0}$ = Inomhusstarttemperatur [°C]

Antas tiden t vara lika med tidskonstanten i ekvation 2.5.2 antar differensen mellan inomhus- och utomhustemperatur värdet $e^{-1} = 0,37$, jämfört med den ursprungliga skillnaden. Därmed uttrycker tidskonstanten den tid det tar den ursprungliga temperaturdifferensen att minska med 63%. Vidare kan ekvation 2.5.2, med en bestämd tillåten differens mellan inomhus- och utomhustemperatur, utvecklas för att beskriva hur lång tid en byggnad har kapacitet att upprätthålla styrning vid bortfall av värmeförsel. Detta visas i ekvation 2.5.3 nedan.

$$t = -\tau \cdot \ln \left(1 - \frac{T_{\text{diff}}}{T_{\text{inne}} - T_{\text{ute}}} \right) \quad (2.5.3)$$

t = Tiden i timmar som inomhustemperaturen kan hållas inom accepterad differens vid bortfall av värmeförsel [h]

T_{diff} = För styrningen accepterat temperaturfall [°C]

T_{inne} = Inomhustemperatur [°C]

T_{ute} = Utomhustemperatur [°C]

τ = Genomsnittlig tidskonstant [h]

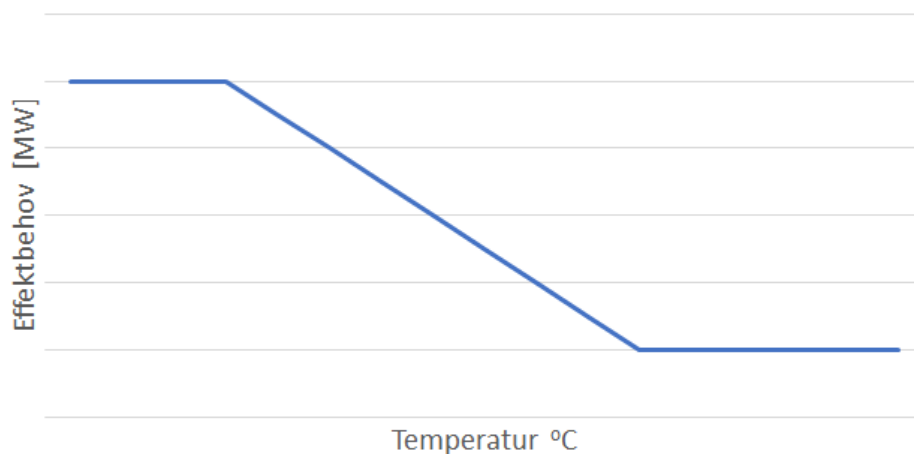
Ett räkneexempel av detta kan se ut på följande sätt. Inomhustemperaturen tillåts falla från 21°C till 20°C vid en utomhustemperatur på 0°C. Lämpliga fastighetsbestånd med en tidskonstant på 300 timmar ger följande tid innan inomhustemperaturen sjunker under tillåten nivå:

$$t = -300 \cdot \ln \left(1 - \frac{1}{21 - 0} \right) = 14,6\text{h} \quad (2.5.4)$$

Vid totalt bortfall av värmeförsel tar det alltså mer än 14 timmar innan inomhustemperaturen sjunker från 21°C till 20°C i lämpliga fastighetsbestånd. Denna beräkning begränsar i sin tur hur lång tid bortstyrningen tillåts att ske. Detta kommer senare i rapporten att benämnas som styrsekvenslängd.

En byggnads värmeförluster genom väggar, tak, fönster samt ventilation är främst beroende av rådande utomhustemperatur. Lägre utomhustemperatur leder till större temperaturskillnad mellan byggnad och omgivning och konsekvent större värmeförluster. Även vind och solinstrålning påverkar värmeeffektbehovet men dess inverkan är relativt liten (Frederiksen & Werner 2013). Sambandet mellan en byggnads värmeeffektbehov och utomhustemperatur kallas effektsignatur, vilket beskrivs grafiskt genom att jämföra effektbehov mot temperatur. Se figur 2.5 nedan för exempel. En brytpunkt definieras som den utomhustemperatur då extern värmeförsel inte längre behövs för att hålla ett behagligt inomhusklimat. Det återstående värmebehovet står användningen av tappvarmvatten för. Vid lägre temperaturer ökar

effektbehovet enligt en linjär trendlinje till den punkt då systemets dimensionerade maxlast nås. Det är denna trendlinje som används för att läsa av effektsignaturens värde.



Figur 2.5: Exempel på sambandet mellan värmeeffektbehov och utomhustemperatur i en byggnads effektsignatur.

Förutom inomhuskomfort är en viktig funktion av fjärrvärmeleveransen att hålla tillräckligt hög temperatur på tappvarmvatten. Om detta inte uppfylls löper de boende en ökad risk för tillväxt av legionellabakterier i tappvarmvattenkretsen. Behovet av tappvarmvatten ses därmed som en last som ej kan avvikas från. Däremot så innebär det en möjlighet att använda laststyrning som en metod för att undvika spetslasten som normalt infinner sig på morgonen då mycket tappvarmvatten används.

2.5.2 Laststyrning i fjärrvärmesystemet

Hur laststyrning fungerar skiljer sig från ett ordinarie energilager på flera sätt. Laststyrning som energilager i ett fjärrvärmesystem är distribuerat på sekundärsidan vilket skiljer sig från ackumulatortankar, som i regel är lokaliserat nära produktionsenheterna. Detta ger olika fördelar för respektive typ av energilager. Ackumulatortanken är konsekvent bättre lämpad att balansera variationer i produktion medan laststyrning lämpas bättre för variationer i last (Kensby et al. 2015). Detta ger laststyrning den ytterligare fördelen att kunna kringgå flaskhalsar i nätet då försörjningen från primärsidan är begränsad, beskrivet i avsnitt 2.3.1. Systemnyttan ligger i att operatören därmed undviker kostnaden för att åtgärda flaskhalsen, samt kan ansluta fler kunder utan att bygga ut denna. Spetsenheter som förser sekundärsidan bortom en flaskhals behöver heller inte användas i lika hög grad.

Från primärsidan är det intressant att veta vilken last som kan förskjutas, mätt i energi (MWh) samt effekt (MW). Detta är i sin tur beroende av fle-

ra faktorer som årstid, tid på dygnet och fastighetsbestånd. Laststyrning är mest aktuellt under vinterhalvåret då de största lasttopparna förväntas och nätet upplever störst belastning. Samtidigt som värmelasten är hög är även möjligheten att styra bort last högre, då det endast är möjligt att minska ett flöde som redan används. En begränsning under vinterhalvåret kan istället vara förmågan att "ladda" eller återföra värme då inomhusklimatet återhämtas efter en lastbortstyrning: Då värmelasten närmar sig den dimensionerade maxeffekten minskar utrymmet att fortsätta öka effekten och konsekvent även förmågan att ladda byggnaden. Detta är dock beroende på rådande dimensionering av fjärrvärmenätet. Fortsättningsvis beskrevs effektsignatur i avsnitt 2.5.1 som ett mått för hur stor värmelast, uttryckt exempelvis i dygnsmedeleffekt, en byggnad har i relation till utetemperaturen. Utifrån ett medelvärde på effektsignaturen över ett systems samtliga byggnader kan potentiellt bortstyrbar effekt räknas ut enligt ekvation 2.5.5.

$$P_{\text{styr}} = A \cdot E\text{-sign} \cdot (T_b - T_{\text{ute}}) \cdot K_{\text{styr}} \quad (2.5.5)$$

P_{styr} = Möjlig effektstyrning [W]

A = Antal byggnader använda som energilagring till laststyrning []

E-sign = Genomsnittligt värde på effektsignaturen för systemets byggnader [W/°C]

T_b = Temperaturen för E-signaturens brytpunkt [°C]

T_{ute} = Utomhustemperatur [°C]

K_{styr} = Den maximala andelen av totalt effektbehov som kan bortstyras []

Denna metod motiveras vidare av Hedbrant (2001) som studerar hur byggnaders värmekapacitet kan modelleras ur ett linjärt och homogent perspektiv. Utifrån en prognos över utomhustemperaturen kan därmed en förenklad prognos tas fram över hur mycket bortstyrbar effekt som finns tillgänglig för varje tidssteg. Återkopplas detta till ekvation 2.5.3 kan den totala energimängden som finns tillgänglig för bortstyrning enkelt räknas ut enligt ekvation 2.5.6.

$$E_{\text{styr}} = P_{\text{styr}} \cdot t \quad (2.5.6)$$

Med ett högre antal anslutna byggnader får operatören därmed större potential till bortstyrning och bättre chans att balansera fjärrvärmeproduktionen. Installationen av tillhörande styrsystem måste dock ses som en kostnad och det är intressant att undersöka vid vilket antal anslutna byggnader som nyttan med laststyrning minskar. Detta kan liknas med hur mycket bortstyrbar effekt respektive energimängd som kan utnyttjas för ett givet system.

Från primärsidan är det praktiskt att arbeta efter ett idealiserat jämviktsläge där inomhustemperaturen antas vara konstant så länge fjärrvärmelasten uppnås. Då utelämnad värme återförs till lika mängd vidhålls energibalans och i slutändan förblir mängden såld värmeenergi oförändrad. Detta gör det enkelt för producenten att utvärdera lönsamheten av laststyrning samtidigt

som kunderna inte heller upplever att de betalar ett annat pris för värmeleveransen. Denna idealiserade bild av inomhustemperaturen skiljer sig dock från praktiken då inomhustemperaturen varierar starkt beroende på bland annat solinstrålning och de inneboendes beteendemönster. Under respektive studier styr Kärkkäinen et al. (2003) och Myrendal & Olgemar (2010) värmeförseln till byggnader utan att påvisa en stark inverkan på inomhustemperaturen. Istället för ett idealiserat jämviktsläge är det i praktiken rimligare att beskriva ett gott inomhusklimat som ett accepterbart intervall, inom vilket temperaturen tillåts variera (Isfält & Bröms 1992). Även Johansson & Wernstedt (2010) diskuterar denna betydelse i en studie om effekten av laststyrning på energikonsumtion. Små förändringar av inomhustemperatur orsakade av laststyrning försvinner sannolikt i det allmänna bruset orsakat av de boende. Med utgångspunkt i att gränsen för ett gott inomhusklimat kan ses som ett intervall, kan det istället antas att den begränsade mängden värmeenergi som bortstyrts inte nödvändigtvis måste återföras. Istället kan det antas att denna energi återställs obemärkt av annan inomhusaktivitet av de boende. Denna tankegång har även framkommit i dialog kring laststyrning med aktörer inblandade i arbetet. Om detta ska tillämpas med lönsamhet i åtanke för värmeproducenten, så borde produktionskostnaden av spetslast vara dyrare än försäljningspriset. Detta är ofta fallet i sammanhang då spetslastenheter används. Kunden betalar i slutändan mindre, då mindre energi har levererats.

Ytterligare en aspekt som förenklar laststyrning är om värme laddas in och ur med konstant effekt. Att styra med konstant effekt kan dock innebära abrupta effektförändringar då laststyrningen startar och slutar. En viktig aspekt att ta hänsyn till är den återvändande lasten som uppstår exempelvis då byggnaden återgår till normal temperatur efter en tids bortstyrning av last. Kärkkäinen et al. (2003) föreslår en linjär återställning av den termiska effekten för att undvika sådana överslängar och följande onödigt slitage på styrutrustning. Nyttan med en periods laststyrning kan snabbt motverkas om den lasten tillåts återvända okontrollerat till för hög grad. För att undvika detta kan laststyrningssekvensen redan i planeringsstadiet inkludera en upprampning av bortstyrning och likaså för den återvändande lasten (Wernstedt & Johansson 2009).

2.6 Sammanfattade regler och begränsningar

För enkelhetens skull är det rimligt att införa maximalt tillåtna sekvenslängder för laststyrning. Bortstyrning samt återföring av värme är då tillåtet inom vissa tidsintervall samtidigt som en viss tid utan laststyrning krävs mellan bortstyrningssekvenser. Därmed kan kunden förvänta sig att inomhustemperaturen är återställd inom en given period efter bortstyrning samt att laststyrning endast får ske ett visst antal gånger per dag. Sekvenslängderna bör inte vara längre än räkneexemplet i ekvation 2.5.4.

För operatören innebär det även en förenkling att laststyrning sker med

konstant effekt. Risken för överslängar kan undvikas genom att istället stegvis låta effekten bortstyras och återvända till ordinarie värmelast. Dessutom bör både energimängden och effekten under bortstyrning begränsas inom givna intervall som motsvarar rimlig förmåga till värmelagring respektive laddnings- och urladdningstakt i byggnaderna. Dessa regler innebär begränsningar för operatören och sämre förmåga att balansera produktionen då laststyrningen inte kan användas med samma frihet.

Fler och strängare regler kring styrningen ger konsekvent sämre besparingspotential vid användning. Det är därför intressant att utreda konsekvensen av att sätta strängare styrregler samt vad som påverkar behovet av dessa. Beslut kring införande av en specifik styrregel kan tas efter vilken kostnad detta förväntas medföra i jämförelse med vilken nytta den medför.

3 Beskrivning av medverkande aktörer

Aktörerna som inkluderas i detta arbete har bedrivit separata studier på laststyrning i respektive fjärrvärmesystem. Kommunikation med dessa har skett på telefon och mail samt vid möten vid flera tillfällen under arbetets gång (Krafringen & Eon Malmö 2019). Nedan följer en kort beskrivning av deras respektive förutsättningar.

3.1 Eon Malmö

Eon har genomfört pilotstudier på laststyrning i Malmö, vilket inkluderar att utveckla ett eget styrsystem mot sekundärsidan. I regionen driver Eon flera kraftvärmeproducerande anläggningar och står även för driften av nätet, varför de har en systemövergripande lösningsbild. Allt eftersom deras studie har skalats upp har Eon kunnat ta fram riktvärden på maximal tillgänglig effekt och värmemängd för in- och urladdning för ett system i större skala. Det finns även intresse av att utreda vilken lönsamhet som kan förväntas av att ytterligare skala upp laststyrningen i framtiden.

Eon Malmö använder värme, från SYSAVs avfallsförbränning på Spillepengen i Malmö, till baslast. Den köpta värmemängden är dessutom avtalad på förhand vilket kan minska systemets flexibilitet i sin helhet. Malmös fjärrvärmenät är överdimensionerat och fjärrvärmelasten når i regel inte upp till maxkapaciteten. Ackumuleringsförmågan är idag relativt låg, med en ackumulator med kapacitet som motsvarar knappt ett timmes last under en kall vinterdag. Det finns därför tydliga incitament till att utveckla laststyrning som metod för att ytterligare balansera ut fjärrvärmelasten utan att investera i en ny ackumulatortank.

3.2 Krafringen

Krafringen arbetar för att utveckla laststyrning i Lunds fjärrvärmenät. Teoretiska studier har hittills endast inkluderat ett fåtal byggnader i ett område i Lund, men kommer eventuellt att skalas upp under kommande vintersäsong. De styrningsbegränsningar som dessa studier har kommit fram till, som tillgänglig bortstyrbar effekt och värmemängd, antas kunna skalas upp proportionellt mot den planerade ökningen av byggnader som används till laststyrning i Lund.

Krafringen driver idag en helt fossilfri produktion av fjärrvärme. Lunds fjärrvärmenät är även sammankopplat med de större fjärrvärmenäten i Helsingborg och Landskrona samt med mindre nät i Dalby, Eslöv och Lomma. Tillsammans ingår de tre berörda energibolagen Öresundskraft, Landskrona Energi och Krafringen i ett nära samarbete i EVITA-projektet. Dess syfte är att de sammankopplade näten kan samverka i respektive produktionsplanering vilket skapar bättre förutsättningar för balanserad produktion då

de optimeras i sin helhet. Laststyrningen är i dagsläget under utredning i Lund men då flera nät är sammankopplade är det intressant att analysera lönsamheten för hela systemet sammankopplat genom EVITA.

4 Metod

I detta avsnitt beskrivs de olika metoder som använts under arbetet samt motivering av dessa med hänsyn till frågeställningarna.

4.1 Litteraturstudie

En inledande litteraturstudie genomfördes för att säkerställa att författaren hade tillräcklig kunskap inom fjärrvärme och laststyrning samt för att vara uppdaterad på området. Litteraturstudien syftade även till att förstå vilka parametrar som är relevanta vid införande av laststyrning samt rimliga storheter på dessa. Huvudsakligen användes sökmotorn Google Scholar med sökorden listade nedan:

- Laststyrning
- Effektreglering
- Värmelagring i byggnader
- Fjärrvärme
- District heating
- Demand side management

4.2 Möten med lokala aktörer inom laststyrning

Eon Malmö och Krafringen är båda lokala aktörer inom fjärrvärmeproduktion och drift av fjärrvärmenät. De driver även separata studier på laststyrning i Malmö respektive Lund. Eon Malmö och Krafringen inkluderades därför tidigt under arbetet då de kunde bidra med expertiskunskap och insyn i respektive arbete med laststyrning. De kunde bidra med konkreta förslag på styrregler samt lämpliga parametrar som användes under modelleringen. Till arbetet var det även intressant att applicera laststyrning på modeller av riktiga fjärrvärmesystem. Resultaten bedöms därmed bli mer verklighetsförankrade än om laststyrning endast testats på mindre komplexa testmodeller. Jämförelse av dessa utfall kan även påvisa eventuella effekter beroende på systemförutsättningar. Kommunikation med dessa aktörer skedde genom möten, mail och telefonsamtal vid flera olika tillfällen

4.3 Modellering och simuleringar i Energy Optima 3

Optimeringsprogrammet Energy Optima 3 användes under arbetet för att simulera laststyrning med framtagen indata. Denna del i arbetet krävde kunskap om hur programmet fungerar samt hur olika styrregler anges genom specialprogrammering. Insyn behövdes även i systemmodellerna av Eon Malmö respektive Krafringens fjärrvärmenät där laststyrningsmodellen implementerades. Modellering i Energy Optima 3 beskrivs mer ingående i nästa avsnitt.

Genom att jämföra utdata från ordinarie simulerade driftfall med driftfall då laststyrningsmodellen är implementerad kan laststyrningens funktion och

nytta analyseras. Utfall från simuleringar med olika indata jämfördes för att analysera inverkan av de olika parametrarna och styrreglerna. Även utfallen från de två systemmodellerna jämfördes för att analysera olika systemförutsättningar.

5 Modellering

Simuleringar under arbetets gång sker i Energy Optima 3 med relevant indata från berörda aktörer. Systemmodellen implementeras i ett allmänt modelleringsspråk med syfte att minimera systemkostnaderna som här avser värmeproduktion. Modellen inkluderar även elproduktion som räknas som en negativ kostnad för systemet då elen säljs till elnätet för rådande spotpris. Optimeringar har under detta arbete gjorts under tidshorisonter på 3 dagar med en upplösning på 1 timme per tidssteg. Tidshorisonten ger tillräcklig tid för laststyrningen att användas och utnyttjas samtidigt som upplösningen ger en exakt driftsplanering för systemets enheter. En konsekvens av att använda längre tidshorisont eller högre upplösning är att optimeringstiden ökar, ibland markant om det modellerade systemet är särskilt komplext. Större fjärrvärmesystem ger i regel större komplexitet då fler enheters drift ska optimeras.

Simuleringarna utgår från en modell över respektive kunds system med tillhörande produktionsenheter och fjärrvärmenät. Modellen byggs i regel upp av Energy Opticon tillsammans med kund för att på bästa sätt representera verkliga förhållanden och producera rimliga resultat. EO3 beräknar en optimal drift av systemets enheter för att minimera produktionskostnaderna samtidigt som värmelasten måste uppfyllas. Se figur 5.1 för en översiktlig bild av modelleringsmetoden. Följande värden används av programmet:

Variabler

De optimerade variablerna utgör modellens beräknade produktionsplan utifrån givna indata. Dessa variabler motsvarar hur systemets enheter bör köras för att minimera produktionskostnaderna.

Parametrar

Samtliga enheter i modellen har förutbestämda värden på tekniska specifikationer som lastintervall, flödeskapacitet och verkningsgrader.

Vissa kostnader anges som parametrar, såsom fasta start-, stopp- och laständringskostnader samt rörliga underhållskostnader för enheter.

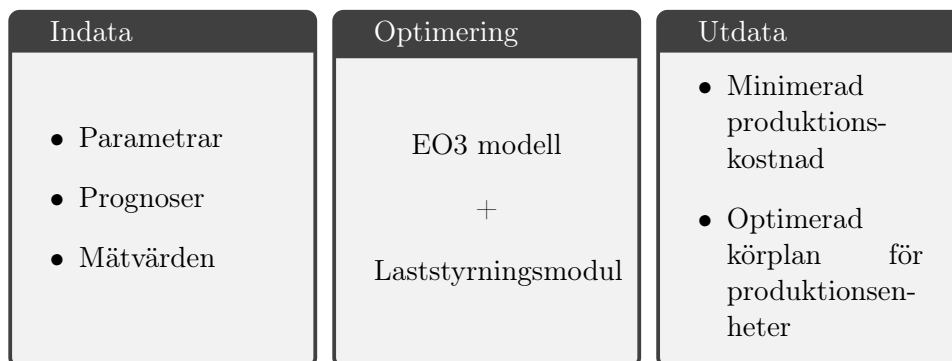
Prognoser

Fjärrvärmeprognoser baseras på aktuell väderprognos med viss modifiering med hänsyn till förbrukningsmönster. Detta anpassas efter historiska mätvärden.

Bränslepriser och elpris importeras som prognoser. Särskilt spotpris för el kan variera kraftigt inom en kort period.

Mätvärden

Mätvärden för enheters driftstatus samlas in kontinuerligt. Uppmätta värden jämförs även löpande med indata för att kalibrera prognoserna. Då historiska utfall finns tillgängliga används dessa före prognoser för optimeringar av historiska perioder.



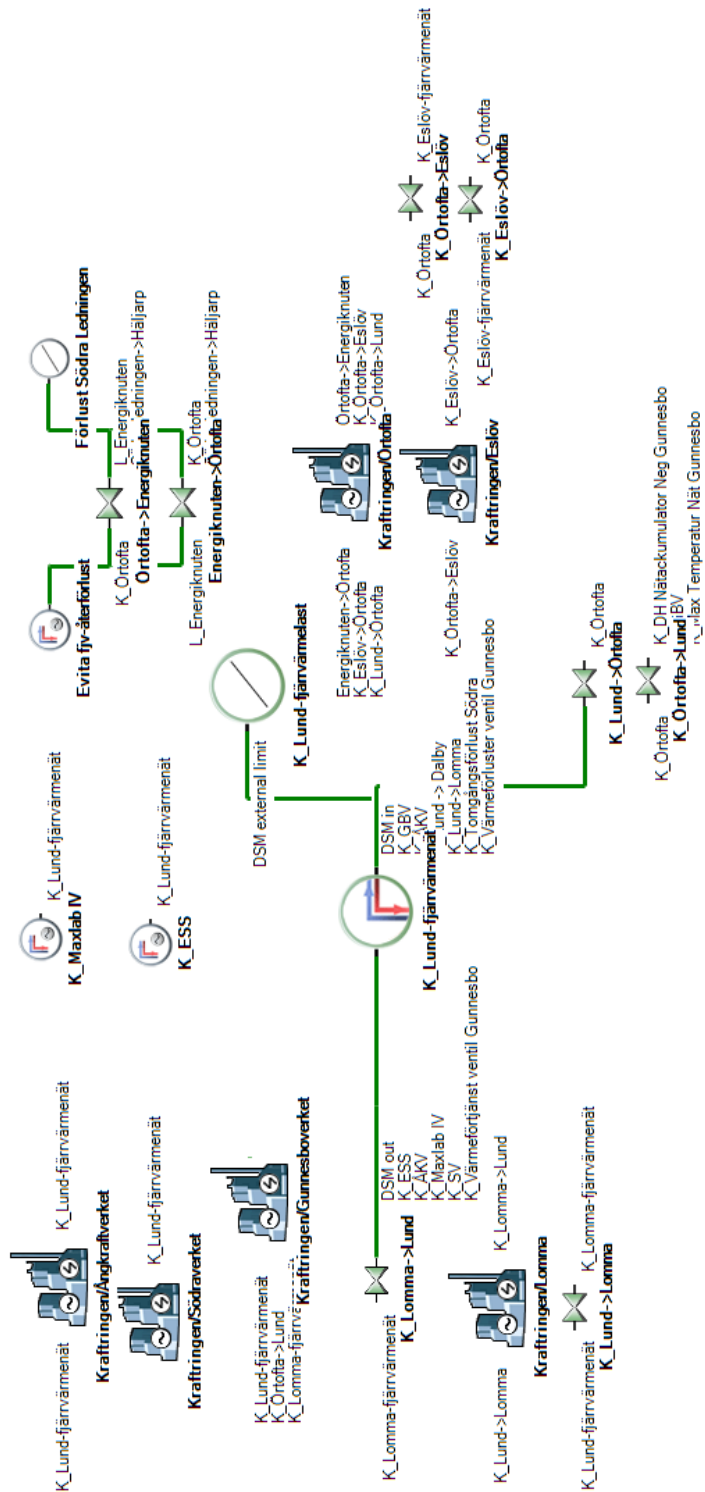
Figur 5.1: Översiktlig bild av arbetets modelleringsmetod. Olika laststyrningsmoduler tillämpas varefter utdatan från de olika fallen jämförs.

För att testa de mer specifika omständigheterna kring laststyrning så kommer detta att programmeras i särskilda systemfiler. Detta är en iterativ process där utvecklingen sker i en mindre komplex testmiljö, varefter den färdiga programmeringskoden tillämpas på en färdig modell över ett verkligt fjärrvärmesystem. Vid simulering i modeller av verkliga system kan implementeringens effekter utvärderas mot en verklig bakgrund. Se nedan i figur 5.2 för en överblickande modell över Krafttringens fjärrvärmesystem. Kraftverksikornerna representerar större anläggningar som här inte beskrivs i större detalj, för att ge en enklare bild av systemet

Totalt simulerades 1128 tidssteg i 16 intervaller utspridda mellan oktober 2018 och april 2019. Denna period valdes för att representera ett helt vinterhalvår, då lasten generellt är hög och temperaturen kan variera kraftigt även under höst och vår. Alla intervaller utom ett har upplösningen 1h per tidssteg samt tidshorisont på 72h. Det kvarstående intervallet fick minskad horisont till 48h på grund av att optimeringstiden för denna period annars blev för lång. Den sammanlagda längden är 47 dagar, nästan 7 veckor. Se tabell 5.1 nedan för specificering av perioderna.

Tabell 5.1: 16 tidsintervaller som simulerades under arbetet. Samtliga intervaller börjar vid midnatt på startdagen.

2018			
1/10 - 3/10	15/10 - 17/10	4/11 - 6/11	18/11 - 20/11
25/11 - 27/11	2/12 - 4/12	9/12 - 10/12	16/12 - 18/12
2019			
1/1 - 3/1	8/1 - 10/1	1/2 - 3/2	15/2 - 17/2
8/3 - 10/3	15/3 - 17/3	1/4 - 3/4	8/4 - 10/4



Figur 5.2: Överblickande bild av Kraftingens fjärrvärmesystem i Lund. Detta är en del av det sammankopplade EVITA-systemet.

5.1 Modellerade enheter

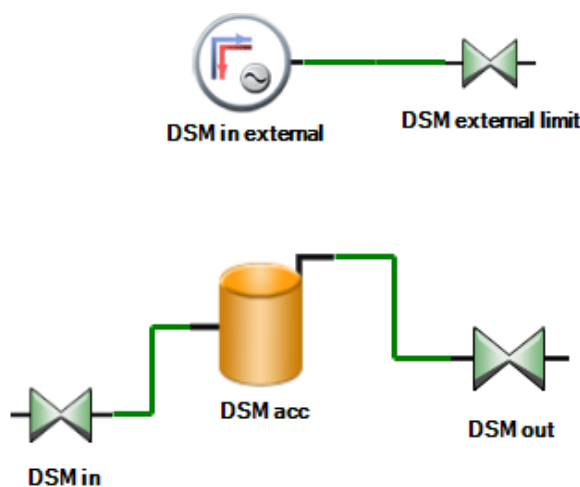
Två övergripande metoder används under arbetet för att modellera laststyrning i EO3. Dessa utgår från teorierna kring huruvida bortstyrd värme måste återföras eller ej som beskrevs i avsnitt 2.5.2. Metoderna beskrivs översiktligt nedan samt illustreras enligt EO3-modellen i figur 5.3.

Akkumulatortank Vid uppsättning av laststyrning i EO3 modelleras initialt en virtuell ackumulatortank med begränsad lagrings- och effektkapacitet. Dessa parametrar motsvarar aktuella byggnaders värmelagringsförmåga respektive hur snabbt värmeenergin kan matas in och ur. Byggnadernas energibalans med ordinarie fjärrvärmelast motsvaras av att tanken är fylld till hälften. Laddning av värme i byggnaderna representeras av att värmeinnehållet i ackumulatortanken ökar och urladdning representeras vice versa av att värmeinnehållet sjunker. Detta ger nätet möjlighet att både ladda och urladda energi ur byggnaderna och denna avvikelse från ordinarie last ses i förändringen i tankens nivå.

Akkumulatortanken innebär en idealiserad bild av inomhustemperaturen där energi som laddas in eller ur måste återföras till samma mängd, som beskrivet i avsnitt 2.5.2. Vid både början och slutet av optimeringsperioden måste tanken vara fylld till hälften vilket innebär att all bortstyrd last återförs och produktionskostnaden för återförd värmeenergi inkluderas i den totala kostnaden. Vidare specialprogrammeras särskilda regler för hur denna enhet får användas utifrån kundernas komfort samt styrningsbegränsningar.

Extern källa Vidare används nästa metod för att modellera laststyrning i ett icke idealiserat fall. I denna modell antas det att bortförd värme ej behöver återföras utan försvinner i bruset orsakat av brukarnas beteende. Detta modelleras som en extern värmekälla som kopplas direkt till fjärrvärmelasten och får på liknande sätt som för ackumulatortanken en uppsättning med regler som begränsar dess användning.

Bortstyrd värme tilldelas en prissättning, med syfte att motsvara den kostnad som uppkommer i samband med förlust av såld energi till kunden. EO3 strävar hela tiden efter att minska produktionskostnaden och detta hade enkelt uppnåtts genom att låta den externa källan förse systemet med så mycket värme som reglerna tillåter den. Med rätt prissättning motverkas detta och laststyrning används endast när produktionskostnaden överstiger inköpspriset för den externa källan. Laststyrning används därmed endast när det finns en tillräckligt stor systemnytta.



Figur 5.3: Enheterna som används för laststyrningsmodellering i EO3s topologieditor. Akkumulatortank (DSM acc) med kopplade ventiler syns nedan i bild och extern källa (DSM in external) syns ovan i bild. Ventilerna (DSM external limit, DSM in och DSM out) är kopplade till fjärrvärmenätet och utgör flödesbegränsningar.

5.2 Styrregler

Laststyrningens funktion bestäms vidare med hjälp av två olika uppsättningar av styrregler. Dessa beskrivs ingående nedan.

5.2.1 Konstant effekt under bortstyrning

Detta syftar till att ge en förenklad bild av laststyrningen och dess potential.

1. Laddning och urladdning av akkumulatortanken sker med **konstant effekt** för att förenkla styrningen. Detta minskar variationen i styrningen och innebär att tanken kan laddas eller laddas ur med konstant effekt, till en nivå som sedan kan hållas konstant, innan återföring sker med konstant effekt. Endast när nivån är tillbaka till den ursprungliga kan en ny bortstyrning påbörjas. Maximal effekt och energimängd för en bortstyrningssekvens är oberoende av last för att undvika långa optimeringstider.
2. **Sekvenslängder** införs som innebär att laststyrning får pågå under högst 8h varefter tankens nivå måste vara i balans i minst 8h innan en ny bortstyrningssekvens kan påbörjas. I praktiken motsvarar det att en byggnad återställs till normal temperatur i minst 8 timmar innan bortstyrning kan börja på nytt. Programmet kan välja fritt när laststyrningen ska börja, så länge minst en hel period med balans återfinns mellan bortstyrningssekvenser.

Ovanstående uppsättning av styrregler baseras på diskussioner med Eon Malmö, kring deras arbete laststyrning.

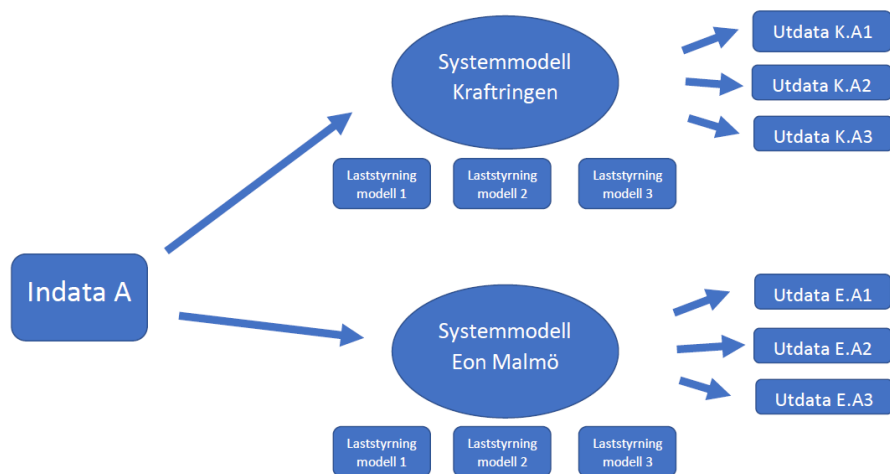
5.2.2 Upprampning av effekt under bortstyrning

De ovan nämnda styrreglerna får mindre strikta begränsningar för att undvika ”översläng” vid återvändande fjärrvärmelast, som beskrivs i avsnitt 2.5.2. Översläng undviks genom att effektprofilen under bortstyrning jämnas ut.

1. **Ej konstant effekt.** Laddning- och urladdningseffekten tillåts variera under laststyrningen. Maximal variation i effekt mellan två tidssteg är en fjärdedel av den maximala tillgängliga effekten. På samma sätt som med konstant effekt så tillåts bara tanken att växla mellan laddning och urladdning, eller vice versa, en gång under en bortstyrningssekvens innan tankens har återgått till balans.
2. **Ändrade sekvenslängder.** Sekvenslängden för laststyrning förlängs till 12h samtidigt som sekvenslängden för balans förkortas till 6h. Detta för att ge laststyrningen tid att nå maximal bortstyrbar effekt.

5.3 Simuleringar

I avsnitt 5.1 bestämdes att två enheter används för att implementera laststyrning i EO3-modellen. Dessa enheter tilldelas även olika styrregler, som beskrevs ovan i avsnitt 5.2. I detta avsnitt beskrivs mer ingående de simuleringar, med respektive indata, som utfördes för att modellera laststyrning. Totalt används tre olika modelleringsmetoder. Den specifika indatan som presenteras motsvarar den mängd laststyrning som Kraftringen respektive Eon Malmö är intresserade av att testa inom en överskådlig framtid för respektive fjärrvärmesystem. Se figur 5.4 nedan för en överblickande bild av hur modelleringsmetoderna använts under simuleringarna.



Figur 5.4: Överblickande illustration av hur de olika simuleringarna hanterades. Indata A representerar här ett set av bestämda parametrar, varefter flera av dessa implementerades på samma sätt för att producera fler utfall.

●Referens

Laststyrning måste kunna jämföras mot ett referensscenario där det aktuella fjärrvärmesystemet representeras utan några ändringar. Optimal drift beräknas här efter rådande förhållanden och står som en ekonomisk referenspunkt.

5.3.1 Laststyrning modelleras som en ackumulatortank

●Laststyrning utan styrregler

Modelleringen med laststyrning representerat av en ackumulatortank tilldelas initialt inga styrregler för att skapa ytterligare en referens. Denna agerar som vanlig värmelagring och kan laddas in och ur fritt. Detta ger i sin tur en möjlighet att utvärdera vilken inverkan respektive styrregel har på lönsamheten då friheten konsekvent minskar med fler regler.

●Konstant effekt

Se tabell 5.2 nedan för specifika indata för styrreglerna med konstant effekt i respektive modellerat fjärrvärmesystem.

Tabell 5.2: Indata för modelleringsmetoden med ackumulatortank och konstant effekt.

	Krafringen	Eon Malmö
Maximal bortstyrningseffekt	32 MW	40 MW
Maximal bortstyrbar energimängd per styrsekvens	106 MWh	120 MWh
Maximal längd bortstyrningssekvens	8h	8h
Minsta längd balanssekvens	8h	8h

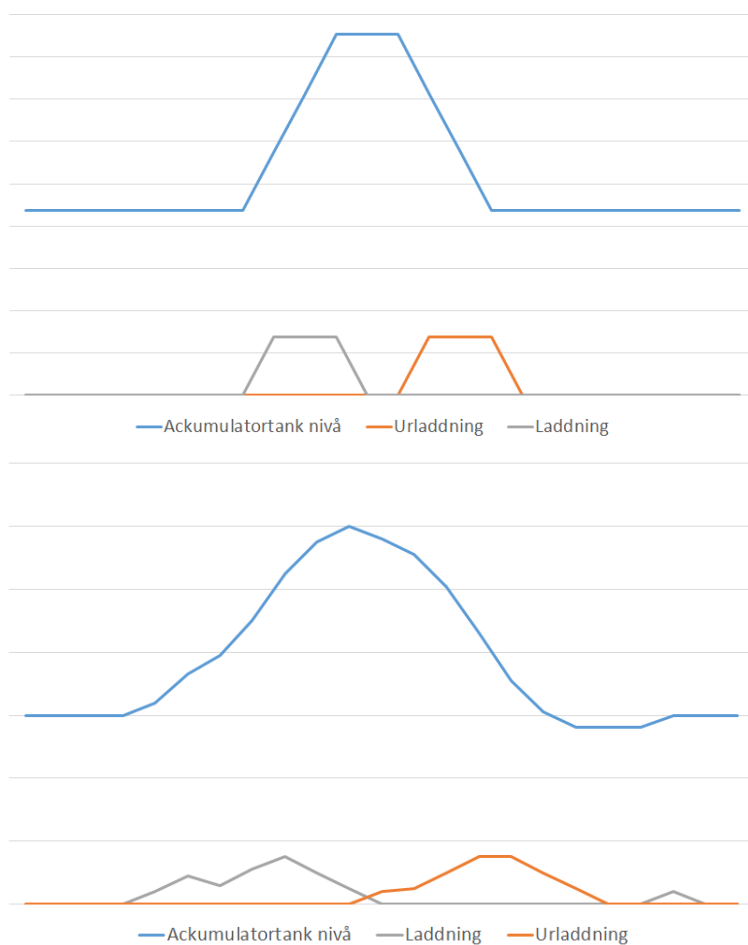
•Upprampning av effekt

Se tabell 5.3 nedan för specifika indata för styrreglerna med upprampning i respektive modellerat fjärrvärmesystem.

Tabell 5.3: Indata för modelleringsmetoden med ackumulatortank med upprampning.

	Krafringen	Eon Malmö
Maximal bortstyrningseffekt	32 MW	40 MW
Maximal bortstyrbar energimängd per styrsekvens	106 MWh	120 MWh
Maximal ändring av bortstyrningseffekt mellan två tidssteg	8 MW	10 MW
Maximal längd bortstyrningssekvens	12h	12h
Minsta längd balanssekvens	6h	6h

Exempel på laststyrning modellerat med en ackumulatortank med konstant effekt respektive upprampning jämförs i figur 5.5 nedan. I den översta bilden ses hur laddning och urladdning tvingas att ske med konstant effekt medan laststyrningen sker med upprampning i exemplet i den nedre bilden. I detta exempel sker först en inladdning av värmeenergi, följt av en urladdning. I båda fallen måste nivån i ackumulatortanken återgå till balansnivå inom en viss tid. Modelleringsmetoden med upprampning tillåter en längre bortstyrningssekvens innan nivån måste återgå till balans.



Figur 5.5: Jämförelse av laststyrning med konstant effekt i den övre bilden respektive upprampning i den nedre bilden. Den blå linjen (Ackumulatortankens nivå) motsvarar mängden värme som först lagras i byggnaderna, med utgångspunkt i ackumulatortankens mittnivå, och sedan laddas ur. Laddning och urladdning innebär att systemet frångår fjärrvärmelasten genom att befinna sig över respektive under den ordinarie lasten.

●Justerad skalning

Potentiell tillgänglig effekt samt energimängd per bortstyrningssekvens multipliceras med faktorerna 0.5, 0.8, 1.2, 1.5, 2 och 5 för att motsvara olika mängd laststyrningskapacitet i respektive system och modelleringsmetod. Dessa faktorer anges senare som skalningsfaktorer.

5.3.2 Laststyrning modelleras som försörjning från en extern källa

Extern tillförsel av värmeenergi modelleras enligt samma regler som inladdning sker i metoden med ackumulatortank och konstant effekt beskrivet ovan i detta avsnitt. Upprampning testas inte på denna enhet för att minska mängd-

den data och spara tid under arbetet. Se tabell 5.4 nedan för specifika indata för denna modelleringsmetod.

Prissättningen påverkar hur benägen modellen är att utnyttja den externa källan. Här eftersträvas ett pris som kan jämföras med produktionskostnaden per MWh värme för andra värmekällor i fjärrvärmesystemet. Prissättningen är densamma för båda fjärrvärmesystemen men presenteras här inte med en absolut siffra på grund av sekretess för aktörerna.

Tabell 5.4: Indata för modelleringsmetoden med extern källa.

	Krafringen	Eon Malmö
Maximal bortstyrningseffekt	32 MW	40 MW
Maximal bortstyrbar energimängd per styrsekvens	106 MWh	120 MWh
Maximal längd bortstyrningssekvens	8h	8h
Minsta längd balanssekvens	8h	8h

●Justerad prissättning

Olika prissättningar används för att studera dess inverkan på optimeringen. Övriga testade prissättningar motsvaras av faktorerna 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 och 2 multiplicerat med den första testade prissättningen.

●Justerad skalning

Likt alternativet för ackumulatortanken skalas potentiell tillgänglig energimängd och effekt per bortstyrningssekvens med faktorerna 0.5, 0.8, 1.2, 1.5, 2 och 5.

5.4 Optimeringstid

Inverkan av de olika styrreglerna på optimeringstiden prövades i en mindre komplex testmiljö i EO3. De resulterande optimeringstiderna jämförs mot ett fall då ingen laststyrning modellerats för att se vilken komplexitet de olika styrreglerna medför. Flera olika tidsperioder användes för att ge ett mer tillförlitligt resultat och ett medelvärde av dessa beräknades.

5.5 Datahantering

Utdatan exporteras i serier för var enskild optimering från EO3 till Excel, där det bearbetas och kontrolleras. Exporten består av produktionskostnad

samt mängd bortstyrd värmenergi för varje enskilt tidssteg, sammanlagt 2266 datapunkter per optimering. I Excel skapas även tabeller och figurer som presenteras i denna rapport.

6 Resultat

I detta avsnitt presenteras utfallen från de olika simuleringarna. Laststyrning har implementerats enligt olika modelleringsmetoder som tidigare beskrevs under avsnitt 5 samt implementerats i två olika systemmodeller. Avsnittet är uppdelat efter olika övergripande typer av resultat. Utdata har även samlats och förenklats i tabeller och figurer för att underlätta jämförelsen mellan de olika utfallen.

6.1 Utnyttjande av laststyrning

I tabellerna 6.1 och 6.2 nedan presenteras hur mycket laststyrning som utnyttjas i de optimerade produktionsplanerna för EVITA och Eon Malmös fjärrvärmesystem, samt för olika skalningsfaktorer av tillgänglig effekt och energimängd. Med utnyttjad laststyrning menas den värmemängd som laddas ut ur den modellerade ackumulatortanken eller externa källan. I tabell 6.1 presenteras under hur många tidssteg laststyrning utnyttjas under optimeringshorisonten. Tabell 6.2 presenterar hur mycket värmeenergi som styrt under motsvarande tid för respektive optimering. Även distributionen av tidssteg med utnyttjad laststyrning presenteras i varaktighetsdiagram för respektive stads fjärrvärmelast i figurerna 6.1 och 6.2.

Det är ingen synbar koppling mellan antal tidssteg med bortstyrning och skalningsfaktorn i tabell 6.1. Däremot visar modelleringsmetoden med ackumulatortank att laststyrning överlag utnyttjas under fler tidssteg då upprampning används. Modelleringsmetoden med extern källa påvisar jämförelsevis få tidssteg med laststyrning. Kolumnen Totalt anger hur många tidssteg då laststyrning användes med någon av de olika modelleringsmetoderna, för respektive skalningsfaktor.

Modellering med ackumulatortank visar på större användning i Eon Malmös fjärrvärmesystem jämfört med EVITA. Detta gäller både för konstant effekt och upprampning. Motsatsen gäller för extern källa. Totalt användes laststyrning under ungefär dubbelt så många tidssteg i Eon Malmös system jämfört med EVITA.

Tabell 6.1: Antal tidssteg med bortstyrd värmeenergi för olika scenarion och skalningsfaktorer. Totalt simulerades 1128 tidssteg i 16 intervaller utspridda mellan oktober 2018 och april 2019.

Skalningsfaktor	Simuleringsmetod			Totalt
	Ack.tank konstant effekt	Ack.tank upprampning	Extern källa	
EVITA antal tidssteg med bortstyrning				
0.5	129	167	21	253
0.8	117	152	22	224
1.0	105	163	26	221
1.2	91	148	29	206
1.5	105	118	26	206
2.0	99	160	32	234
5.0	104	168	29	241
Eon Malmö antal tidssteg med bortstyrning				
0.5	257	384	4	515
0.8	225	345	4	465
1.0	246	362	4	469
1.2	242	389	4	500
1.5	234	345	4	448
2.0	239	354	4	465
5.0	253	374	4	499

I tabell 6.2 ses en starkare koppling mellan skalningsfaktor och mängden bortstyrd värmeenergi för respektive modelleringsmetod. Den totala fjärrvärmelasten under simulerade perioder är 132 187 MWh för Lund respektive 410 578 MWh för Eon Malmö. Storleksskillnaden dem emellan är cirka en faktor 3. Kolumnen Totalt anger den summerade bortstyrda värmemängden av de tre modelleringsmetoderna för varje skalningsfaktor.

Modelleringsmetoden med extern källa har igen ett relativt lågt utnyttjande av laststyrning, särskilt i Eon Malmös system där mängden dessutom är konstant för alla skalningsfaktorer.

Då konstant effekt appliceras på modelleringsmetoden med ackumulatortank i EVITA visas en ökning av bortstyrd värmeenergi upp till skalningsfaktor 1.2, varefter ökningen avstannar. Motsvarande värden för Eon Malmö fortsätter att öka upp till skalningsfaktor 2 och avstannar därefter. Däremot ger upprampning en fortsatt ökning upp till och med den högsta skalningsfaktorn i båda systemen. Detta gäller även för extern källa i EVITA.

Störst mängd bortstyrd energi med låg skalningsfaktor fås med ackumulatortank och konstant effekt. Med högre skalningsfaktor ger istället upprampning den större mängden. Totalt är mängden bortstyrd värmeenergi större för Eon Malmö oavsett skalningsfaktor, vilket stämmer överens med dess högre antal tidssteg med utnyttjad laststyrning i tabell 6.1 samt den högre fjärrvärme-

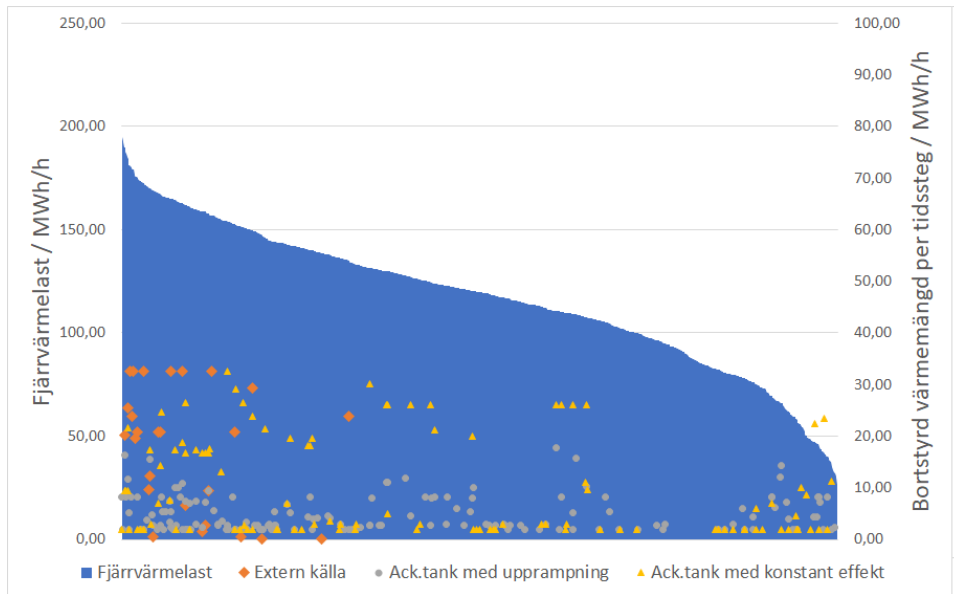
lasten i Malmö.

Tabell 6.2: Summan av bortstyrd värmeenergi i enheten MWh för olika scenarion och skalningsfaktorer.

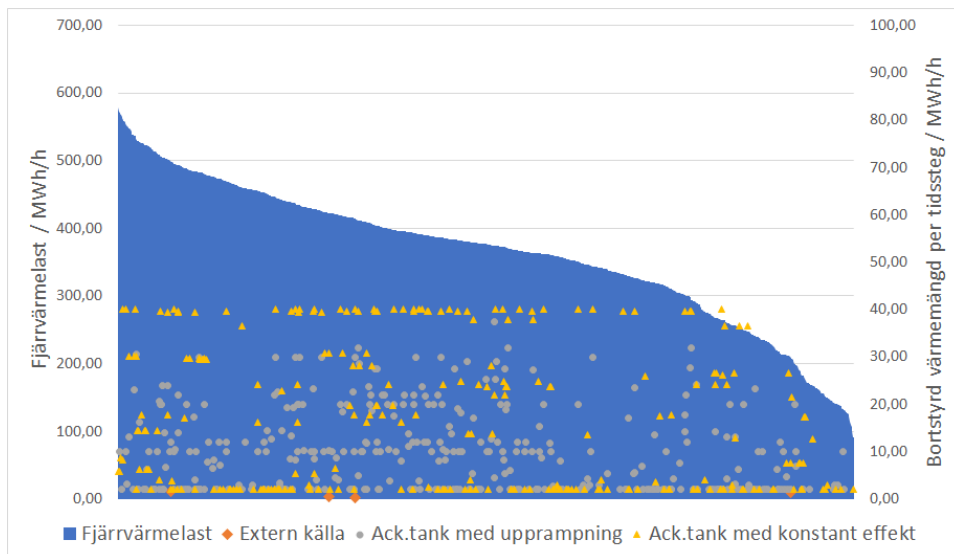
Skalningsfaktor	Simuleringsmetod			Totalt
	Ack.tank konstant effekt	Ack.tank upprampning	Extern källa	
EVITA bortstyrd värmeenergi [MWh]				
0.5	737	626	233	1 586
0.8	896	770	387	2 054
1.0	1 034	767	464	2 266
1.2	1 084	995	475	2 554
1.5	1 009	881	524	2 414
2.0	1 036	1 390	565	2 992
5.0	1 162	1 917	690	3 770
Eon Malmö bortstyrd värmeenergi [MWh]				
0.5	2 501	2 143	3,76	4 648
0.8	3 239	2 682	3,76	5 925
1.0	4 251	3 489	3,76	7 744
1.2	4 420	4 269	3,76	8 692
1.5	5 381	4 139	3,76	9 523
2.0	6 127	5 358	3,76	11 489
5.0	6 131	9 260	3,76	15 395

I figurerna 6.1 och 6.2 nedan visas distributionen av laststyrning i ett varaktighetsdiagram för fjärrvärmelast i EVITAs respektive Eon Malmös system då skalningsfaktor 1 tillämpas. Det går tydligt att urskilja maxgränsen för effekt under bortstyrning i figur 6.2 då främst modelleringsmetoden med konstant effekt påverkas av begränsningen. Den undre begränsningen på 2 MW syns tydligt för båda modelleringar med ackumulatortank.

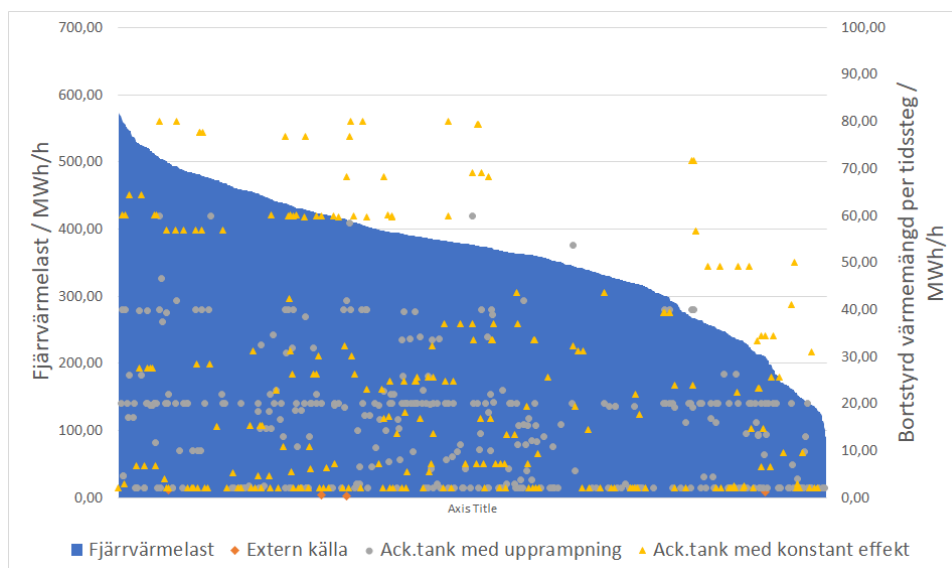
Som tidigare presenterats i tabellerna 6.1 och 6.2 syns det även i figur 6.2 att extern källa används mycket lite i Eon Malmös system. Den har även en utspridd fördelning i diagrammet. I figur 6.1 ses dock att motsvarande i EVITA är förskjutet till vänster i bild, till tidssteg med högre fjärrvärmelast. I samma bild tycks endast extern källa påverkas av effektbegränsningen. Vidare syns ingen tydlig koppling mellan fjärrvärmelast och laststyrning för övriga två modelleringsmetoder i de två systemen. Samma distributionsmönster syns även för övriga skalningsfaktorer. Först vid skalningsfaktor 2,0 kan inte längre maxgränsen för bortstyrningseffekt visuellt urskiljas för Eon Malmö, se figur 6.3.



Figur 6.1: Distributionen av laststyrning med skalningsfaktor 1 i ett varaktighetsdiagram för fjärrvärmelast i Lund. En punkt i diagrammet motsvarar ett tidssteg med laststyrning med motsvarande mängd enligt skalan till höger.



Figur 6.2: Distributionen av laststyrning med skalningsfaktor 1 i ett varaktighetsdiagram för fjärrvärmelast i Malmö. En punkt i diagrammet motsvarar ett tidssteg med laststyrning med motsvarande mängd enligt skalan till höger.



Figur 6.3: Distributionen av laststyrning med skalningsfaktor 2 i ett varaktighetsdiagram för fjärrvärmelast i Malmö. En punkt i diagrammet motsvarar ett tidssteg med laststyrning med motsvarande mängd enligt skalan till höger.

Se även tabell 6.3 nedan för antal tidssteg då bortstyrning når maximalt tillåten effekt för respektive skalningsfaktor och fjärrvärmesystem. Det generellt högre antalet för Eon Malmö innebär att laststyrning i detta system upplever större begränsningar. Detta beror troligen på den, relativt till EVITA, mindre tillgängliga effekten under bortstyrning i förhållande till lasten. Som det visas i figurerna 6.1, 6.2 och 6.3 ovan är det framförallt modelleringsmetoden med extern källa som begränsas i EVITA samt ackumulatortank med konstant effekt som begränsas för Eon Malmö.

Tabell 6.3: Antal tidssteg då bortstyrning når maximalt tillåten effekt för olika skalningsfaktor i respektive fjärrvärmesystem. Totalt simulerades 1128 tidssteg.

Skalningsfaktor	Antal tidssteg med max effekt	
	EVITA	Eon Malmö
0,5	8	36
0,8	8	18
1,0	7	24
1,2	2	10
1,5	3	14
2,0	1	5
5,0	0	0

6.2 Kostnadsbesparing

Samtliga utfall i tabell 6.4 nedan visar på besparingspotential med laststyrning. Det syns ingen entydig proportionalitet med skalningsfaktorn för

någon modelleringsmetod i EVITA, trots den tydligare kopplingen till den bortstyrda värmemängden som presenterades i figur 6.2. Modellering med ackumulatortank och upprampning visar på högst kostnadsbesparing vid högre skalningsfaktorer, medan övriga två modelleringsmetoder visar relativt oförändrade resultat. Överlag är resultaten varierande och det är svårt att urskilja en tydlig trend.

För Eon Malmö leder laststyrning med extern källa aldrig till besparingar i samma storleksordning som övriga två modelleringsmetoder. Denna visar inte heller samma variation i kostnadsbesparing som övriga modelleringsmetoder. Som i fallet med EVITA syns ingen entydig proportionalitet mellan kostnadsbesparing och skalningsfaktor. Dock är sambandet med skalningsfaktorn klart tydligare i Eon Malmös system än i EVITA då laststyrning modelleras som ackumulatortank. Modelleringsmetoden med upprampning visar på liknande sätt ökande besparing med skalningsfaktor 1,5 och högre, medan de övriga två stagnerar eller minskar därefter.

Tabell 6.4: Besparing av total produktionskostnad för respektive simulering jämfört med total kostnad utan laststyrning för EVITA och Eon Malmö.

Skalningsfaktor	Modelleringsmetod		
	Ack.tank konstant effekt	Ack.tank upprampning	Extern källa
EVITA kostnadsbesparingar			
0.5	-0,05%	-0,13%	-0,09%
0.8	-0,10%	-0,10%	-0,07%
1.0	-0,11%	-0,07%	-0,09%
1.2	-0,09%	-0,11%	-0,11%
1.5	-0,12%	-0,08%	-0,12%
2.0	-0,13%	-0,18%	-0,12%
5.0	-0,12%	-0,20%	-0,13%
Eon Malmö kostnadsbesparingar			
0.5	-0,11%	-0,13%	-0,01%
0.8	-0,20%	-0,16%	-0,01%
1.0	-0,24%	-0,24%	-0,01%
1.2	-0,25%	-0,26%	-0,01%
1.5	-0,28%	-0,28%	-0,01%
2.0	-0,26%	-0,31%	-0,01%
5.0	-0,25%	-0,35%	-0,01%

Sammanfattat syns en tydlig koppling mellan skalningsfaktor och totalt bortstyrd mängd värmeenergi. Antal tidssteg med laststyrning visar ingen proportionalitet till skalningsfaktor, utan visar istället bara en variation beroende av modelleringsmetod och vilket fjärrvärmesystem som används. Effektbegränsningen under laststyrning nås oftare för Eon Malmö än i EVITA för samtliga skalningsfaktorer. Kostnadsbesparing visar ingen entydig koppling

till skalningsfaktorn. För båda de modellerade fjärrvärmesystemen fortsätter däremot besparing att öka vid hög skalningsfaktor då modelleringsmetoden med upprampning används.

6.3 Påverkan av prissättning på värmeenergi från extern värmekälla

Prissättningen på såld fjärrvärme har tydligt olika inverkan på de två systemen. EVITA-systemet visar på en större kostnadsbesparing samt större användning av den externa källan till laststyrning då priset minskar, medan motsvarande för Eon Malmö är relativt oförändrad.

Då priset ökar innebär det för EVITA att utnyttjandet av extern källa blir noll. Produktionskostnaden är då i alla tidssteg lägre än prissättningen på den externa källan. Eon Malmös system visar dock att det vid få tillfällen under de optimerade tidsperioderna kan vara lönsamt att styra bort värmelast med en försäljningsförlust av upp till högsta prissättningen på den externa källan.

Tabell 6.5: Besparing, antal tidssteg och summan av bortstyrd värmeenergi för scenarier då olika prissättningar använts på levererad värmeenergi då laststyrning modellerats som extern källa.

Prissättning extern källa	Besparing	Antal tidssteg med laststyrning	Summa av bortstyrd värmeenergi [MWh]
EVITA			
0.5	-2,36%	269	6 730
0.8	-0,49%	164	3 697
1.0	-0,09%	26	464
1.2	-0	0	0
1.5	-0	0	0
2.0	-0	0	0
Eon Malmö			
0.5	-0,01%	6	13,5
0.8	-0,01%	6	13,5
1.0	-0,01%	4	3,76
1.2	-0,01%	4	3,76
1.5	-0,01%	4	3,76
2.0	-0,01%	4	3,76

6.4 Påverkan av olika styrregler

Olika styrregler har exkluderats från modelleringsmetoden med ackumulatortank och konstant effekt. Påverkan på kostnadsbesparing, antal tidssteg

med laststyrning och bortstyrd värmeenergi för respektive exkluderad styrregel presenteras i tabellerna 6.6 och 6.7. I dessa tabeller används endast skalningsfaktorn 1.

Eon Malmö visar förhållandevis stora förändringar i kostnadsbesparing, jämfört med motsvarande för EVITA. Gemensamt för båda fjärrvärmesystemen är att en ökning av bortstyrd värmeenergi, till följd av exkludering av styrregler, visar en konsekvent ökning av kostnadsbesparing. Sambandet är dock inte proportionellt.

Regeln om konstant effekt under styrning visar inte i något av systemen ha någon större ekonomisk betydelse. Däremot leder exkludering av den regeln i båda fallen till att antalet tidssteg med laststyrning ökar med minst 26%. Större ekonomisk betydelse verkar däremot finnas i längden på balans- och styrsekvenser. Exkludering av balanssekvens gav i båda systemen liknande besparingsresultat som då samtliga regler exkluderades men betydligt lägre ökning av mängden bortstyrd värmeenergi. För Eon Malmö var även antalet tidssteg med laststyrning betydligt mindre vid exkludering av balanssekvens än då alla styrregler exkluderades.

Särskilt halvering av längden på styrsekvensen leder till kraftigt minskad besparing och utnyttjande av laststyrning i båda systemet. Samma effekt på utnyttjande av laststyrning nås om sekvenslängden för balans ökas, dock så minskar inte besparingarna lika kraftigt. Halverad styrsekvens och dubbel balanssekvens tillåter totalt sett lika många tidssteg med styrning respektive balans men den senare ändringen visar på större kostnadsbesparing. Den senare ändringen ger även fördelen att antalet tidssteg med laststyrning minskar betydligt jämfört med då sekvenslängden för styrning halveras. Vidare förlängning av sekvenstiden för balans till 24h minskar kostnadsbesparingarna och utnyttjandet av laststyrning förhållandevis lite i båda systemen. Fördubbling av sekvenslängden för styrning leder på samma sätt till samma antal tidssteg med styrning respektive balans som då balansperioden halveras. För Eon Malmö leder dubbel styrsekvens till större kostnadsbesparing samt till mindre utnyttjande av laststyrning än halv balanssekvensen. Motsatsen gäller för EVITA där den ekonomiska fördelen ligger i halverad sekvenslängd för balans, samtidigt som laststyrningen utnyttjas mindre. Dock är det en relativt liten skillnad i resultat mellan dessa två ändringar för EVITA.

Tabell 6.6: Besparing, antal tidssteg och summan av bortstyrd värmeenergi för EVITA då olika styrregler exkluderats från laststyrning modellerat som ackumulatortank med konstant effekt. Värden för samma modelleringsmetod med skalningsfaktor 1 har tagits från tabellerna 6.1, 6.2 och 6.4 ovan för att ge referensvärden.

Ändrade styrregler	Besparing	Antal tidssteg med laststyrning	Summa av bortstyrd värmeenergi [MWh]
EVITA			
Referens ack.tank med konstant effekt	-0,11%	105	1 034
Utan styrregler	-0,15%	128 (+22%)	1 741 (+68%)
Utan konstant effekt	-0,11%	132 (+26%)	1 325 (+28%)
Utan balanssekvens	-0,14%	124 (+18%)	1 245 (+20%)
Halverad 4h balanssekvens	-0,12%	125 (+19%)	1 178 (+14%)
6h balanssekvens	-0,11%	128 (+22%)	1 050 (+2%)
12h balanssekvens	-0,09%	68 (-35%)	919 (-11%)
Dubbel 16h balanssekvens	-0,08%	64 (-39%)	626 (-39%)
24h balanssekvens	-0,08%	44 (-58%)	533 (-48%)
Halv 4h styrsekvens	-0,04%	78 (-26%)	654 (-37%)
Dubbel 16h styrsekvens	-0,12%	132 (+26%)	1 225 (+18%)

Tabell 6.7: Besparing, antal tidssteg och summan av bortstyrd värmeenergi för Eon Malmö då olika styrregler exkluderas från laststyrning modellerat som ackumulator-tank med konstant effekt. Värden för samma modelleringsmetod med skalningsfaktor 1 har tagits från tabellerna 6.1, 6.2 och 6.4 ovan för att ge referensvärden.

Ändrade styrregler	Besparing	Antal tidssteg med laststyrning	Summa av bortstyrd värmeenergi [MWh]
Eon Malmö			
Referens ack.tank med konstant effekt	-0,24%	246	4 251
Utan styrregler	-0,33%	405 (+65%)	8 292 (+95%)
Utan konstant effekt	-0,26%	314 (+28%)	4 582 (+8%)
Utan balanssekvens	-0,33%	306 (+24%)	6 875 (+62%)
Halverad 4h balanssekvens	-0,27%	298 (+21%)	5 294 (+25%)
6h balanssekvens	-0,26%	242 (-1%)	4 538 (+7%)
12h balanssekvens	-0,19%	187 (-24%)	2 914 (-31%)
Dubbel 16h balanssekvens	-0,19%	145 (-41%)	2 345 (-45%)
24h balanssekvens	-0,18%	118 (-52%)	2 143 (-50%)
Halv 4h styrsekvens	-0,13%	169 (-31%)	2 094 (-51%)
Dubbel 16h styrsekvens	-0,31%	282 (+15%)	5 242 (+23%)

7 Diskussion

Under detta avsnitt diskuteras studiens resultat och skillnaden mellan olika simuleringar. Analys av de olika utfallen syftar till att besvara de frågeställningar som rör kostnadsbesparing, systemförutsättningar och inverkan av olika styrregler och parametrar på laststyrningens funktion. Vidare diskuteras även arbetets begränsningar och metodval.

7.1 Olika förutsättningar för EVITA och Eon Malmö

I relation till städernas respektive fjärrvärmelast så är den modellerade mängden bortstyrbar effekt och värmemängd i Lund större än motsvarande mängd i Malmö. I absoluta värden är de dock i samma storleksordning. Detta kan ligga bakom varför gränsen för maximal bortstyrning är mer synlig i Eon Malmös system då figurerna 6.1 och 6.2 jämförs. En relativt liten del av lasten i Malmö är tillgänglig för bortstyrning, varför den maximala nivån oftare nås än för EVITA. Om ännu mindre skalningsfaktorer testats hade troligen laststyrningen i EVITA påverkats mer av gränsen för den maximala bortstyrningen.

Modellerad bortstyrbar effekt och värmemängd är relativt lika i de två systemen, och störst utnyttjande av laststyrning påvisas överlag i Eon Malmös fjärrvärmenät. Den överlag högre totala mängden bortstyrd värmeenergi i Malmö beror sannolikt på storleksskillnaden i last, då konsekvent även lastvariationen kan väntas bli större för Malmö. Däremot finns det även en tydlig skillnad i antal tidssteg med laststyrning som inte kan kopplas direkt till storleksskillnaden i last. Det kan snarare bero på att Eon Malmö är ett mindre komplext nät med överlag mindre balansförmåga i systemet. Kraftringen är anslutet till EVITA som är mer komplext, med relativt många värme- och energikällor som alternativ för balansering av lastvariation. Samtidigt finns en större ackumulatortank tillgänglig i Lund än i Malmö. Detta stämmer överens med studien av Kontu et al. (2018) om utnyttjande av laststyrning i olika fjärrvärmesystem beroende på storlek och komplexitet.

7.2 Skalningsfaktorer

Vid större skalningsfaktorer är det modelleringsmetoden med upprampning som visar på större potential för kostnadsbesparing. Detta kan bero på att den tillåtna sekvensperioden för styrning är längre än för metoden med konstant effekt. Det syns i både tabell 6.6 och 6.7 att längre tillåten styrsekvens ökar kostnadsbesparing och utnyttjande av laststyrning i båda systemen, vilket kan innebära att upprampning ges bättre förutsättningar. Däremot tillåts inte metoden med upprampning att nå laststyrning till maximal effekt förrän efter 4 tidssteg. Detta kan vara anledningen till att denna effektbegränsning inte syns lika tydligt som för metoden med konstant effekt i figur 6.2. Upp-

rampningsmetoden innebär därmed både en fördel och en nackdel då det tillåter längre styrsekvens, samtidigt som maximal bortstyrning inte nås. Vid högre skalningsfaktorer tillåts laststyrning att nå en viss effekt snabbare då den högre maxeffekten indirekt innebär större tillåten ändring i effekt per tidssteg. Det skulle även kunna förväntas att denna modelleringsmetod utnyttjar färre tidssteg med laststyrning vid högre skalningsfaktor då önskad bortstyrning kan nå snabbare. För Eon Malmö och modelleringsmetod med ackumulatortank och konstant effekt sammanfaller skalningsfaktor 2, då effektbegränsningen på bortstyrning inte längre är urskiljbar i figur 6.3, med att utnyttjad mängd laststyrning avstannar. Motsvarande för kostnadsbesparing är skalningsfaktor 1,5, se tabellerna 6.2 och 6.4. Samma modelleringsmetod i EVITA visar inte på någon större påverkan av effektbegränsningen, vilket även sammanfaller med att motsvarande utnyttjad mängd laststyrning avstannar på den lägre skalningsfaktorn 1,2. Påverkan på kostnadsbesparing för EVITA är svårt att urskilja då resultaten är utspridda och inte visar på någon tydlig trend. Med hänsyn till storleksskillnaden i total fjärrvärmelast mellan Malmö och Lund innebär det att EVITA fortsätter att öka utnyttjandet av laststyrning med denna modelleringsmetod vid relativt hög bortstyrbar effekt och tillgänglig värmemängd jämfört med Eon Malmö. Detta kan återigen kopplas till den större komplexiteten i EVITA. Laststyrning som sker i Lund kan utnyttjas i de andra städerna Landskrona och Helsingborg i och med att dessa nät är sammankopplade. Resultatet av denna studie blir delvis motstridigt med studien av Kontu et al. (2018), då antalet tidssteg minskar medan bortstyrd värmemängd ökar, relativt till fjärrvärmelastens storlek, i det mer komplexa fjärrvärmesystemet EVITA.

7.3 Styrregler

7.3.1 Exkludering av samtliga styrregler

Skillnaden mellan referensfallet och vid exkludering av samtliga styrregler är synbar i båda fjärrvärmesystemen. Resultaten visar att både antal tidssteg laststyrning med och total bortstyrd värmemängd ökar kraftigt vid exkludering av samtliga styrregler, vilket visar på större utnyttjande av lagringsförmåga om en ackumulatortank installeras istället för laststyrning med konstant effekt. Detta sammanfaller med resultat från studien av Romanchenko et al. (2018) som visade att centraliserade energilagrar används för att lagra dubbelt så mycket energi än motsvarande kapacitet med laststyrning. Deras studie pekade dock på att orsaken till detta främst ligger i att centraliserade lager upplever mindre värmeförluster, vilket inte har tagits hänsyn till i detta arbete. Om värmeförluster istället hade inkluderats, hade möjligtvis en större värmemängd behövts laddas in i den modellerade ackumulatorn för att sedan ladda ur önskad mängd. Värmeförluster kan från primärsidan ses som ytterligare försäljning och i helhet räknas som en ekonomisk vinst. Det finns därmed en risk att byggnader överutnyttjas som värmelager och till större grad laddas med extra värme. Om värmeförluster istället endast

ses som ökad produktionskostnad, vilket ska minimeras, hade laststyrning i byggnader sannolikt istället utnyttjats mindre.

7.3.2 Sekvenslängder

Om sekvenslängderna för styrning eller balans önskas ändras visar denna studie på att det är ekonomiskt fördelaktigt för båda modellerade systemen att förlänga balanssekvensen snarare än att förkorta styrningsperioden. Deras effekt på utnyttjande av laststyrning är dock inte entydigt. I båda fallen är totalt färre tidssteg tillgängliga för laststyrning. Om motsatsen önskas, att totalt öka antalet tidssteg med laststyrning, visar denna studie inte på någon entydig fördel med att förlänga styrsekvensen eller att förkorta balanssekvensen. I EVITA leder halverad balanssekvens till större kostnadsbesparing samt lägre utnyttjande av laststyrning, både till antal tidssteg och värmemängd. För Eon Malmö gäller motsatsen och skillnaden i resultat är här även större mellan de två ändringarna.

7.3.3 Styrning med konstant effekt

Styrregeln om att laddning och urladdning av värmeenergi sker med konstant effekt visar inte ha någon större ekonomisk betydelse. Genom att styra med konstant effekt minskar kostnadsbesparingen mycket lite i båda systemen. Däremot kan det ses som en fördel då utnyttjandet av laststyrning minskar både i fråga om antal tidssteg och total värmemängd. I sin tur betyder det mindre slitage på styrutrustning och mindre risk att laststyrningen uppmärksammas av de boende.

Som i alla modeller speglas inte verkligheten, utan endast en förenkling av den. Då modelleringsmetoden ger en bild av potentialen för laststyrning behövs ytterligare styrning på sekundärsidan av systemet. Där kan högre upplösning förväntas samt exempelvis upprampning av effekt vara inkluderat i styrningen. Den enklare modelleringsmetoden med konstant effekt kan därmed vara ett fullgott alternativ på primärsidan av systemet.

7.4 Extern källa som modelleringsmetod

Det kan potentiellt vara en fördel att använda modelleringsmetoden med extern källa då den för EVITA påvisar lika stor kostnadsbesparing som övriga alternativ, medan en betydligt mindre mängd värmeenergi styrs bort. Framförallt utnyttjas färre tidssteg till laststyrning. Dessa är förskjutna till perioder med hög fjärrvärmelast och troligen även högre produktionskostnad för värme. Om det finns intresse av att minimera tillfällena för laststyrning är modelleringsmetoden med extern källa en teori som är värd att utforska mer. Resultatet av denna studien visar även att det finns betydligt större potential om den bortstyrda värmen tilldelas en ännu lägre prissättning. Motsatsen

gäller för Eon Malmö där resultaten endast visade på mycket lite utnyttjande av extern källa, oavsett prissättning och skalningsfaktor. Detta resultat var mycket oväntat. Det kan bero på att de har avtal om att ta emot värme från SYSAV vilket inte lämnar utrymme till leverans från den modellerade källan. Det är även rimligt att deras ordinarie produktionskostnader förblir lägre än prissättningen på den externa källan även under vintersäsongen. Vid enstaka tillfällen används den externa källan i Eon Malmö även vid högre prissättning, vilket indikerar att det då kan finnas stor besparingspotential.

7.5 Begränsningar

Tillgänglig effekt och lagringsförmåga är ej beroende av aktuell fjärrvärmelast i arbetets modelleringsmetoder för att trimma optimeringstiden. I figurerna 6.1 och 6.2 syns det att distributionen av laststyrning modellerat som ackumulatortank inte har någon tydlig koppling till mängden last. Därmed kan urladdning med hög effekt även förväntas under tidssteg med låg last samt inladdning förväntas med hög effekt under tidssteg med hög last. Detta går emot teorin om begränsning av bortstyrning som presenterades i avsnitt 2.5.2. Denna teori är dock beroende av fjärrvärmesystemets dimensionering och huruvida lasten når dess högsta kapacitet. Eon Malmö uttryckte ingen oro för begränsning av inladdning då fjärrvärmesystemet i Malmö i helhet är överdimensionerat. Dessutom kan behovet av laststyrning antas minska med lägre last på sommarhalvåret och därmed är behovet av urladdning mindre.

Laststyrningens inverkan på utsläpp analyserades inte i detta arbete då det enda använda fossila bränslet, naturgas, inte visade på någon förändrad användning mellan de olika utfallen. Olja var tillgängligt för spetsenheter i en av systemmodellerna, men användes inte under något av utfallen.

7.6 Analys av metodval

Eon Malmö och Krafringen representerar två systemmodeller med olika förutsättningar. Detta gav en god grund för att dra slutsatser kring systemförutsättningarnas inverkan på laststyrningens funktion. Denna jämförelse, tillsammans med analys av parametrar och styrregler, utgör en betydande del av att uppfylla arbetets syfte. Om systemmodeller aktivt valts utifrån dess förutsättningar, hade två ännu mer olika exempel kunnat väljas för att ge tydligare åtskilda resultat.

Ytterligare värde kan finnas i att kombinera modelleringsmetoderna presenterade i denna rapport med en systemmodell som tar hänsyn till flödesbegränsningar och kritiska punkter i fjärrvärmenätet. Inkludering av dessa hade återspeglat värdet av laststyrning som en balansförmåga på sekundärsidan och sannolikt visat större besparingspotential. Förutsättningar finns för att inkludera kritiska punkter i ytterligare studier, men det hade inneburit en större arbetsbörda. Samma bredd av utfall som producerades i detta arbete

hade sannolikt inte kunnat jämföras.

Vissa parametervärden bestämdes utan någon specifik teoretisk grund. Valet grundades istället i förslag från de berörda aktörerna efter diskussion om deras respektive studier. Därför testades exempelvis olika skalningsfaktorer och prissättningar. Eftersom det i flera fall inte fanns ett rätt absolut värde var det därför mer intressant att analysera effekten då dessa värden ökade eller minskade. De värden som motsvarade skalningsfaktor 1 utgjorde därmed en utgångspunkt varifrån parametervärdena skalades upp och ned.

7.7 Möjliga förbättringar av detta arbete

Redan i början borde bortstyrbar effekt och värmemängd ha varit jämförbar för EVITA och Eon Malmö. Istället för absoluta värden, som i detta arbete även var olika för de två systemen, borde en procentsats av exempelvis installerad lastkapacitet i respektive fjärrvärmenät använts. Särskilt då de absoluta värdena som nu användes är i samma storleksordning gör det de högre skalningsfaktorerna mindre relevanta för EVITA, då fjärrvärmelasten är mindre i Lund än i Malmö.

Det hade varit intressant att utreda vilka typer av kostnader som undviks då laststyrning inkluderas i respektive systemmodell. Dessa kostnader hade kunnat samlas och analyseras bredvid den totala produktionskostnaden under arbetets gång.

8 Slutsats

Laststyrning har i denna studie modellerats och implementerats i ett optimeringsprogram. Tre olika metoder användes vid modellering av laststyrning. Två av metoderna liknar värmelagring i byggnader med en ackumulatortank, medan en metod modellerade laststyrning som en extern värmekälla. Modellerna har tilldelats parametrar som begränsar sekvenslängd, tillåten effekt och total mängd bortstyrd värmeenergi under laststyrning. Dessa parametrar har även tilldelats olika skalningsfaktorer för att variera den tillgängliga kapaciteten. Resulterande styrregler implementerades i laststyrningsmodellen och testades mot varandra med avseende på kostnadsbesparing och utnyttjandegrad. Under arbetets gång har laststyrning med dessa styrregler simulerats i systemmodeller av EVITA och Eon Malmös fjärrvärmenät. Utfallen i de två systemmodellerna jämfördes i syfte att analysera inverkan av deras olika förutsättningar. Samtliga utfall av simuleringarna visar på önskat resultat och laststyrning utnyttjas med ekonomisk fördel i båda systemmodellerna.

Ändring av sekvenslängder för styrning och balans har större inverkan på kostnadsbesparing än begränsning av bortstyrning till konstant effekt under laddning och urladdning. Det visades att kostnadsbesparingarna minskade särskilt mycket då sekvenslängden för styrning minskades. Förlängda sekvenslängder för balans gav samma inverkan men i mindre grad. Längre styrsekvens samt kortare balanssekvens visade på ökad besparing, dock med fördel till vardera i de två modellerade fjärrvärmesystemen.

Bortstyrning av last utan återföring har mycket begränsad användning i Eon Malmös systemmodell. Även vid lägre kostnad för förlorad försäljning utnyttjas detta endast vid enstaka tillfällen. Detta beror sannolikt på att sedan tidigare bestämda mängder värmeenergi tas emot från andra källor, dessutom till ett lågt pris. Däremot visar denna metod, vid få tillfällen, på besparingspotential även för högre prissättning på förlorad försäljning. I EVITA visar sig denna metod vara mer beroende av prissättningen, och utnyttjandet av denna når noll vid högre prissättning. Denna modelleringsmetod visar även på tydlig förskjutning till tidpunkter med hög fjärrvärmelast i EVITA.

Samtliga utfall med laststyrning implementerat visar på potentiell kostnadsbesparing. Ingen av de modellerade fjärrvärmesystemen visade dock på någon entydig koppling mellan kostnadsbesparing och uppskalning av mängden bortstyrbar effekt och värmemängd. Eon Malmös systemmodell visade överlag på större potential för kostnadsbesparing, förutom för modelleringsmetoden då bortstyrd värmeenergi ej återförs. Detta sammanfaller med att laststyrning här utnyttjas oftare och till större mängd, även relativt till dess fjärrvärmelast.

Gemensamt för båda systemen är att modelleringsmetoden med upprampning av bortstyrd effekt visade högst kostnadsbesparing vid högre skalningsfaktorer. Denna modelleringsmetod innebär längre styrsekvens och kortare

balanssekvens än övriga två, och dessa ändringar av styrregler visade sig även ensamt ge större kostnadsbesparing. Detta kan vara anledningen till att den större kostnadsbesparingen nås med upprampning. Vid lägre skalningsfaktorer är denna modelleringsmetod möjligtvis begränsad av den maximalt tillåtna ändringen av effekt mellan två tidssteg, och kan därmed inte utnyttja lika stor mängd värmeenergi. Då denna modelleringsmetod visades vara starkt påverkad av de ändrade sekvenslängderna är det tveksamt om det är en effektiv metod för att modellera upprampning av effekt under laststyrning. Möjligtvis är det tillräckligt att modellera med konstant effekt i EO3 och hänvisa upprampning till noggrannare styrning på sekundärsidan.

Frekvensen för utnyttjande av laststyrning varierade lite och utan tydlig koppling mellan olika skalningsfaktorer. Däremot visas en tydligare koppling mellan skalningsfaktor och totalt bortstyrd värmemängd. För modelleringsmetoden med konstant effekt kan även en kapacitetsgräns utgöras för respektive system, då den bortstyrda värmemängden slutar öka. Laststyrning med de särskilda styrreglerna om konstant effekt och upprampning visar på en jämn distribution i varaktighetsdiagram över respektive systems fjärrvärmelast.

Resultatet av denna studie visar att utnyttjande av laststyrning är starkt beroende av fjärrvärmesystemets förutsättningar. Det mer komplexa fjärrvärmesystemet i EVITA visar i denna studien på fortsatt utnyttjande av laststyrning, då kapaciteten ökar relativt till fjärrvärmelastens storlek. I EVITA appliceras laststyrning endast i Lund, men kan utnyttjas även i andra städer då EVITA binder samman flera städers fjärrvärmesystem. Därmed kan en större andel av Lunds fjärrvärmelast utnyttjas för laststyrning. Däremot utnyttjas laststyrning i samma system under betydligt färre tidssteg än i det mindre komplexa fjärrvärmesystemet tillhörande Eon Malmö. Detta kan bero på att tillgången till fler alternativ för balansering av fjärrvärmeproduktionen innebär att laststyrning inte behöver utnyttjas lika ofta.

9 Förslag på ytterligare studier

- Optimeringstider med laststyrningsmodul är i nuläget långa vilket innebär att vidare trimning av modellen behövs.
- En potentiellt värdefull funktion som laststyrning kan bidra med är större flexibilitet ute i nätets periferi, vilket beskrevs i avsnitt 2.5.2. Då värdet av denna funktion inte har inkluderats i detta arbete finns det utrymme för att vidare komplettera laststyrningsmodellen med hantering av kritiska punkter och optimering av framtemperatur.
- Modelleringsmetoden med extern källa bygger på ett antagande om att inomhustemperaturen kan återställas av de inneboende och övrig aktivitet efter en bortstyrning, istället för att återföra värmeenergin med återkommande last. Detta borde undersökas med praktiska studier på hur inomhusklimatet svarar på sådan bortstyrning.
- Utfall från en laststyrningsmodell bör jämföras mot en verklig bakgrund för att avgöra hur väl den representerar verklig drift. Därmed behöver skarpa tester av laststyrning utföras med utgångspunkt i modelleringsmetod från detta arbete.
- Marknadsmodeller för laststyrning behövs, då konsumenten får incitament för att bidra med lastflexibilitet. Kärkkäinen et al. (2003) föreslår två alternativa tillvägagångssätt; ett fast prisavdrag som ger operatören möjlighet att direkt styra last under bestämda villkor samt en rörlig kostnad som indirekt laststyr genom att införa tider med lägre respektive högre pris på fjärrvärme. Hur dessa priser ska sättas för att ge konsumenter ökade incitament bör undersökas vidare. Systemnyttan är redan tydlig för operatören medan kundsidan behöver en tydligare bild av fördelarna med laststyrning.

Referenser

- Çengel, Y. & Boles, M. (2014), *Thermodynamics: An Engineering Approach*, McGraw-Hill series in mechanical engineering, McGraw-Hill Education.
- Frederiksen, S. & Werner, S. (1993), *Fjärrvärme: teori, teknik och funktion*, Studentlitteratur.
- Frederiksen, S. & Werner, S. (2013), *District Heating and Cooling*, Studentlitteratur AB.
- Gellings, C. & Chamberlin, J. (1988), *Demand-side management: concepts and methods*, Fairmont Press.
- Hedbrant, J. (2001), On the thermal inertia and time constant of single-family houses, PhD thesis, Linköpings universitet.
- Isfält, E. & Bröms, G. (1992), *Effekt- och energibesparing genom förenklad styrning och drift av installationssystem i byggnader: beräkningar*, Meddelande / Installationsteknik, Kungl. Tekniska högskolan, Institutionen för installationsteknik.
- Johansson, C. & Wernstedt, F. (2010), 'Heat load reductions and their effect on energy consumption', *The 12th International Symposium on District Heating and Cooling, Tallinn*.
- Kensby, J., Trüschel, A. & Dalenbäck, J.-O. (2015), 'Potential of residential buildings as thermal energy storage in district heating systems – results from a pilot test', *Applied Energy* **137**, 773–781.
- Kontu, K., Vimpari, J., Penttinen, P. & Junnila, S. (2018), 'City scale demand side management in three different-sized district heating systems', *Energies* **11**, 3370.
- Kraftringen & Eon Malmö (2019), Privat kommunikation. Möten, telefonsamtal och mail kring laststyrning under arbetets gång.
- Kärkkäinen, S., Sipilä, K., Pirvola, L., Esterinen, J., Eriksson, E., Soikkeli, S., Nuutinen, M., Aarnio, H., Schmitt, F. & Eisgruber, C. (2003), 'Demand side management of the district heating systems', *VTT Research Notes* **2247**.
- Myrendal, P. & Olgemar, J. (2010), 'Fjärrstyrning av fjärrvärmeventiler : Analys och utvärdering'.
- Romanchenko, D., Kensby, J., Odenberger, M. & Johnsson, F. (2018), 'Thermal energy storage in district heating: Centralised storage vs. storage in thermal inertia of buildings', *Energy Conversion and Management* **162**, 26 – 38.
- Selinder, P. & Zinko, H. (2003), 'Marginaler i fjärrvärmesystem', *Rapport FoU 2003:85, Svensk Fjärrvärme*.

Wernstedt, F. & Johansson, C. (2009), 'Demonstrationsprojekt inom effekt och laststyrning', *Fjärrsyn Rapport 2009:26* ISBN 978-91-7381-041-8.

Wernstedt, F., Johansson, C. & Wollerstrand, J. (2008), 'Sänkning av returtemperaturer genom laststyrning', *Fjärrsyn Rapport 2008:02* ISBN 978-91-7381-007-4.

Österlind, B. (1982), *Effektbegränsning av fjärrvärme: försök med centraliserad styrning av abonnenternas effektuttag*, Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm.