



Potentialstudie Active Demand

Elforsk rapport 13:82



Martin Borgqvist, Fredrik Karlsson, Kristina Fyhr, Lisa Ossman

Maj 2013

Potentialstudie Active Demand

Elforsk rapport 13:82

Förord

Syftet med Smart Grids programmet är att samordna elbranschens utvecklingsaktiviteter för framtida intelligenta elnät inom området Överföring & Distribution.

Som en följd av samhällets anpassning för att minska klimatpåverkan är intresset för att utveckla elsystemet i riktning mot nya produktions- och förbrukningsmönster stort. Smart Grids möter efterfrågan på framtidens elnät genom att göra det möjligt att mäta tillståndet i elnätet. Utav den erhållna informationen, ska det sedan gå att detaljstyra elflödet samt utbyta information med prisaktörer.

Nytan av ett smart elnät är uppenbart och fördelar kan återfinnas hos alla aktörer.

- Kundnytta - Bättre tillförlitlighet, information av ev. elavbrott samt billigare elleveranser.
- Internnytta - Nätägare och elhandlare kan utföra många av sina funktioner (reparationer, underhåll, spänningsstyrning, identifiering av bortkopplade kunder och lägre kostnader för eventuella investeringar) betydligt mer effektivt.
- Samhällsnytta - På systemnivå märks skillnaden i en förändrad produktion och ett annorlunda konsumtionsmönster. Dessutom bidrar Smart Grids med en minskad miljöpåverkan och lägre överföringsförluster.

Smart Grids programmets programstyrelse består av följande ledamöter:

Peter Söderström, Vattenfall Eldistribution AB (ordförande)

Göran Ericsson, Svenska Kraftnät (vice ordförande)

Martin Sandin, Göteborg Energi AB

Rolf Gustafsson, Mälarenergi AB

Susann Persson, Jämtkraft AB

Alexander Örning, HEM Nät AB

Anders Johansson, SABO AB

Claudio Marchetti, ABB AB

Ingvar Hagman, NKT Cables AB

Anders Trana, Telia Sonera AB

Anders Bülund, Trafikverket

Hannes Schmied, NCC AB

Linda Karlsson, Siemens AB

Lawrence Jones, Alstom A

Matz Tapper, Svensk Energi (adjungerad)

Monika Adsten, Elforsk AB (adjungerad)

Susanne Olausson, Elforsk AB (programansvarig)

Följande bolag har deltagit som finansiärer av projektet. Elforsk framför ett stort tack till samtliga företag för värdefulla insatser.

Svenska Kraftnät	Sandviken Energi Elnät AB
Vattenfall Eldistribution AB	Trollhättan Energi Elnät AB
Göteborg Energi AB	Fortum Distribution AB
Skellefteå Kraft AB	Borås Elnät AB
Mälarenergi Elnät AB	Landskrona Stad
Jämtkraft AB	Ericsson AB
Umeå Energi Elnät AB	SABO
Öresundskraft AB	Combitech AB
Jönköping Energi Nät AB	NCC Construction Sverige AB
Gävle Energi AB	ABB AB
Eskilstuna Energi & Miljö AB	TeliaSonera AB
Sundsvall Elnät AB	Trafikverket
Härjeåns Nät AB	Siemens AB
Halmstad Energi & Miljö Nät AB	Elverket Vallentuna
Falu Elnät AB	Alstom AB
AB Borlänge Energi	Basprojektet

Stockholm i november 2013

Susanne Olausson

Elforsk AB

Programområde Överföring och Distribution

SP arbetar med ett flertal uppdrag och forskningsprojekt inom området smarta nät och har dessutom en lång erfarenhet av simulerings- och modelleringsprojekt. Detta projekt kom till eftersom vi såg ett behov av en ny simuleringsmiljö för att bättre kunna studera och bedöma potentialen i att flytta olika laster i tid, något som flitigt diskuteras som en bra möjlighet inom smarta nät. Är detta en reell möjlighet och vem tjänar på det? Är det lönt med dagens prisstrukturer eller behövs nya prisstrukturer? Projektet vill bidra med en plattform där analyser av olika slag är möjliga.

Vi vill rikta ett särskilt tack till Elforsk i egenskap av uppdragsgivare och finansiär samt till projektets referensgrupp som bidragit med kloka synpunkter och input i arbete. Dessa är:

Monica Löf, Vattenfall
Erik Hjelm, Forum
Anders Johansson, SABO
Pia Stoll, ABB

Susanne Olausson, Elforsk

*Lisa Ossman, projektledare
Borås 2013-05-30*

Sammanfattning

Arbete beskrivet i denna rapport syftar till att ta fram en simuleringsmiljö för att studera olika typer av laststyrning i en byggnad (Demand Side Management). En simuleringsmiljö har tagits fram i programvaran Matlab/Simulink. I miljön finns modeller för elektriska apparater, varmvattenberedare, värmepump, radiator samt en byggnad. För att hålla ner komplexiteten är modellerna relativt enkla. Modellerna har använts för att studera en strategi där apparaterna får starta först när elpriset inom de kommande X timmarna är som lägst. Resultaten visar på en begränsad nytta med en sådan strategi med nuvarande nivå på elpris.

Besparingspotentialen för elberedaren ligger i intervallet 0-1000 SEK/år beroende på hushåll och tillåten tidsfördröjning. En anledning till besparingen är att medeltemperaturen på vattnet i beredaren är lägre då en startfördröjning införs. För fallet med en relativt stor besparing var medeltemperaturen i beredaren 58 °C. Det ska jämföras med 66 °C som var medeltemperaturen i fallet utan startfördröjning.

För hushållsapparaterna var de relativa besparingarna stora i vissa fall, då en del låg mellan 2-10 % i årlig besparing. För diskmaskinen, som hade den största potentialen, motsvarar detta ca 28 SEK/år vilket ändå får anses vara en låg siffra i absoluta tal.

För uppvärmningssystemet uppnåddes inga besparingar – tvärtom steg både energianvändning och kostnad när styrningen med lastförskjutning infördes. Det beror på att inomhustemperaturen föll mycket under den tid lastförskjutningen var aktiv, som mest ner till ca 12 °C inomhus. När uppvärmningen sedan aktiverades så startade både värmepumpen och elradiatorn och som en följd av det ökar energianvändningen och kostnaderna.

Att inga eller små besparingar uppnås med lastförskjutning beror också på att variationen i elpriset är liten, som mest ca 1 SEK/kWh.

Summary

The purpose of the work described in this report is to develop a simulation environment that can be used to study different types of load shifting in a building (Demand Side Management). A simulation environment has been developed in the software Matlab/Simulink. The environment contains models of electric appliances, a water heater, a heat pump, a radiator and a building. Rather simple models have been developed in order to reduce complexity. The environment has been used to study a strategy where appliances are allowed to start when the electricity price within the upcoming X hours is the lowest. The results show a limited benefit with such a strategy. For the water heater and the electric appliances it is possible to reduce energy cost. For the building heating system the energy cost is increased and the climate comfort is reduced.

The cost savings for the electric water heater was 0 – 1000 SEK/year depending on household and the applied delay time, X. The savings are partly due to that the average water temperature in the tank is reduced when the start delay strategy is applied. In the case with the largest savings the average water temperature in the tank was approximately 58 °C, compared to 66 °C in the case without any start delay.

The relative savings was quite large for some of the household appliances. The annual savings was between 2-10 %. For the dishwasher, which showed the largest potential, this equals 28 SEK/year which must be considered as low.

For the heating system no savings was achieved, on the contrary the energy use and the costs increased with the start delay strategy. This was because the indoor temperature decreased during the time the heating system was prohibited from starting by the time delay strategy, and when it was allowed to start the temperature was so low that both the heat pump and the electric radiator started.

The small savings in this investigation is also due to the low variance in electricity price. The difference between maximum and minimum was approximately 1 SEK.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Problembeskrivning	2
1.3	Syfte	2
1.4	Mål.....	2
1.5	Förutsättningar	2
1.6	Avgränsningar	3
1.7	Generell beskrivning av simuleringsmiljön.....	3
1.8	Organisation.....	4
2	Metod och modeller	6
2.1	Kartläggning av apparater	6
2.1.1	Kategorisering av apparater baserat på effekt- och energianvändning.....	8
2.1.2	Val av apparater som skall simuleras som dynamiska och statiska modeller.....	10
2.2	Apparatmodeller.....	10
2.2.1	Diskmaskin, tvättmaskin och torktumlare	10
2.2.2	Varmvattenberedare (VVB).....	11
2.2.3	Modell för hus med värmesystem och ventilation	13
2.3	Brukare/användarprofiler.....	14
2.4	Laststyrning	15
3	Fallstudier	17
3.1	Metod.....	17
3.2	Fallstudie 1 – 70-talshus	17
3.2.1	Fokus på uppvärmningssystemet.....	19
3.3	Fallstudie 2 – modern villa	21
3.4	Potentialstudier av apparater	22
3.4.1	Diskmaskin, tvättmaskin och torktumlare	23
3.4.2	Varmvattenberedare.....	24
4	Resultat och slutsatser	28
4.1	Förslag till fortsatt arbete	28
5	Referenser	30
	Bilaga 1, Energianvändningen i olika hushåll	31
	Bilaga 2, Simuleringsresultat från potentialstudier för hushållsapparater	38
	Bilaga 3, Simuleringsmiljö Active Demand	42

1 Inledning

Projektet Potentialstudie Active Demand genomförs på uppdrag av Elforsk.

1.1 Bakgrund

Idag produceras den mängd el som konsumenterna önskar i samma stund som efterfrågan uppstår, dvs *produktionen är anpassad efter behovet*. Ökad elproduktion med begränsade möjligheter till styrning från förnybara källor så som vind, sol och vågkraft gör det dock allt svårare att anpassa tillgången på elenergi till efterfrågan. Ett sätt att hantera detta, och därmed underlätta en kraftig utbyggnad av förnybar elproduktion, är att i större utsträckning än idag istället *anpassa behovet efter produktionen (Demand Side Management, Active Demand och Demand Response)*. Smarta nät kommer att bli ett viktigt verktyg för att underlätta anpassningen av energibehovet till energiproduktionen. Smarta-nät-utbyggnad är tekniskt möjligt, men förutsätter stora investeringar i mät-, styr-, kommunikations- och optimeringsteknik såväl i själva nätet som hos enskilda användare. I Sverige används idag vattenkraften som reglerresurs och vid extrema effekttoppar startas reservkraft. Det görs också vissa ansträngningar att anpassa behovet efter produktionen genom frivilliga överenskommelser t.ex. mellan Svenska Kraftnät och energiintensiv industri, som på begäran minskar sin elanvändning. Detta får dock ses som marginella justeringar för att undvika extrema situationer.

55 % av Sveriges elanvändning sker i bostads- och servicesektorn. Det är således inom denna sektor som en stor del av anpassningen av användningen till produktionen kommer att behöva ske. Rent praktiskt innebär detta att man behöver göra det möjligt att lagra energi i större utsträckning än idag, flytta energibehov i tid och minimera effekttoppar. Detta kräver omfattande investeringar i teknik som gör att olika apparater, t ex värmepumpar, varmvattenberedare och hushållsapparater, kan styras så att de reagerar på olika prissignaler, men också investeringar i utrustning och tjänster som hjälper människor att ändra sitt beteende. Elmätarnas funktion är viktig i sammanhanget eftersom den definierar gränssnittet mellan slutanvändaren av el och elproducenten.

Idag saknas såväl *incitament* som *instrument* för kortsiktig anpassning mellan efterfrågan och tillgång på el i bostads- och servicesektorn. Det är dock mycket troligt att några former av incitament för detta kommer att skapas inom en snar framtid. Dessa incitament kan vara av marknadskaraktär, som till exempel timdebitering och effekttariffer, men man kan även tänka sig frivilliga överenskommelser eller lagstiftning som ett sätt att anpassa efterfrågan till tillgången. Ett flertal elhandels- och nätbolag planerar t ex att förändra sina tariffstrukturer redan inom ett par år. Dessutom har Energimarknadsinspektionen nyligen lämnat en rapport till regeringen (EI R2010: 18 Anpassning av elnätet till ett uthålligt energisystem – Smarta

mätare och intelligenta nät), som bland annat pekar på behov av förändrade marknadsstrukturer.

1.2 Problembeskrivning

Bostads- och servicesektorn saknar kunskap om smarta nät och är inte redo att utnyttja de incitament och nya marknadsstrukturer som planeras. Därmed finns en uppenbar risk att nyttan med olika styrmedel och nya pristariffer uteblir med onödiga kostnader för energibolag och andra aktörer i bostads- och servicesektorn som följd. För att olika aktörer i bostads- och servicesektorn (t ex politiker, myndigheter, energibolag, fastighetsförvaltare, byggherrar och boende) skall kunna fatta rationella beslut rörande Smarta Nät och Demand Side Management behövs därför mer kunskap om de tekniska och ekonomiska potentialerna för Demand Side Management i bostads- och servicesektorn.

För att kunna bedöma de tekniska och ekonomiska potentialerna för Demand Side Management och Smarta Nät behövs systemoptimerande simuleringsmodeller som bygger på detaljerad kunskap om såväl teknik och brukarbeteende. Denna typ av modeller saknas idag, men kan relativt enkelt byggas med hjälp av kunskap och modeller från tidigare projekt.

1.3 Syfte

Projektets syfte är att bidra med kunskap för att kunna utforma rätt incitamentsstrukturer när det gäller active demand i bostads- och servicesektorn, samt att hjälpa energibolag och andra aktörer i bostads- och servicesektorn att fatta kloka investeringsbeslut, som bidrar till att bostads- och servicesektorns elanvändning anpassas till produktionen av el.

1.4 Mål

Projektet har två övergripande mål:

- 1) Att utveckla en systemövergripande simuleringsmiljö som simulerar bostädernas elanvändning givet olika framtida prisstrukturer. Modellen skall göra det möjligt att mer i detalj undersöka hur energibehov kan flyttas i tiden (timmarna, dygn, vecka) och hur effekttoppar kan minimeras hos olika typer av användare. Simuleringsmiljön beskrivs mer i detalj nedan.
- 2) Att använda simuleringsmiljön för ett antal fallstudier. Fallstudierna skall analysera hur en framtida smarta-nät-anpassning skulle kunna se ut ur ett användarperspektiv och vilka ekonomiska förutsättningar och drivkrafter det finns för att användarledet skall vilja investera i olika tekniker.

1.5 Förutsättningar

Mjukvaran Matlab/Simulink är en förutsättning för att kunna använda simuleringsmiljön i detta projekt. Denna mjukvara är väl spridd i

Indata i simuleringsmiljön kan enkelt ändras för att simulera olika typer av hushåll. Simuleringsmiljön består utav följande modeller:

- En husmodell som ger temperaturen inomhus som funktion av tillförd värmeeffekt och utomhustemperatur
- En modell för elradiator
- Luft/luft-värmepumpsmodell
- Varmvattenberedarmodell som ger temperatur på tappvarmvatten som funktion av tillförd eleffekt, värmeförluster och tappning av vatten
- Tvättmaskinsmodell (effekt som funktion av tid)
- Torktumlarmodell (effekt som funktion av tid)
- Diskmaskinsmodell (effekt som funktion av tid)

Respektive apparatmodell ger en effektkurva (kW) vilket gör det möjligt att undersöka enskilda utrustningars och apparaters inverkan på systemet. Information från den omfattande mätning som Energimyndigheten har gjort på flera hundra hushåll har använts som indata i simuleringsmodellen när det gäller energianvändningen. I studien har man i detalj mätt energianvändningen i hushållen både med relativt hög tidsupplösning och med hög detaljeringsgrad, till exempel vilka apparater och utrustningar som använts vid olika tider på dygnet. Eftersom statistiken är så omfattande, ger den ett bra underlag gällande användarbeteenden, energianvändning och effekttoppar.

1.8 Organisation

Projektet har letts av SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut och genomförts av forskare och ingenjörer på SP. Projektledare är Lisa Ossman. Till SPs projektgrupp har kopplats följande sakkunniga experter på SP inom byggnaden som system, elteknik, beteendets inverkan på energianvändningen, lagring samt styr- och reglerteknik.

- Lisa Ossman: Projektledare, gruppchef Hållbara energisystem
- Martin Borgqvist: Modellutveckling
- Fredrik Karlsson: Expert värmepumpar
- Kristina Fyhr: Modellering, Byggnaden som system
- Anders Lindskog: Expert elteknik
- Prof. Per Fahlén: Expert byggnaden som system, värmepumpar, luftbehandling, styr- och reglerteknik.
- Svein Ruud: Expert modellering energianvändning i byggnader, luftbehandling
- Carolina Hiller: Expert brukarbeteendets inverkan på energianvändning
- Magnus Brolin: Modellering, elnät

Projektet har haft en referensgrupp bestående utav följande personer med stor kompetens inom områdena "Smarta Nät" och "Demand Side Management".

- Monica Löf, Vattenfall
- Erik Hjelm, Fortum
- Anders Johansson, SABO
- Pia Stoll, ABB
- Susanne Olausson, Elforsk

2 Metod och modeller

Målet med modelleringen har varit att med enkla medel skapa en simuleringsmiljö som på ett korrekt sätt återger karakteristiken hos de ingående delarna. De relativt enkla modellerna reducerar mängden indata som krävs.

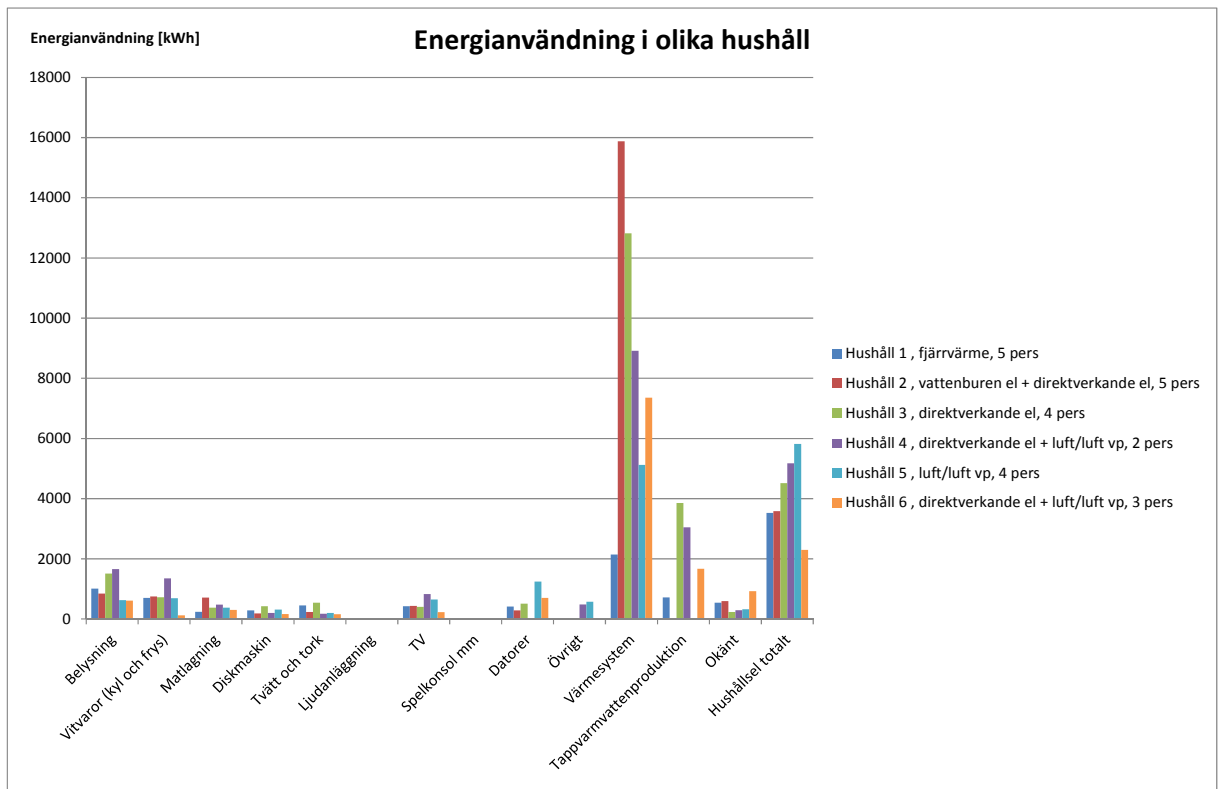
2.1 Kartläggning av apparater

I Tabell 1 återfinns en sammanställning av ofta förekommande apparater som finns i ett hus där en "typfamilj" bor. Vilka apparater och utrustningar som finns i hemmet varierar naturligtvis, på samma sätt som antalet av dem. Vidare varierar användningsmönster (dvs. hur brukarna använder apparaterna) från person till person eller familj till familj. Även energianvändning för en och samma typ av apparat med samma användningsmönster kan variera beroende på egenskaper på apparaten vad gäller standard, teknik eller storlek. Det gör det således svårt att enkelt jämföra olika hushålls energianvändning.

Tabell 1, Sammanställning över vanliga apparater och utrustningar i ett hus.

Värmesystem	Kök	Underhållning
Direktelvärm (elradiatorer)	Kylskåp	TV
Biobränslepanna	Frys	Dator inkl. skrivare mm
Elpanna	Spis/ugn	Spelkonsol
Värmepump (olika typer)	Mikrovågsugn	Stereo
Fjärrvärme	Diskmaskin	
	Vattenkokare	Övrigt
Tappvarmvatten	Kaffemaskin	Bilvärmare
Varmvattenberedare		
Solfångare	Tvätt och badrum	
Cirkulationspump	Tvättmaskin	
	Torktumlare/torkskåp	
Ventilation	Torkfläkt	
Fläktar	Skotork	
	Bastu	
Belysning		

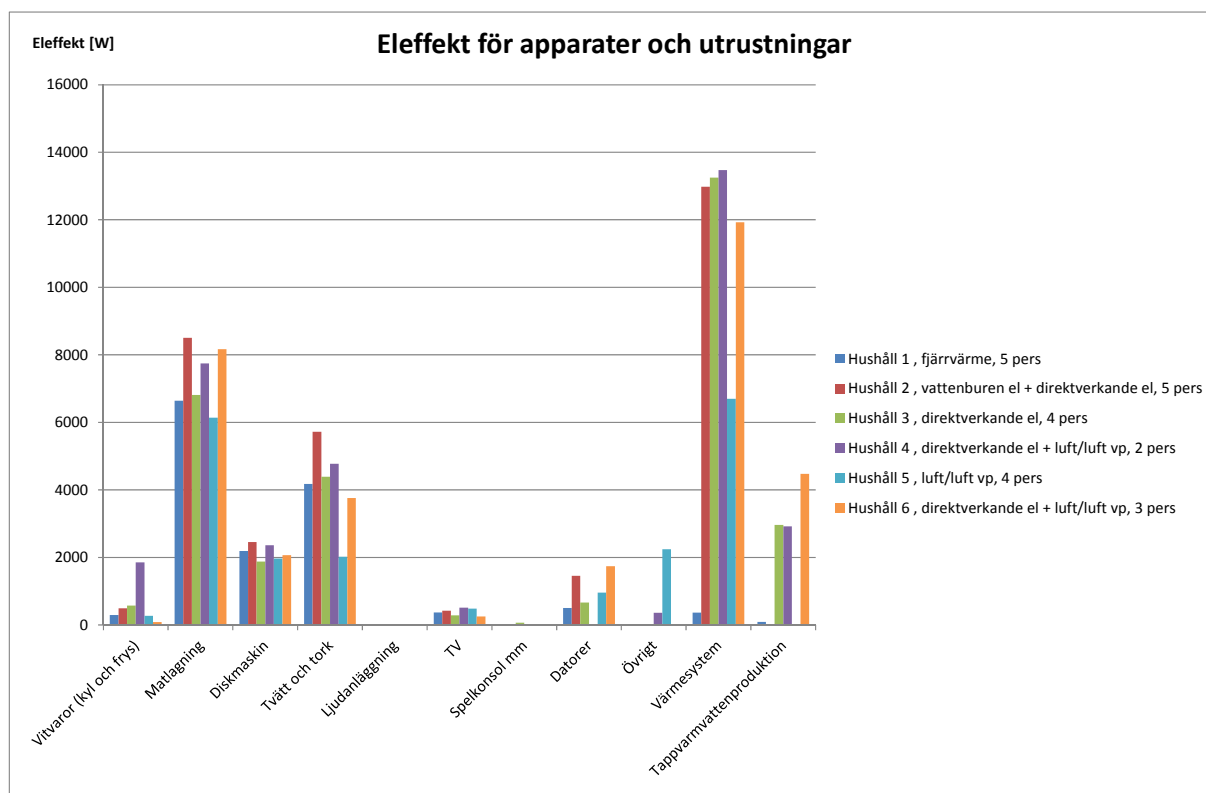
Energimyndighetens studie av elanvändningen i 400 hushåll i Sverige (Zimmermann, 2009) ger möjlighet att jämföra elanvändningen i hushåll på de apparater och utrustningar som använder elenergi. Figur 2 visar hur elanvändningen varierar i sex hushåll i Sverige. Det framgår även av figuren att värmesystem och produktion av tappvarmvatten utgör den största andelen av elanvändningen för alla hushåll som använder el som uppvärmningskälla.



Figur 2, Energianvändning i olika hushåll

Mer detaljerad information om de olika apparaterna och deras spridning av användning för de olika hushållen återfinns i bilaga 1.

Effektmässigt ser det lite annorlunda ut, t.ex. värmesystemet som använder mycket el på årsbasis, behöver inte momentant dra så mycket eleffekt. I Figur 3 presenteras maximal eleffekt som de olika apparaterna och utrustningar drar i ett småhus. Informationen är beräknad utifrån Energimyndighetens studie (Zimmermann, 2009). Eftersom elenergin i studien är mätt och presenteras för var 10:e minut, kan det ge "fel" i beräkningarna av använd eleffekt. Vissa apparater är inte igång och drar maximal effekt under dessa tio minuters intervaller, t.ex. en vattenkokare som ofta bara är igång någon-några minuter i taget. En apparat som endast är igång korta perioder kommer således få en underskattad maximal eleffekt.



Figur 3, Maximal uppmätt eleffekt för hushållsapparater

2.1.1 Kategorisering av apparater baserat på effekt- och energianvändning

Möjligheten att styra apparaterna i ett hushåll till mer gynnsamma tidpunkter, varierar mellan de olika apparaterna och utrustningarna. Viss del av apparaternas användning går inte att styra utan att funktionen/nyttan helt uteblir, t.ex. belysning, vattenkokare, kaffemaskin, TV och dylikt. För att flytta dessa apparaters elanvändning i tiden krävs batterilagring eller dylikt. Andra utrustningar, såsom värmesystem med direktel och varmvattenberedare kan inte heller flyttas helt fritt i tiden utan att funktion och/eller komfort minskar. Det kan dock med mer intelligent styrning gå att flytta användningen under kortare perioder då belastningen på elnätet är som störst. Med smart styrning kan även andra funktioner användas, t.ex. att sänka innetemperaturen vissa tider under dygnet då ingen är hemma.

Vissa andra apparater och utrustningar skulle kunna bli styrbara om det finns någon typ av lager, t.ex. en ackumulatortank kopplad till systemet. Detta gäller t.ex. för vattenburna värmesystem. I Tabell 2 nedan har olika apparater kategoriserats efter effekt- och energianvändning.

Tabell 2, Kategorisering av effekt- och energianvändning för vanliga apparater och utrustningar i ett hus

	Energi Hög/låg	Effekt Hög/låg	Styrning g möjlig Ja/nej	Brukarprofiler	
				Dygn	År
Värmesystem					
Direktelvärm (elradiatorer)	Hög	Hög	Ja ¹⁾	Jämn	Ojämn
Elpanna med ack. tank (vattenburen värme)	Hög	Hög	Ja ²⁾	Ojämn	Ojämn
Värmepump (olika typer)	Hög	Hög	Ja ²⁾	Ojämn	Ojämn
Golvvärme (el)	Hög	Hög	Ja ¹⁾	Jämn	Ojämn
Cirkulationspump	Låg	Låg	Nej	Jämn	Ojämn
Tappvarmvatten					
Varmvattenberedare	Hög	Hög	Ja ²⁾	Ojämn	Ojämn
Belysning	Låg	Låg	Nej	Ojämn	Ojämn
Kök					
Kylskåp	Låg	Låg	Nej ³⁾	On/off	On/off
Frys	Låg	Låg	Nej ³⁾	On/off	On/off
Spis/ugn	Låg	Hög	Nej	Ojämn	Ojämn
Mikrovågsugn	Låg	Låg	Nej	Ojämn	Ojämn
Diskmaskin	Låg	Hög	Ja	Ojämn	Ojämn
Vattenkokare	Låg	Hög	Nej	Ojämn	Ojämn
Kaffemaskin	Låg	Låg	Nej	Ojämn	Ojämn
Tvätt och badrum					
Tvättmaskin	Låg	Hög	Ja	Ojämn	Ojämn
Torktumlare	Låg	Hög	Ja	Ojämn	Ojämn
Torkfläkt	Låg	Låg	Ja	Ojämn	Ojämn
Skotork	Låg	Låg	Nej	Ojämn	Ojämn
Bastu	Låg	Hög	Nej	Ojämn	Ojämn
Underhållning					
TV	Låg	Låg	Nej	Ojämn	Ojämn
Dator inkl. skrivare mm	Låg	Låg	Nej	Ojämn	Ojämn
Spelkonsol	Låg	Låg	Nej	Ojämn	Ojämn
Stereo	Låg	Låg	Nej	Ojämn	Ojämn
Övrigt					
Bilvärmare	Låg	Hög	Ja ¹⁾	Ojämn	Ojämn

1) Ja, fast endast kortvarigt.
2) Ja, under förutsättning att någon typ av lager finns, t.ex. ackumulatortank.
3) Ej lämpligt ur hygien- och hälsosynpunkt.

2.1.2 Val av apparater som skall simuleras som dynamiska och statiska modeller

Baserat på kategoriseringen i avsnitt 2.1.1 valdes de apparater som skall modelleras som statiska eller dynamiska modeller. I Tabell 3 finns en lista på de apparater och utrustningar som ingår i simuleringsmiljön som modeller. Dessa apparater har hög energianvändning och/eller högt effektuttag samt är styrbara i olika grad, antingen med eller utan någon form av lager.

Elanvändningen för resterande apparater och utrustningar i hushållet har sammanställas som en "grundlast".

Tabell 3, Apparater och utrustningar som modellerats

Värmesystem	Hushållsapparater
Direktelvärm (elradiatorer)	Diskmaskin
Luft/luftvärmepump	Tvättmaskin
Varmvattenberedare	Torktumlare

2.2 Apparatmodeller

Nedan följer en kort beskrivning av modellerna för hushållsapparater, varmvattenberedare, elradiator och luft/luftvärmepump.

2.2.1 Diskmaskin, tvättmaskin och torktumlare

För apparaterna diskmaskin, tvättmaskin och torktumlare har inte några dynamiska modeller utvecklats då energianvändningen över tid (och därmed effekten) för dem redan är känd genom indata (för varje hushåll finns uppmätt data från Energimyndigheten). Modellerna för dessa apparater består därför enbart av uppslagstabeller där apparatens effekt ges som funktion av tiden. Effekten i varje tidssteg är beräknad som medeleffekten under en 10-minutersperiod med hjälp av den uppmätta energianvändningen enligt:

$$P(t_n) = \frac{E(t_n)}{\Delta t} \text{ [W]}$$

$E(t_n)$ är energianvändningen i Wh per 10 minutersperiod

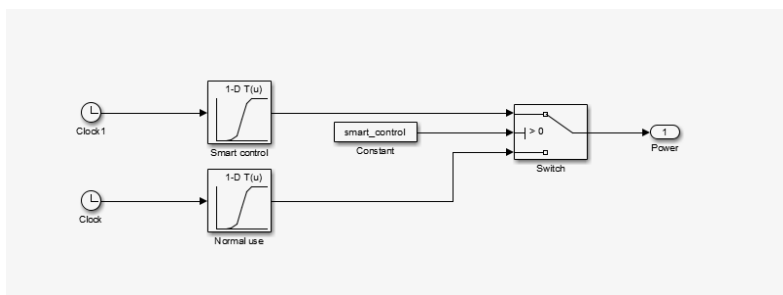
t_n är diskreta tidsvärden

$\Delta t = t_{n+1} - t_n = 10 \text{ minuter}$

Ekvation 1, beräkning av medeleffekt

Modellerna för diskmaskin, tvättmaskin och torktumlare har en uppslagstabelle för effektkurvan vid normal användning (ingen laststyrning) och en tabell för en optimerad effektkurva som används då laststyrning skall simuleras. Effektkurvorna genereras av ett skript innan simuleringsmiljön börjar simulera. Den optimerade effektkurvan genereras genom att starttiderna för varje enskild apparatcykel flyttas till ett lägsta elpris inom en tidsperiod som

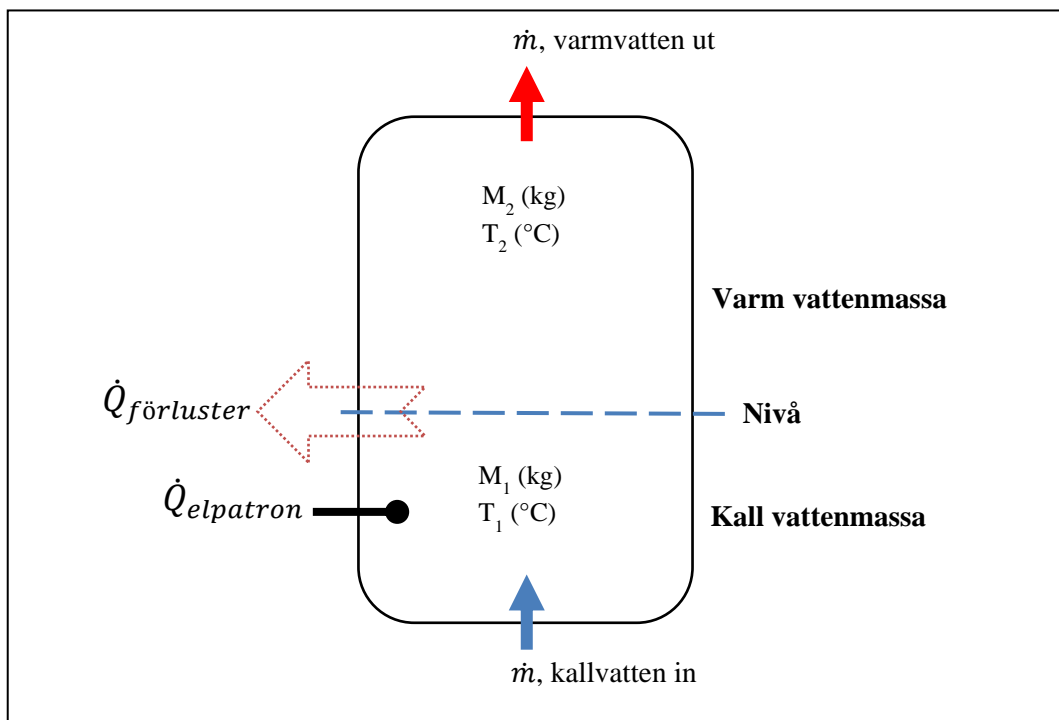
användaren själv anger. I Figur 4 illustreras skillnaden mellan de två uppslagstabellerna som används i modellen



Figur 4, Modell för diskmaskin

2.2.2 Varmvattenberedare (VVB)

För VVB har en dynamisk modell tagits fram, vilken beräknar temperaturen som funktion av tappad mängd vatten, tillförd värmeeffekt (elpatron) och förluster över tid. En utmaning i att modellera VVB är hur temperaturfördelningen i tanken skall beaktas. Ett enkelt angreppssätt är att approximera VVB som en idealt omblandad tankreaktor (temperaturen antas homogen i hela beredaren). Dock visar mätningar på VVB att vid kontinuerlig tappning utan uppvärmning är temperaturen mer eller mindre konstant fram till en brytpunkt då den sjunker mycket snabbt. Detta tyder på att VVB skiftar sig och att vid påfyllning med kallvatten i botten så sker ingen större omblandning i tanken. För en idealt omblandad VVB hade temperaturen i hela tanken sjunkit så fort kallvatten fyllts på i botten. Detta hade fått effekten att varmvattnet fortare hade tagit slut i en modell som baseras på en idealt omblandad VVB. Med utgångspunkt i detta så har en VVB – modell utvecklats enligt Figur 5 och beskrivningen nedan. Det finns även en modell framtagen som baseras på en idealt omblandad VVB, denna har dock inte använts i fallstudierna som beskrivs i denna rapport.



Figur 5, Principskiss för VVB – modell

Princip för modellen

- Från början är hela tanken fylld med hetvatten (70 °C).
- När hetvatten tappas ur tanken fylls kallvatten (10 °C) på i botten. Detta kallvatten bygger upp en idealt omblandad kall vattenmassa som inte blandar sig med det varmare vattnet ovanför (den varma vattenmassan är också idealt omblandad).
- Om den varma vattenmassan tar slut sker tappningen från den kallare vattenmassan (som då är den nya ”varma” vattenmassan), samtidigt byggs en ny kall vattenmassa upp i botten på tanken.
- Elpatronen antas sitta 0,2*höjden upp från botten
- Om nivån som markerar gränsen mellan den kalla och varma vattenmassan ligger under elpatronens nivå så är det den varma vattenmassan som värms av elpatronen. På samma sätt är det den kalla vattenmassan som värms, om nivån ligger ovanför elpatronens placering.
- Om den kalla vattenmassan värms till en temperatur som är högre än den i den varma vattenmassan ($T_1 > T_2$), antas hela tanken vara uppvärmd igen och består då av endast en varm vattenmassa.
- Temperaturen som styr elpatronens till- och frånslag mäts i nivå med elpatronen. Då temperaturen vid givaren går under 65 °C värmer elpatronen med maxeffekten, värmning upphör då temperaturen går över 68 °C.
- Värmeförluster sker både från den varma och kalla vattenmassan.

VVB – modellen bygger på följande antaganden:

- Specifik värmekapacitet och densiteten för vattnet antas vara konstant och oberoende av temperaturen.
- Tillfört kallvatten = tappat hetvatten (ingen ackumulering av vatten i tanken).
- Ingen värmetransport mellan den varma och kalla vattenmassan.
- Den varma respektive kalla vattenmassan antas var och en vara idealt omblandade (d.v.s. tanken består av två idealt omblandade vattenmassor).

I Tabell 4 nedan presentera värden på parametrar i VVB – modellen som använts i fallstudierna.

Tabell 4, Parametervärden i VVB – modell

Parameter	Värde
Höjd	1.2 m
Diameter	0.4 m
Volym	0.15 m ³
Isoleringens tjocklek	0.05 m
Förlustkoefficient isolering	0.035 J/K, m
Nivå på elpatron och temperaturgivare	20 % av höjden
Maxeffekt elpatron	3000 W
Cp vatten	4200 J/kg, K
Densitet vatten	988 kg/m ³

2.2.3 Modell för hus med värmesystem och ventilation

Huset är modellerat som en "black-box". Indata ges i form av tidskonstant, transmissionsförluster, ventilationsflöde samt uppvärmd area.

$$\dot{Q}_{hus} = UA \cdot (t_{in} - t_{ute}) + \dot{m}_{luft} \cdot c_{p,luft} \cdot (t_{in} - t_{ute})$$

\dot{Q}_{hus}	= Huset effektbehov [W]
UA	= Total värmegenomgång [W/K]
t_{in}	= Inomhustemperatur [°C]
t_{ute}	= Utomhustemperatur [°C]
\dot{m}_{luft}	= Massflöde ventilationsluft [kg/s]
$c_{p,luft}$	= Specifik värmekapacitet för luft [J/kg*K]

Ekvation 2, husmodell

Värmekällorna i huset är elradiatorer samt en luft/luft-värmepump.

För värmepumpen ges kapacitet och COP vid +7°C utomhustemperatur som indata. Omräkning till andra temperaturer görs enligt en schablonberäkning (2%/K för kapaciteten och 1.5%/K för COP). Hänsyn tas till att avfrostningar reducerar kapacitet och COP genom att dessa reduceras med 10 % under en inställbar temperatur, Tfrost, som i simuleringarna varit +5 °C.

Värmepumpens kapacitet är vald sådan att värmepumpen är heltäckande ner till ca 1-3 °C, vilket kan anses som en normal dimensionering.

Elradiatorn modelleras som en konstant effekt.

Radiator och värmepump styrs av varsin termostat med hysteresen 1 K. Inställt börvärde för värmepumpen har varit 20 °C och 19 °C för elradiatorn.

Uteluftstemperaturen för Borås 2011 är använt som klimatdata. Solinstrålning och vind etc tas inte hänsyn till i modellen.

Två olika byggnader har simulerats; en 70-talsvilla samt en modern byggnad. Indata för respektive simulering ges i Tabell 5 nedan.

Tabell 5, Indata för de två olika typhusen

Indata	70-tal	Modern
Area [m ²]	150	150
Tidskonstant [h]	24	50
Transmissionsförluster, UA [W/K]	120	90
Ventilationsflöde [l/s,m ²]	0,2	0,35
Värmepumpens kapacitet, +7 °C [W]	3000	3000
Kapacitet elradiator [W]	4500	4500

2.3 Brukare/användarprofiler

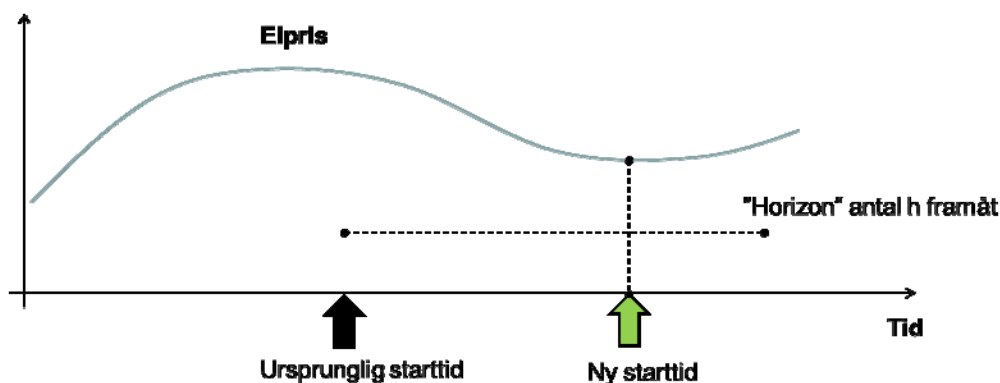
Användarprofiler för elanvändning för apparater och utrustningar samt tappvarmvattenanvändning behövs för att göra potentialstudier. Data för elanvändning av olika apparater och utrustningar kommer från undersökningen i 400 hushåll (Zimmermann, 2009). Fyra hushåll där elanvändningen mätts under ungefär ett år har valts ut. För tappvarmvattenanvändning har data från mätningar i (Wahlström et al., 2008) och (Energimyndigheten, 2009) använts. Mätdata finns inte för ett helt år att tillgå, varför månadsmätningar har repeterats tolv gånger för att erhålla ett års användning. Fyra hushåll har valts ut för tappvarmvattenanvändning och parats ihop med de fyra hushållen för elanvändning enligt Tabell 6 nedan. Observera att elmätning och vattenmätning inte har gjorts under samma tidsperiod.

Tabell 6, Hushåll som ingår i fallstudier

#	Elanvändningsdata från hushåll med:	Data Varmvattenanvändning för hushåll med:
1	5 personer, fjärrvärme	6 personer
2	5 personer, vattenburen el + direktverkande el	5 personer
3	4 personer, direktverkande el	4 personer
4	2 personer, direktverkande el + luft/luftvärmepump	2 personer

2.4 Laststyrning

Strategin för laststyrning har varit att flytta starttider för de studerade apparaterna till timmar med lågt elpris. Detta har genomförts genom att vid varje starttid för en apparat, analysera elpriset ett antal timmar framåt i tiden och fördröja starttiden till den timme med det lägsta elpriset under den aktuella perioden. Den tidsperiod för vilket det kommande elpriset analyseras är en parameter som kallas **Horizon** i simuleringsmiljön. Figur 6 nedan illustrerar principen för fördröjning av apparaters starttid.



Figur 6, Princip för förflyttning av starttid hos apparater

Det finns andra tänkbara strategier för att styra och optimera användningen av hushållsapparater, t ex:

- Maximera användningen då elpriset är lågt och minimera användningen vid höga elpris.
- Endast starta apparater då de behövs (t ex: värm inte upp varmvatten eller huset då ingen är hemma).

Lämpligheten hos olika styrstrategier beror på syftet med optimeringen, det kan t ex vara skillnad på om kostnaden skall minimeras för användaren, miljöbelastningen från elanvändningen minimeras eller om effekttoppar skall kapas. Den styrstrategi som studeras i denna rapport har valts för att den dels har potential att minska kostnader, men också för att den flyttar elanvändning till timmar då mer el finns i systemet (lågt elpris → lägre

efterfrågan). Risken med strategin är att många apparaters starttider flyttas till samma timmar. Detta utvärderas i rapporten genom att titta på studerade hushålls totaleffekt över tid.

3 Fallstudier

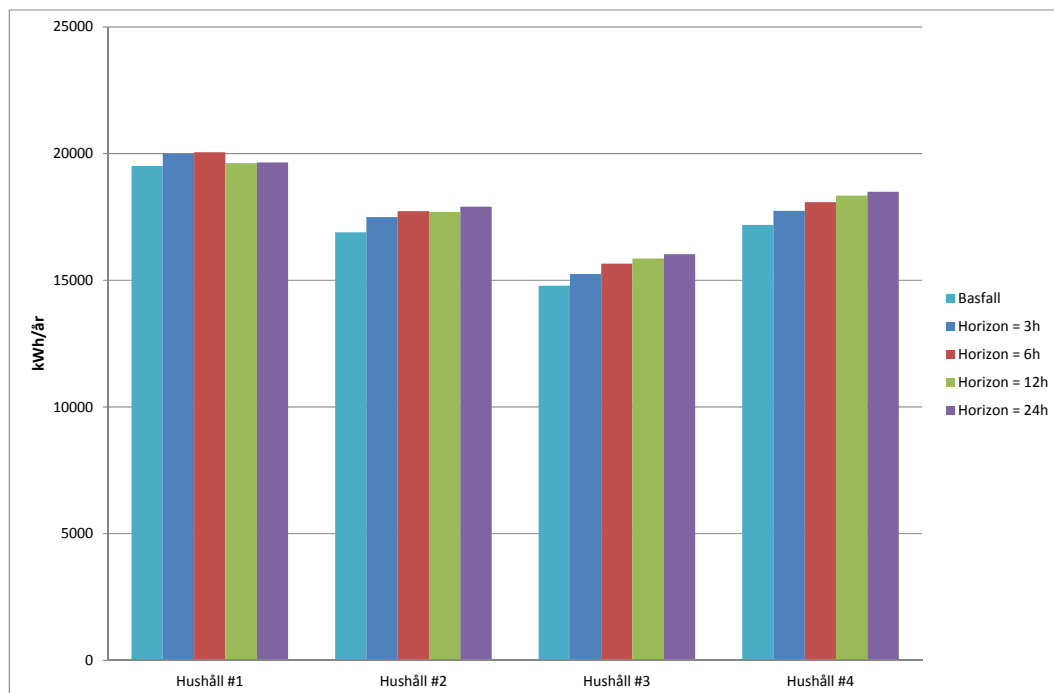
Nedan redovisas resultaten från 2 olika fallstudier. I första fallstudien ingår el- och vattenförbrukning hos 4 olika hushåll. Andra fallstudien fokuserar på hushåll 1 men flyttar det från en 70-talsvilla till en modern villa.

3.1 Metod

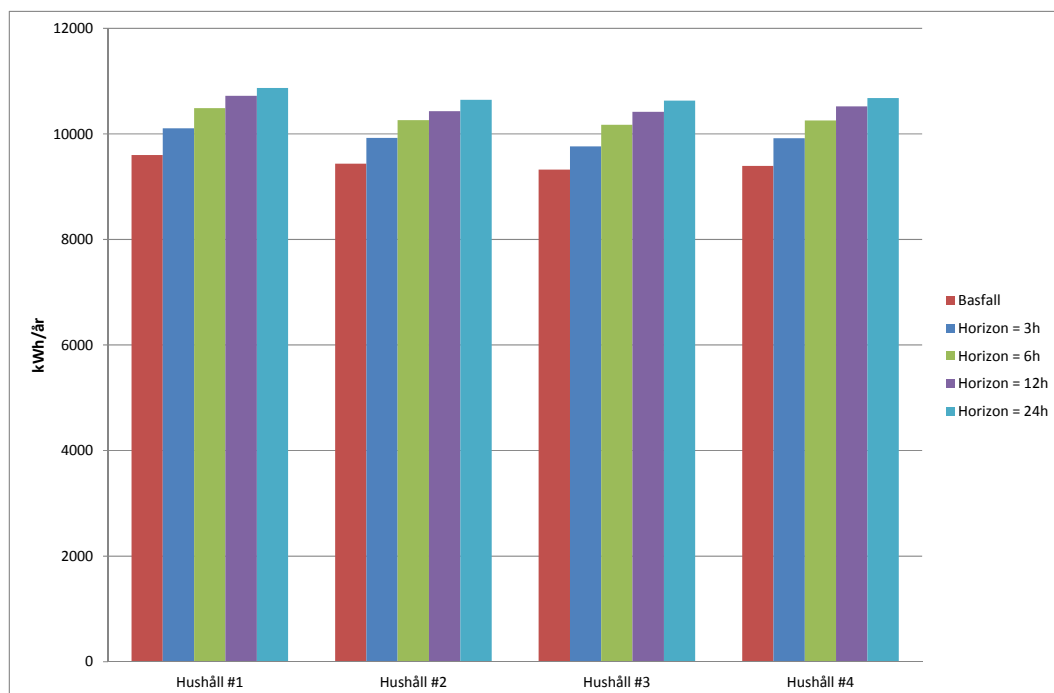
Ovan beskrivna modeller samt metod för laststyrning har byggts samman till en enda modell där utfallet för laststyrning av apparaterna i en hel byggnad kan studeras, se figur 1 ovan samt bilaga.

3.2 Fallstudie 1 – 70-talshus

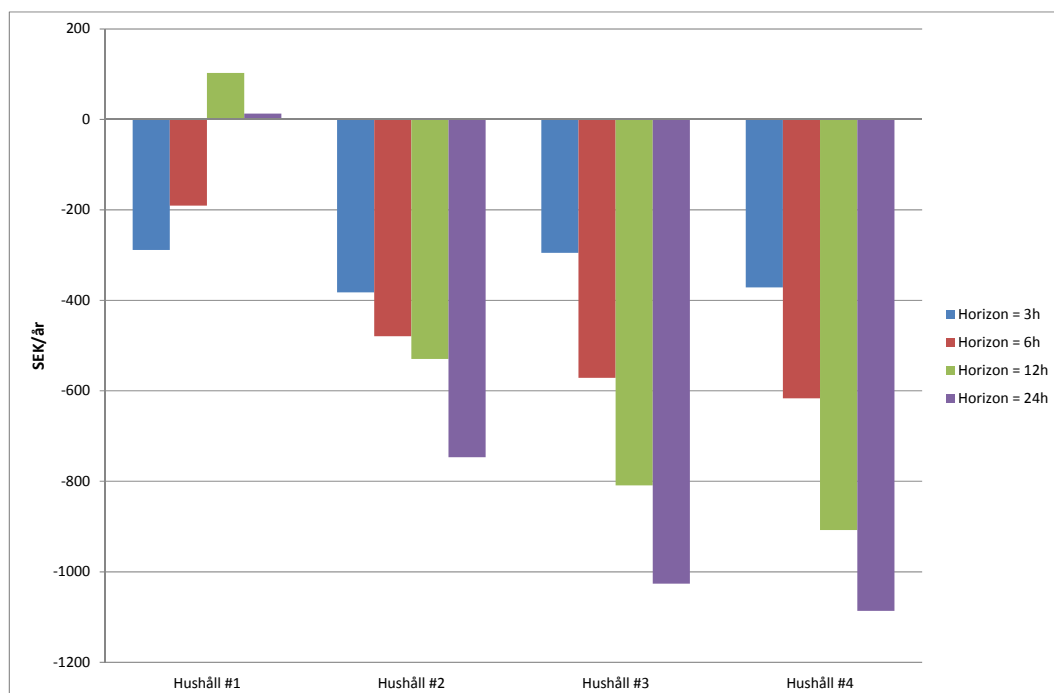
Hushåll 1 – 4 har simulerats under antagandet att de är villor från 70-talet. Indata gällande brukarbeteende, använd tappvattenmängd etc följer studien 400- hushåll beskriven ovan. Hus och uppvärmningssystem är modellerat som ett "typiskt" 70-talshus enligt Tabell 5 ovan. Laststyrningen har genomförts enligt tidigare beskrivning med horizon (dvs tidsförskjutningen) = 3, 6, 12 och 24 timmar. Som framgår av Figur 7 nedan innebär den föreslagna metoden för laststyrning ingen energibesparing för de fyra hushållen. Till stor del beror detta på att energianvändningen för uppvärmning ökar, se Figur 8. Energianvändningen ökar pga att drifttimmar flyttas från värmepumpen till elradiatorn. Syftet med metoden är inte i första hand att spara energi utan att sänka kostnaden. Hur föll det ut? Som framgår av Figur 9 föll det inte väl ut. Den ökade energianvändningen leder också i de flesta fall till en ökad kostnad. Endast i ett fall leder det till en besparing som dock är blygsam på 103 SEK/år. Anledningen till detta är att variationen i elpris varierar för lite för att kompensera för den ökade energianvändningen. Figur 10 visar ett histogram över elpriset för hushåll 1. Priset varierar väldigt lite och som mest skiljer det ca 1.2 SEK mellan högsta och lägsta pris över året.



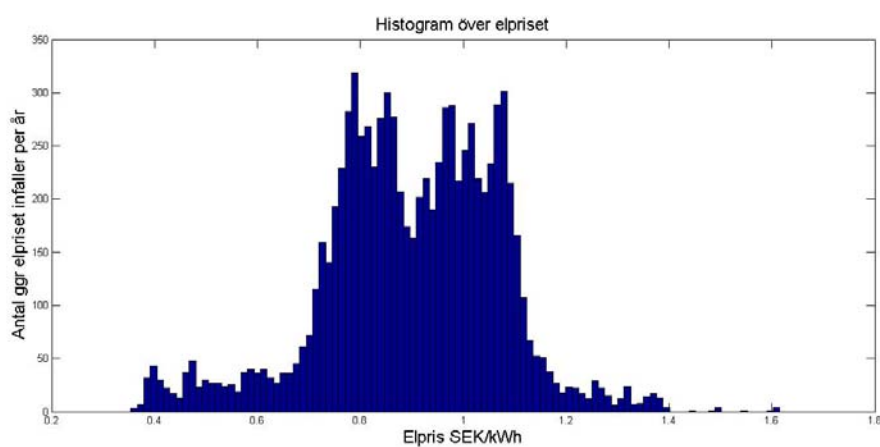
Figur 7, Hushållens totala energianvändning



Figur 8, Energianvändning för uppvärmning



Figur 9, Hushållens totala ekonomiska besparing



Figur 10, Elprisets variation över året

3.2.1 Fokus på uppvärmningssystemet

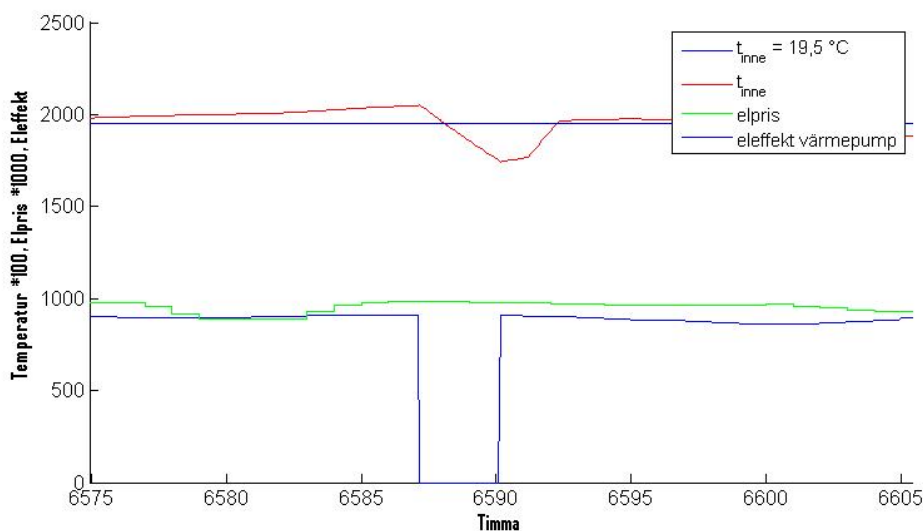
Apparaterna analyseras i avsnitt 3.4 nedan. Nedan följer en fördjupad analys på energianvändning och inomhustemperatur för hushåll 1. Principen är densamma för alla hushållen. Den metod för laststyrning som använts i detta arbete innebär att energi sparas på värmepumpsdriften men det leder endast till att rumstemperaturen sjunker till en nivå som innebär att även elradiatorn kommer att starta då detta tillåts. Det medför en totalt sett ökad energiförbrukning och en ökad kostnad pga den lilla skillnaden i elpris. Komforten inomhus blir försämrad. Framförallt lägsta inomhustemperaturen

är väldigt låg. I detta arbete har vi inte lagt in en undre gräns vid vilken laststyrningen förbikopplas för att garantera en minimikomfort men det är fullt möjligt att göra. Resultaten sammanfattas i Tabell 7 nedan.

Tabell 7 Energianvändning och temperaturer för olika tidsförskjutningar

Horizon	0	3	6	12	24
Årlig energianvändning, elradiator [kWh]	2 217	2 968	3 600	4 180	4 465
Årlig energianvändning, värmepump [kWh]	7 382	7 138	6 888	6 542	6 404
Årlig kostnad för uppvärmning [SEK]	8 885	9 245	9 542	9 788	9 939
Kostnadsbesparing [SEK]	-	-360	-657	-903	-1 054
Medeltemperatur inomhus [°C]	19,5	19,4	19,1	18,6	18,4
Min temperatur inomhus [°C]	18,4	17,3	14,8	12,3	12,3

Figur 11 nedan visar på ett exempel över en lastförskjutning. Vid timmen 6588 vill värmepumpen starta eftersom rumstemperaturen går under 19,5 °C. Detta kontrolleras av modellen för lastförflyttning. I detta fall är horizon = 3 och då analyseras elpriset för timma 6588, 6589 samt 6590. Elpriset är lägst för timma 6590 och därför förskjuts starten av värmepumpen till denna timma. Konsekvensen av detta är att rumstemperaturen hinner falla till 17,4 °C.

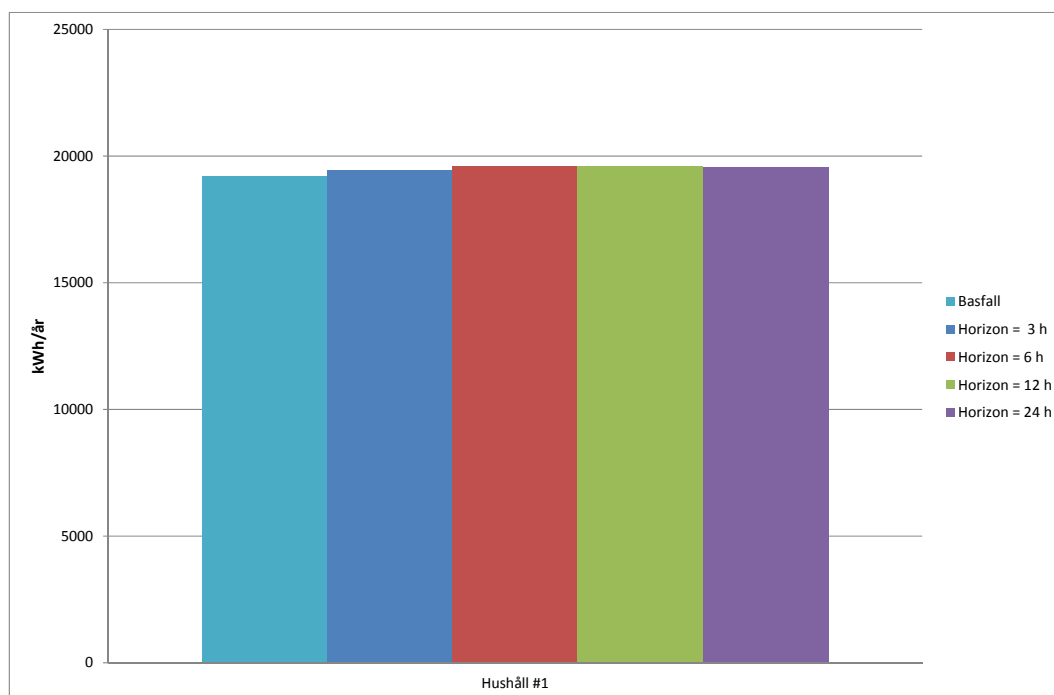


Figur 11, Exempel på lastförflyttning och konsekvens för inomhustemperatur. Horison = 3.

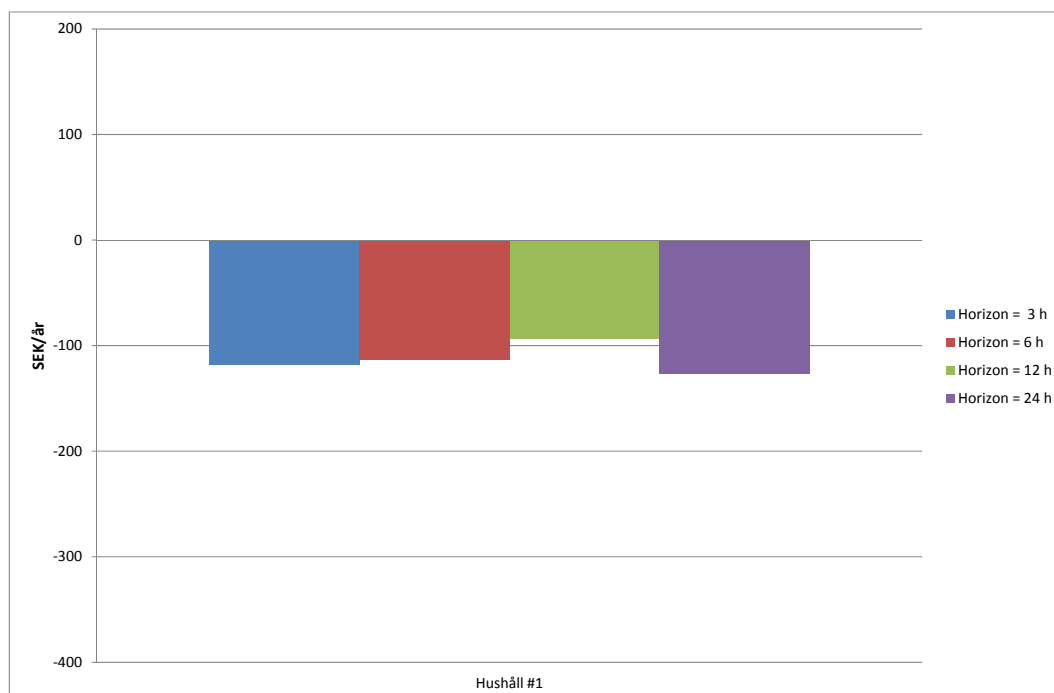
3.3 Fallstudie 2 – modern villa

Hushåll 1 har simulerats under antagandet att det är en modern villa med indata enligt Tabell 5 ovan. Huset är mer välisolerat och har större tröghet. Indata gällande brukarbeteende, använd tappvattenmängd etc följer studien 400- hushåll beskriven ovan. Laststyrningen har genomförts enligt tidigare beskrivning med horizon (dvs tidsförskjutningen) = 3, 6, 12 och 24 timmar.

Resultaten sammanfattas i Figur 12, Figur 13 och Tabell 8 nedan. Total sett drar den moderna villan något mindre energi än 70-talsvillan. Den moderna villan använder mindre energi för uppvärmning, vilket leder till att den potentiella besparingen blir lägre vilket visar sig i Tabell 8. I och med att huset är mer välisolerat blir inte den lägsta inomhustemperaturen lika låg. Ur komfortsynpunkt blir det enklare att åstadkomma lastförskjutning i en tung byggnad än i en lätt (vilket är helt enligt vad man kan förvänta sig).



Figur 12, Totala energianvändningen för hushåll 1, modern villa



Figur 13, Besparing i förhållande till basfallet, modern villa

Tabell 8 Energianvändning och temperaturer för olika lastförskjutningar för den moderna villan

Horizon	0	3	6	12	24
Årlig energianvändning, elradiator [kWh]	1 956	2 364	3 099	4 187	4 349
Årlig energianvändning, värmepump [kWh]	7 322	7 180	6 934	6 499	6 431
Årlig kostnad för uppvärmning [SEK]	8 585	8 774	9 165	9 683	9 778
Kostnadsbesparing [SEK]	-	-190	-581	-1 099	-1 194
Medeltemperatur inomhus [°C]	19,6	19,4	19,3	18,9	18,8
Min temperatur inomhus [°C]	18,5	18,0	16,4	14,6	14,6

3.4 Potentialstudier av apparater

I detta avsnitt presenteras resultatet av potentialstudier för laststyrningen av hushållsapparater, som har genomförts med hjälp av simuleringsmiljön. I samtliga fall har fyra olika värden på parametern **Horizon** använts; 3, 6, 12 och 24 h och jämförts med ett basfall där laststyrning inte används.

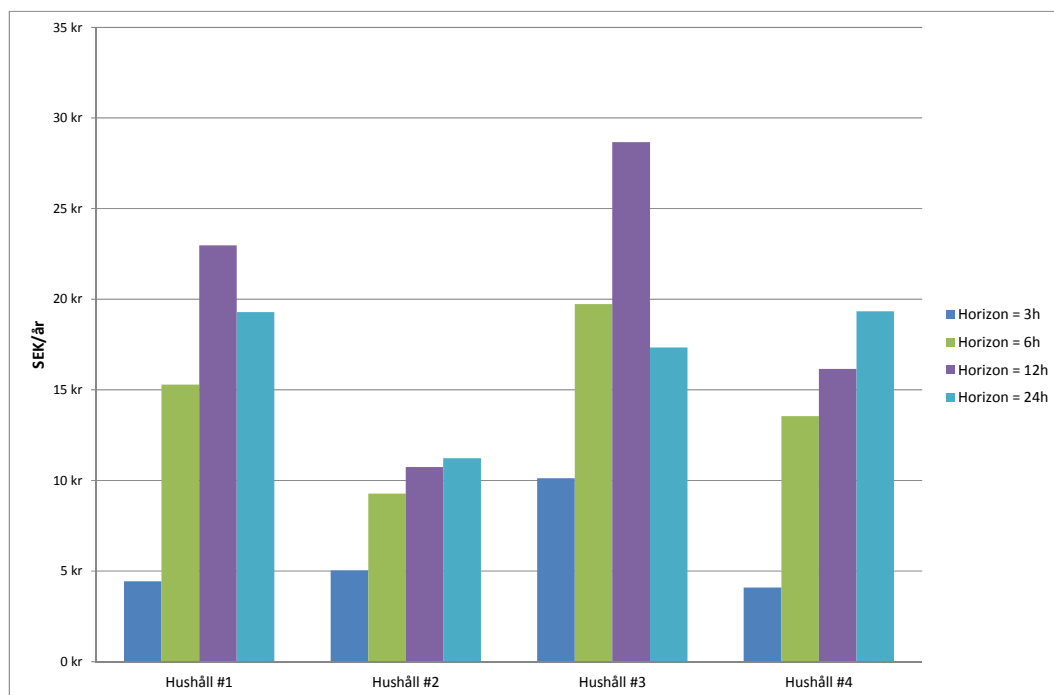
Analysen har genomförts genom att energianvändningen och kostnaden för elektricitet för olika apparater har relaterats till en levererad komfortnivå (temperatur på varmvatten och inomhusluft). Data för de fyra hushåll som

studerats har haft lite olika längd och varierat mellan 357 och 365 dagar. Detta skall beaktas vid tolkningen av resultaten nedan. Resultaten från simuleringarna presenteras i figurform i Bilaga 2.

3.4.1 Diskmaskin, tvättmaskin och torktumlare

När apparaterna diskmaskin, tvättmaskin och torktumlare simuleras uppstår en skillnad i energianvändning mellan basfallet och fallen med laststyrning. Denna skillnad är som mest 1.9 % och beror på att i basfallet finns tomgångsförluster mellan apparatcykler, vilka inte följer med när cykler flyttas i tiden (för fallen med laststyrning).

Simuleringarna antyder att den ekonomiska besparingspotentialen i absoluta tal (kr/år) för fördröjda starttider hos diskmaskin, tvättmaskin och torktumlare är låg. Störst besparingspotential finns hos diskmaskinen, se Figur 14 nedan (se Bilaga 2 för motsvarande figurer för tvättmaskin och torktumlare).



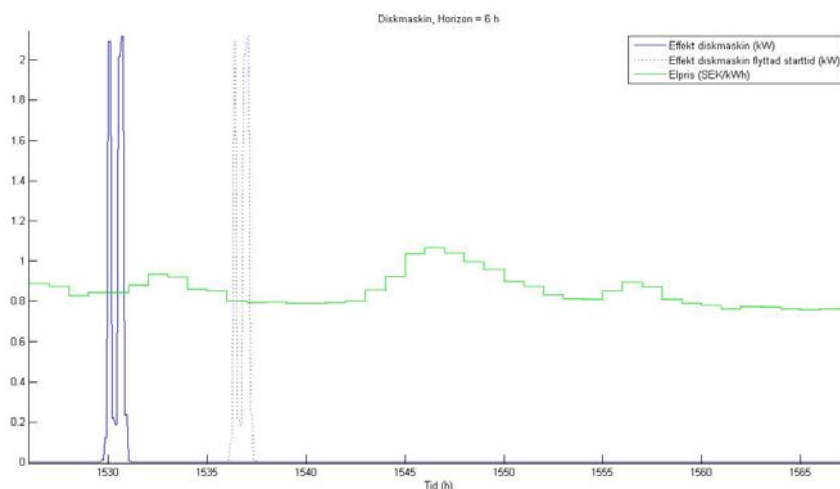
Figur 14, Besparingspotential med fördröjd starttid för diskmaskin

Dock är besparingspotentialen i procent jämfört med driftskostnaden för basfallet intressant. För diskmaskinen varierar besparingen mellan 1.7 och 10.3 % beroende på hushåll och värdet på parametern **Horizon**. Tabell 9 nedan sammanfattar de relativa besparingarna.

I simuleringarna har ingen hänsyn tagits till levererad komfort för diskmaskinen, tvättmaskinen och torktumlaren. Dessa apparater har tillåtits att starta oberoende av varandra och oberoende av när det kan anses lämpligt att starta dem ur en praktisk synpunkt.

Tabell 9, Relativ kostnadsbesparing för diskmaskin, tvättmaskin och torktumlare

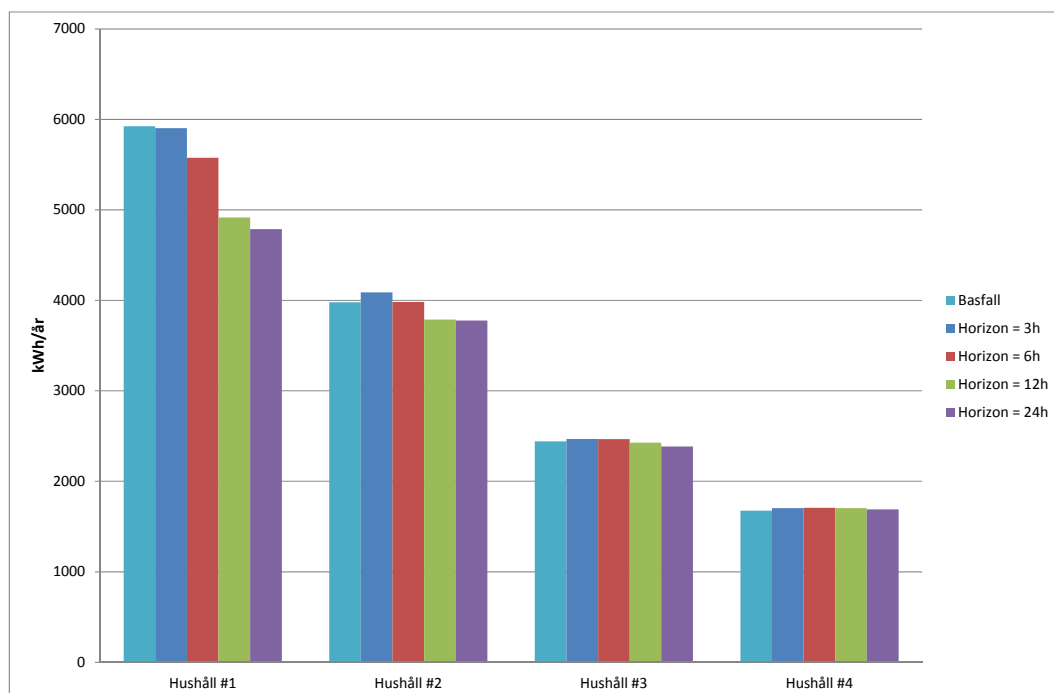
Apparat	Hushåll #	Horizon = 3h	Horizon = 6h	Horizon = 12h	Horizon = 24h
Diskmaskin	1	1,7%	5,9%	8,8%	7,4%
	2	3,0%	5,5%	6,3%	6,6%
	3	2,5%	5,0%	7,2%	4,4%
	4	2,2%	7,2%	8,6%	10,3%
Tvättmaskin	1	0,7%	1,6%	4,6%	3,2%
	2	2,0%	3,1%	3,9%	3,7%
	3	1,4%	2,2%	3,8%	2,4%
	4	0,1%	2,0%	4,8%	7,7%
Torktumlare	1	0,1%	3,0%	4,8%	3,0%
	2	-0,4%	0,4%	1,1%	3,9%
	3	1,2%	2,2%	4,0%	2,9%
	4	1,6%	3,4%	7,9%	7,1%



Figur 15, Diagrammet visar hur starttiden för diskmaskinen förskjuts till en timma med lägre elpris

3.4.2 Varmvattenberedare

De vattenmätningar som används som indata i simuleringsmiljön, kommer från hushåll med olika vattenförbrukning (se Tabell 6 för information om hushållen). Detta får resultatet att energianvändningen för varmvattenberedaren är olika för de olika hushållen. Alla hushåll har dock antagits ha lika stor beredare. Energianvändningen för varmvattenberedarna presenteras i Figur 16 nedan.

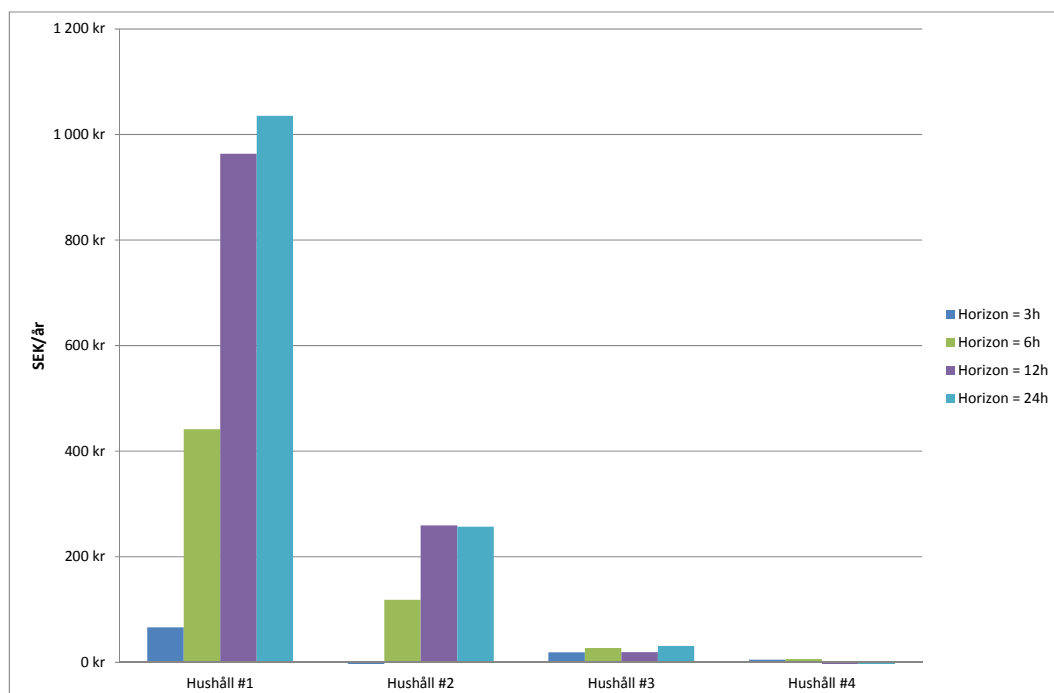


Figur 16, Energianvändning varmvattenberedare

Som synes i Figur 16 så varierar energianvändningen med värdet på **Horizon**, tydligast för hushåll nummer ett och två. Hushåll nummer tre och fyra har mindre variation i energianvändningen. Detta beror på att starttiden fördröjs och därför värms det mindre ju större värdet på **Horizon** är. Detta skulle kunna åtgärdas genom att lägga in ett randvillkor om att vattnet måste värmas direkt om temperaturen går under ett visst värde. Men då beredaren är modellerad som två vattenmassor (en varm och en kallare) så kommer ett sådant randvillkor ofta vara uppfyllt då det fylls på med kallvatten i botten på tanken där temperaturen mäts. Resultatet med rådande modell skall vara att fördröjningen av starttid sällan sker.

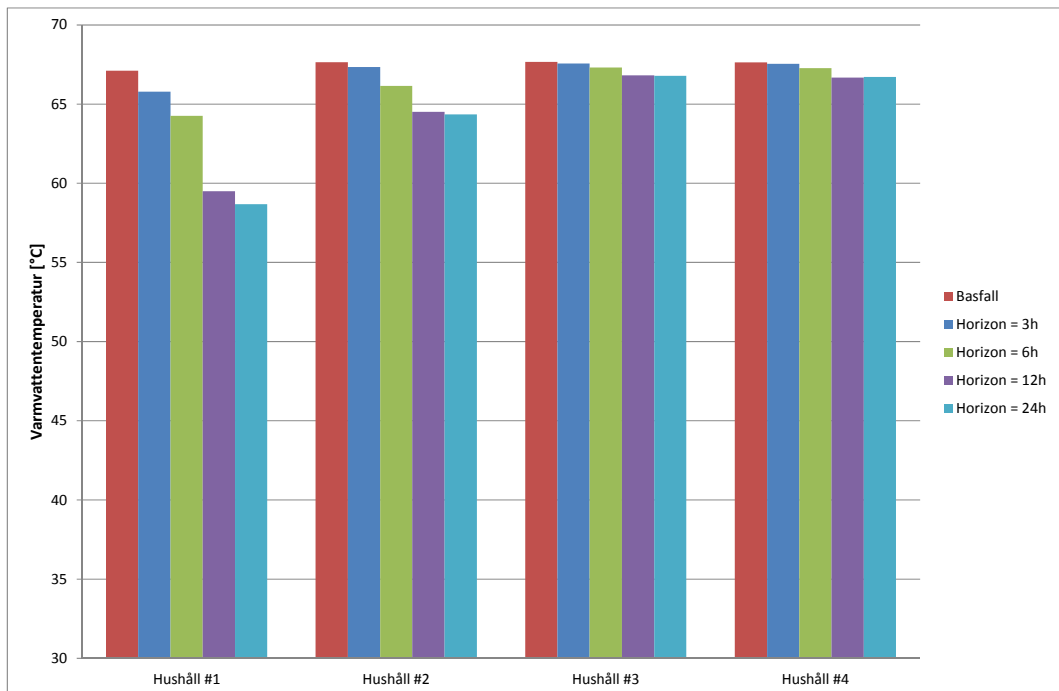
I ett antal fall ökar energianvändningen när starttiden fördröjs (se t ex hushåll nummer två), detta är ett oväntat resultat. En möjlig förklaring ligger i hur modellerna är uppbyggda. Modellen för varmvattenberedarens dynamik är kontinuerlig (tidssteget varierar beroende på hur snabbt tillstånden förändras) medan modellen för fördröjning av starttid är diskret (tidssteget är konstant). Detta medför en fördröjning av termostatfunktionen vilket leder till att elpatronen starttid och stopptid kan vara förskjutna ett par minuter. Detta leder till en längre drifttid hos elpatronen. Dessutom minskar värmeförlusterna i tanken med ökande **Horizon** pga att medeltemperaturen i tanken sjunker. Detta skulle kunna förklara att energianvändningen ökar för **Horizon** = 3 h och sedan minskar med ökande värde på **Horizon**.

I Figur 17 nedan presenteras den ekonomiska besparingspotentialen för varmvattenberedaren.



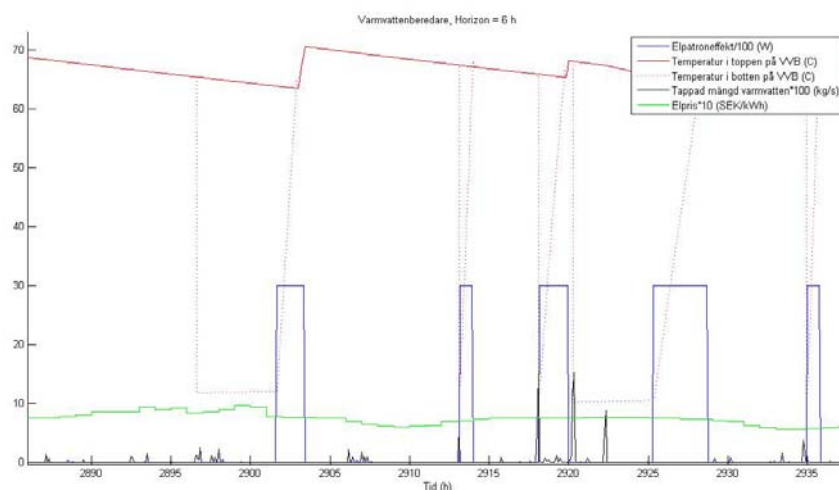
Figur 17, Besparingspotential varmvattenberedare

Att en besparing uppstår beror till stor del på att mindre energi använts, vilket även syns då man studerar medeltemperaturen på varmvattnet som tappas ur beredarna, se Figur 18. Medeltemperaturen minskar med **Horizon**. Detta är extra tydligt för hushåll nummer ett och två.



Figur 18, Medeltemperatur på tappat varmvatten

Intressant att notera är att för de hushåll som har en jämn energianvändning vid olika **Horizon** (hushåll tre och fyra) har också en relativt sett jämn medeltemperatur på varmvattnet. Besparingen för hushåll nummer tre ligger på i storleksordningen 0.9 till 1.4 %.



Figur 19, Diagrammet visar hur start av elberedaren förskjuts till en tid när elpriset är lägre. Den streckade linjen visar temperaturen i botten på beredaren och när den sjunker kraftig vill beredaren starta.

4 Resultat och slutsatser

- I projektet har en simuleringsmiljö för ett hushåll utvecklats. Miljön kan användas för att studera effekterna av olika hushållsapparaters användning. Modellerna i miljön kan anpassas och utvecklas för att studera olika strategier för laststyrning. Simuleringsmiljön har använts för att göra ett par fallstudier och potentialstudier.
- Simuleringarna tyder på att den ekonomiska besparingspotentialen med att fördröja starttiden för varmvattenberedaren är låg (0-1000 SEK/år beroende på hushåll och fördröjning av starttid) mot bakgrund av den elprisdata som använts. Troligtvis är det mer intressant att undersöka strategier för uppvärmning som baseras på när vattenanvändningen sker, t ex genom att tillåta temperaturen att sjunka mitt på dagen (på vardagar) och under natten då inget eller lite vatten används.
- För diskmaskinen, tvättmaskinen och torktumlaren tyder de genomförda studierna på att besparingspotentialen för fördröjd starttid är liten mätt i sparade kronor per år (som mest 28 SEK/år för diskmaskinen vilken var den som uppvisade störst potential). Den relativa besparingen var mellan ca 2-10 % vilket inte obetydlig. Det kan tänkas finnas andra laster som har en liknande karaktäristik (cykellängd och antal cykler per år) men som har en större energianvändning. För sådana laster kan en fördröjd starttid vara intressant.
- För uppvärmningssystemet visar simuleringarna inte på någon besparing alls, utom tvärtom leder nuvarande strategi för laststyrning till en ökad driftkostnad. Metoden för laststyrning behöver förändras och skillnaderna i tariffer måste bli större om det ska bli lönsamt.
- Strategin att fördröja starttid för apparater är en enkel ansats. För apparater med kort cykeltid (ca en timme) kan den ha betydelse. Om apparatens cykeltid är längre (ett par timmar) är det inte bara starttidens elpris som spelar roll, utan elpriset under hela cykeln.

4.1 Förslag till fortsatt arbete

- Verifiering och utökning av apparatmodeller (framförallt varmvattenberedare, uppvärmningssystem och byggnad) mot verkliga data, med syftet att öka precisionen i modellerna.
- Studier av andra strategier för laststyrning, t ex;
 - Ta hänsyn till elpriset under en hel apparatcykel och inte bara elpriset vid starttiden
 - Strategier som minimerar energianvändning vid låg efterfrågan på apparatens funktion, t ex minimera uppvärmning då ingen är hemma

- Strategier för att minimera miljöpåverkan vid elanvändningen, dvs flytta förbrukning till tillfällen med större andel förnybar el i systemet.
- Studera andra typer av uppvärmningssystem och andra typer av hus
- Inkludera fler laster såsom t ex elfordon som laddas hemma
- Inkludera egenproduktion (t ex solpaneler eller solceller)
- Skala upp resultatet till hela bostadsområden

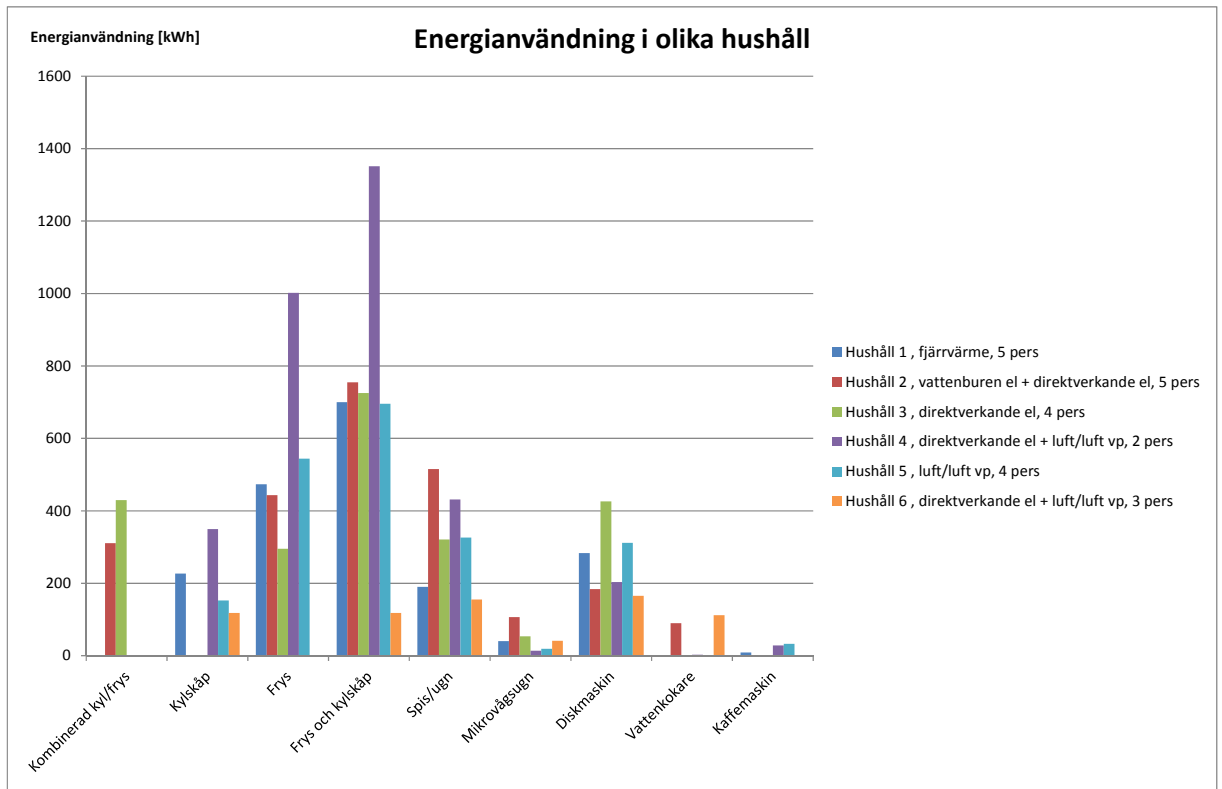
5 Referenser

Zimmermann, Jean Paul, 2009. *End-use metering campaign in 400 households in Sweden – Assessment of the Potential Electricity Savings*, Energimyndigheten.

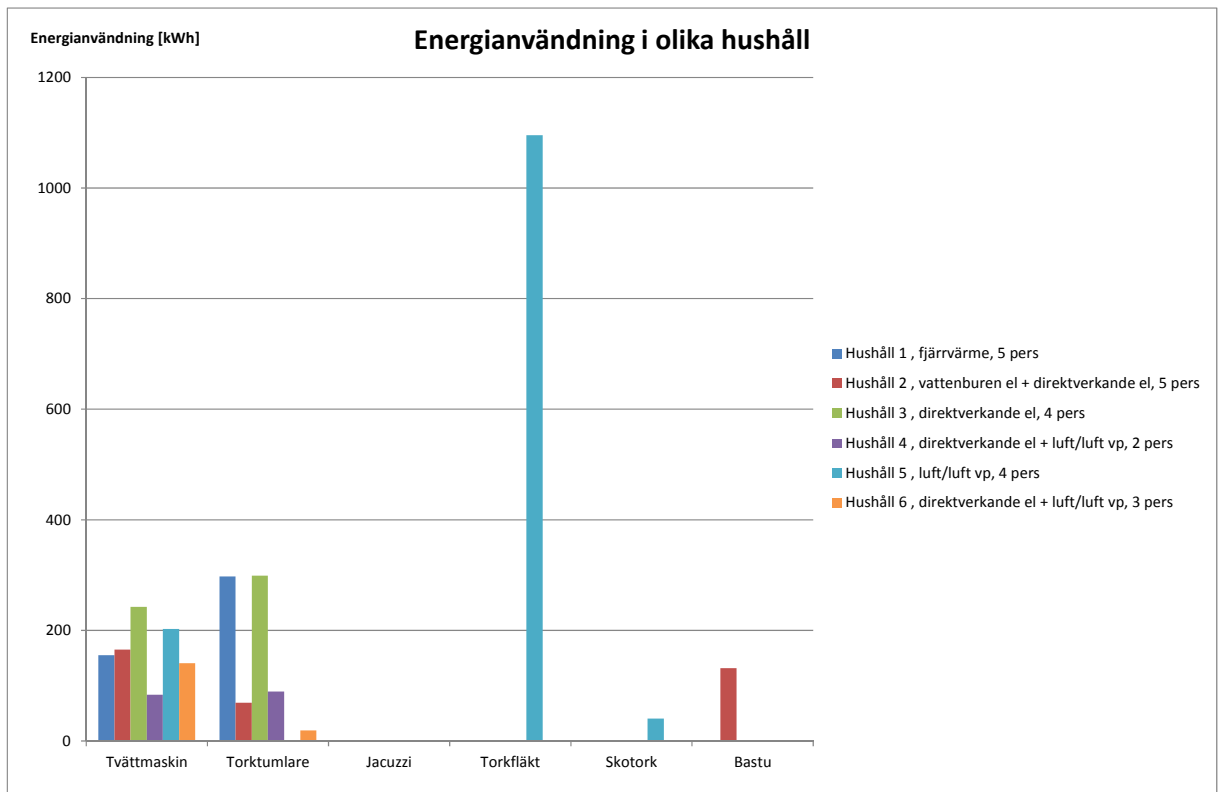
Wahlström et al., 2008, *Mätning av kall- och varmvatten i tio hushåll*, Energimyndigheten (ER 2008:14)

Energimyndigheten, 2009. *Mätning av kall- och varmvattenanvändning i 44 hushåll*, Energimyndigheten (ER 2009:26)

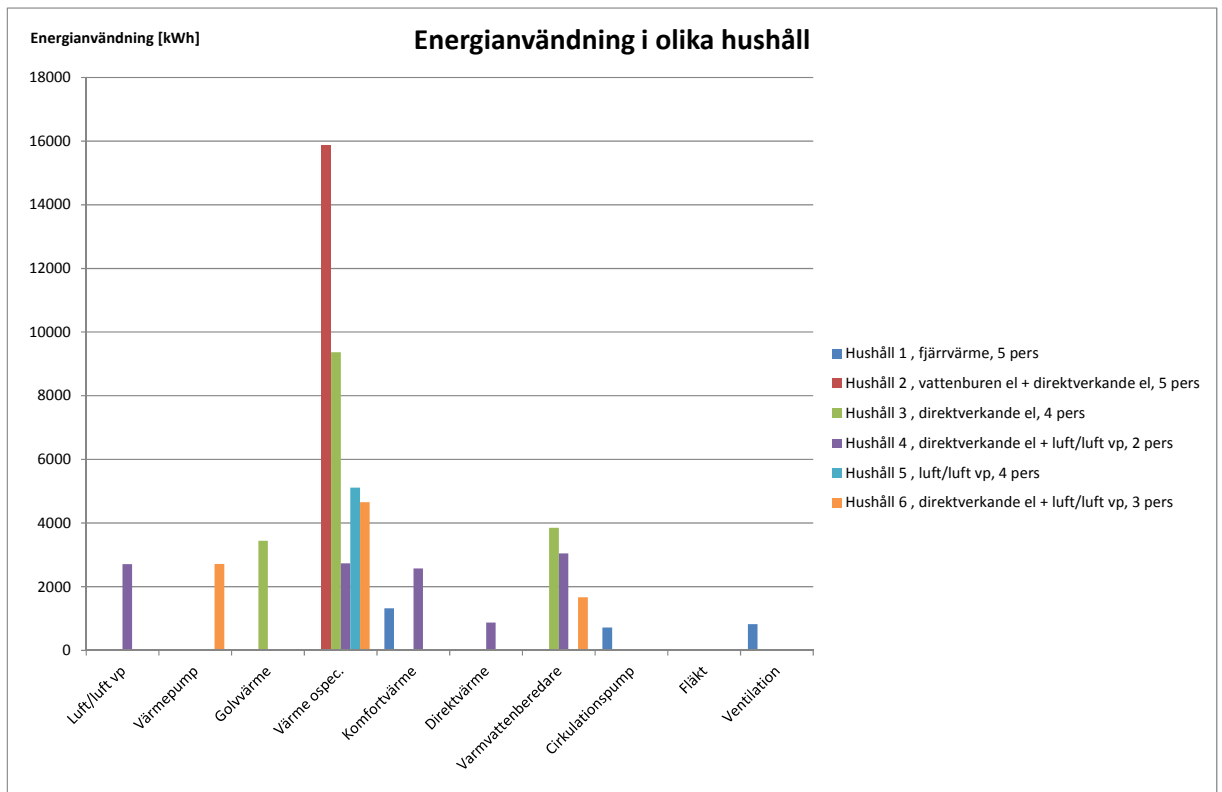
Bilaga 1, Energianvändningen i olika hushåll



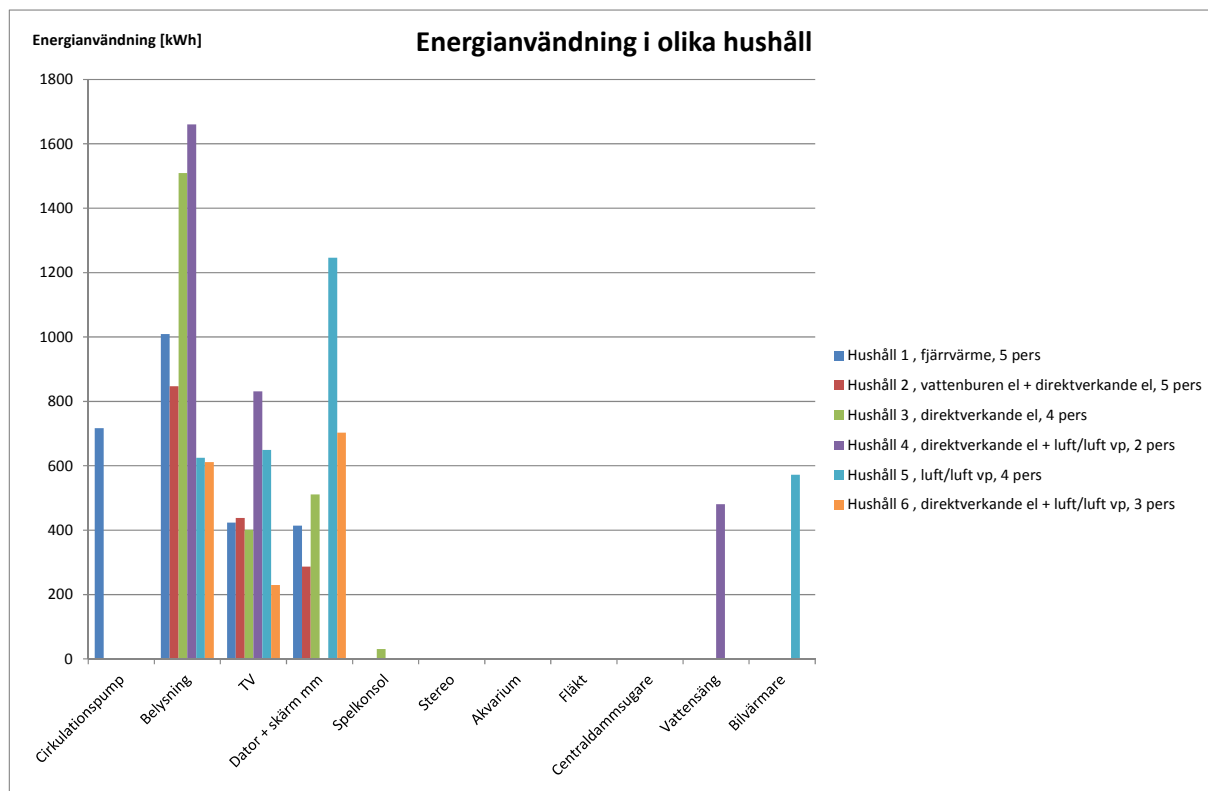
Figur 20, Energianvändning för olika apparater i olika hushåll



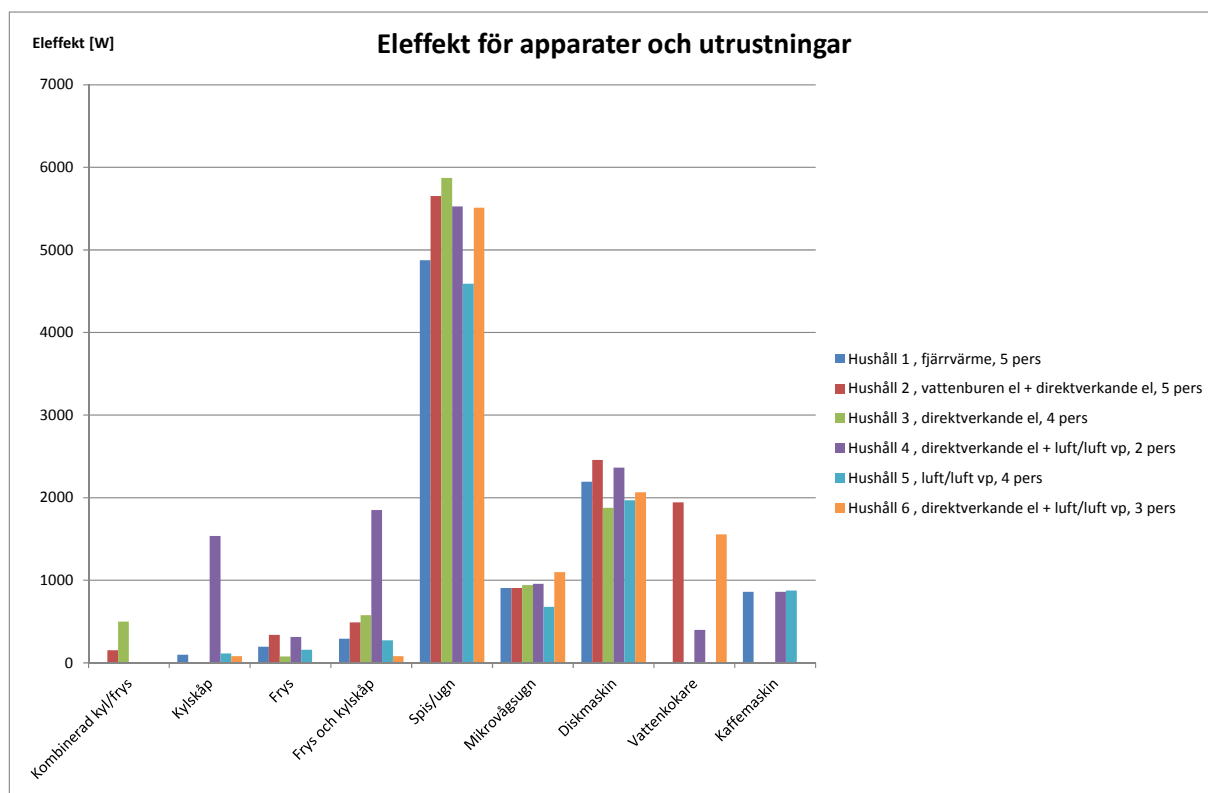
Figur 21, Energianvändning för olika apparater i olika hushåll



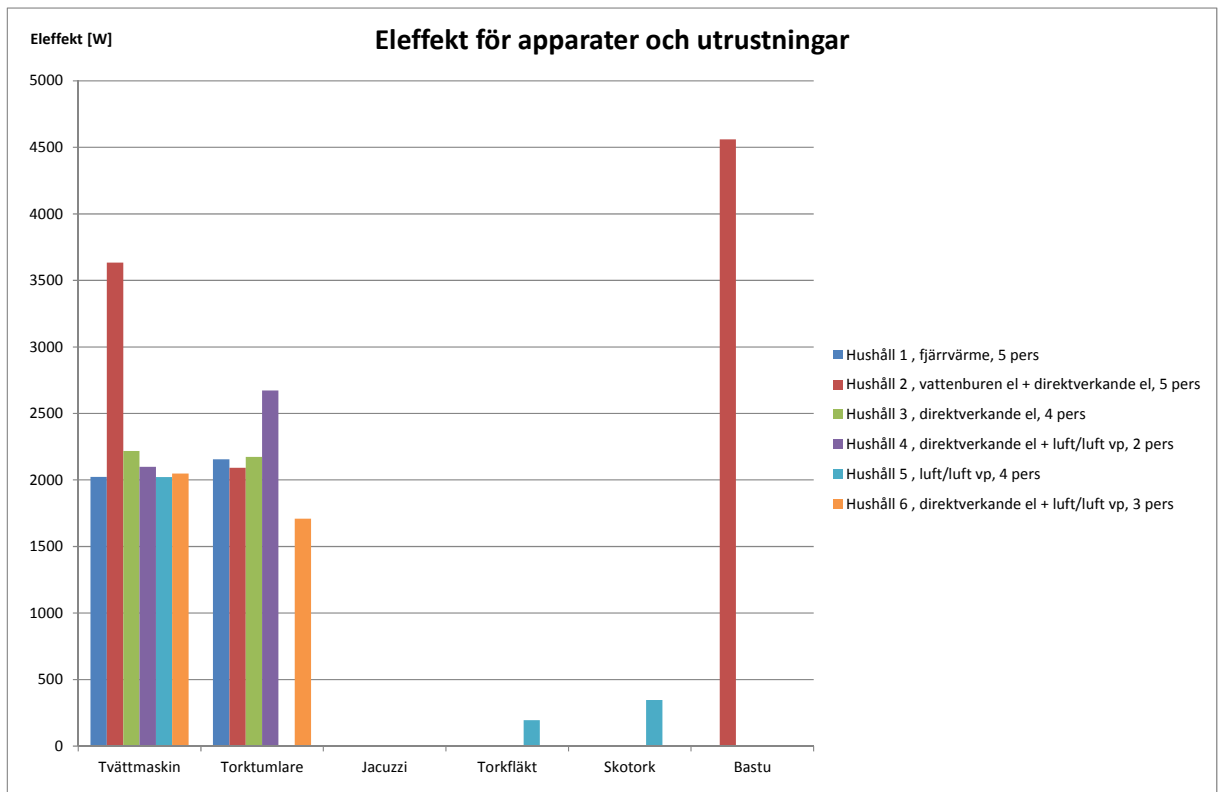
Figur 22, Energianvändning för olika apparater i olika hushåll



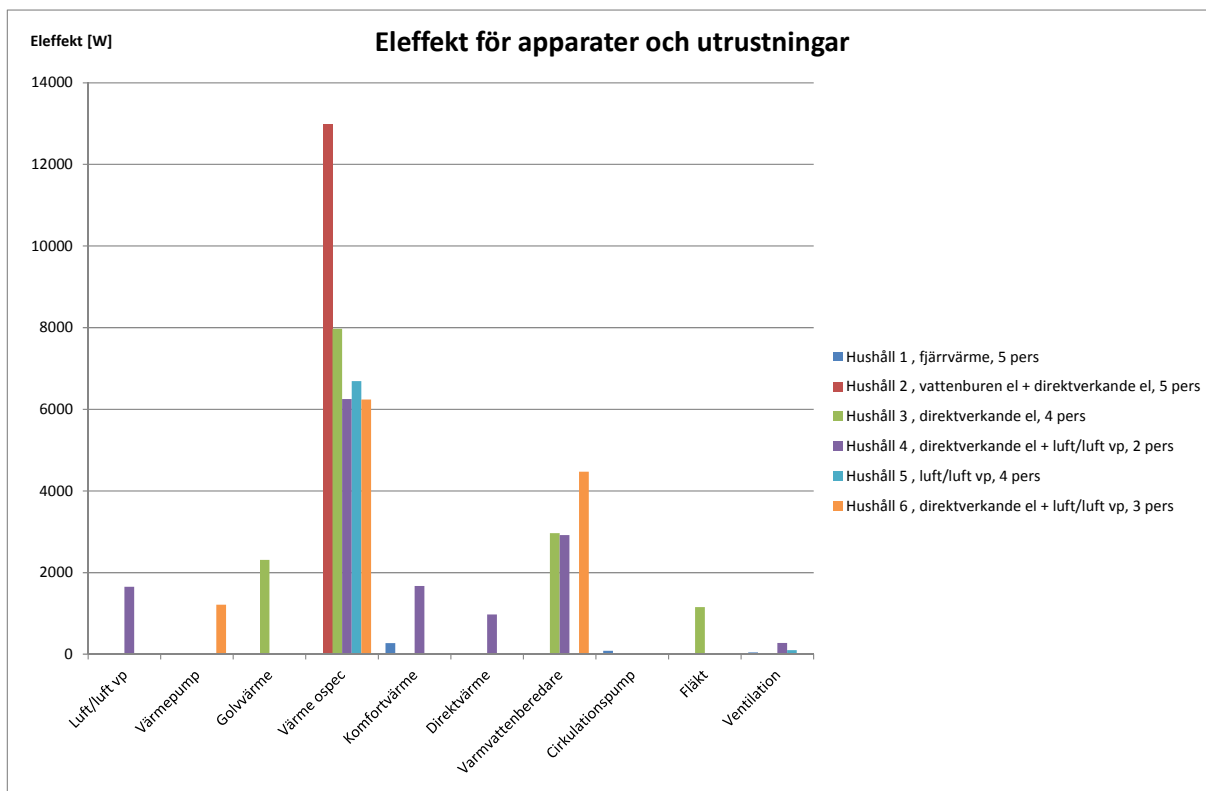
Figur 23, Energianvändning för olika apparater i olika hushåll



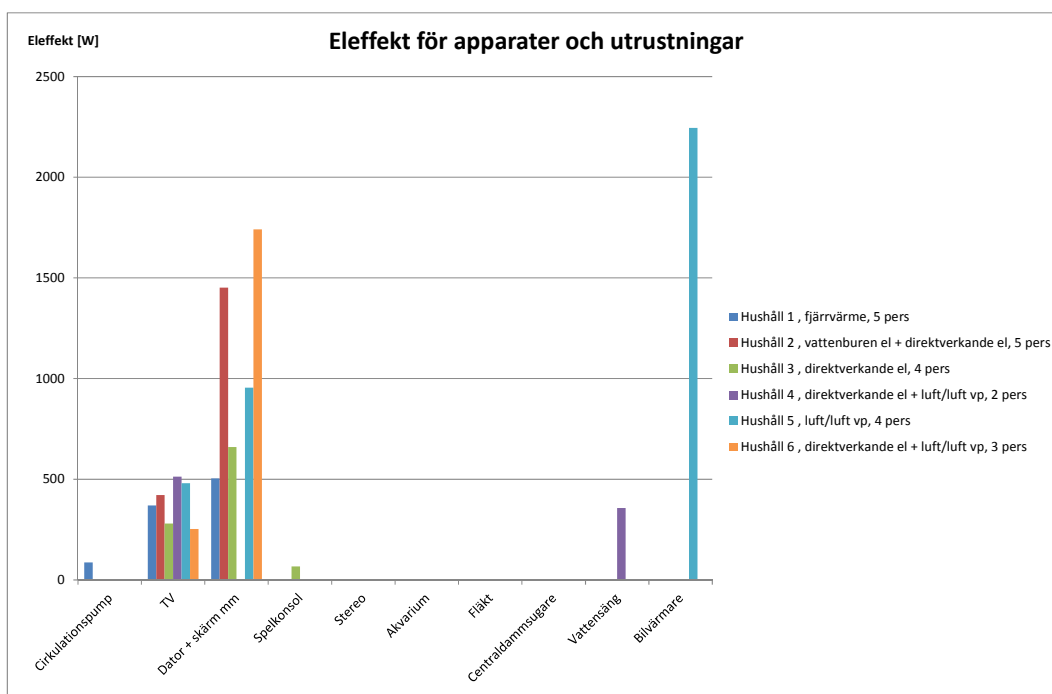
Figur 24, Effekt för olika apparater i olika hushåll



Figur 25, Effekt för olika apparater i olika hushåll

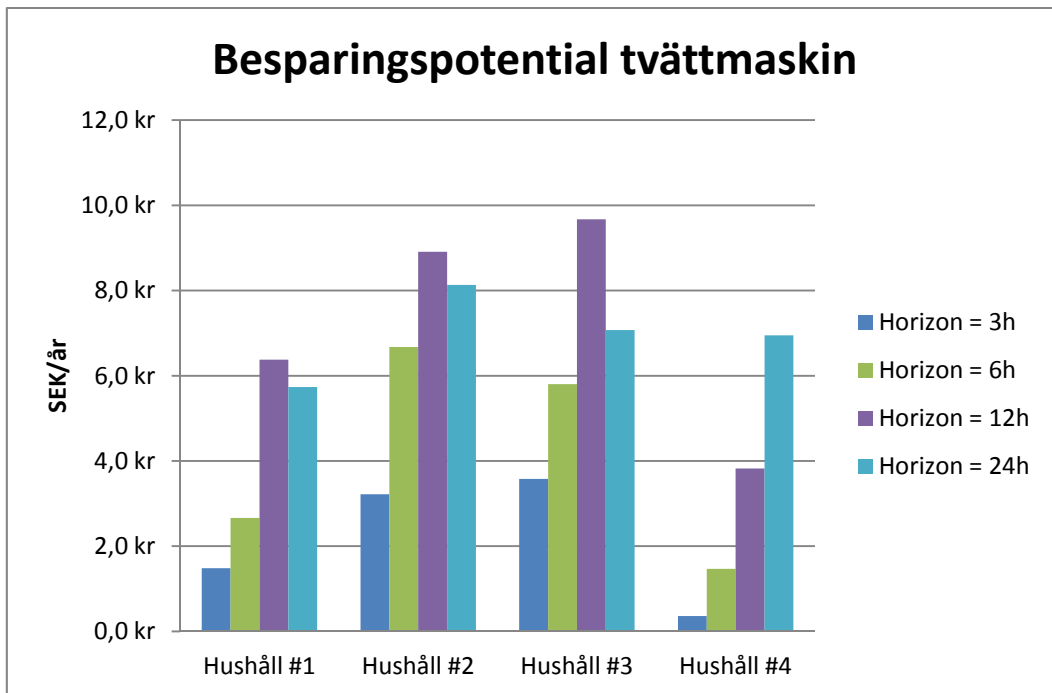


Figur 26, Effekt för olika apparater i olika hushåll

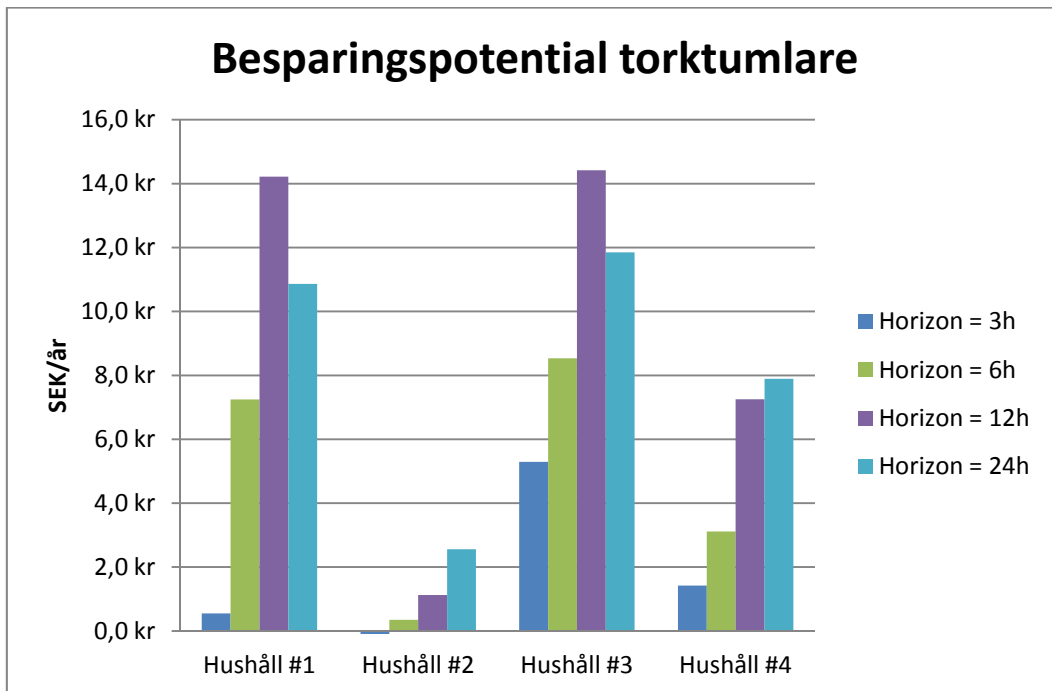


Figur 27, Effekt för olika apparater i olika hushåll

Bilaga 2, Simuleringsresultat från potentialstudier för hushållsapparater



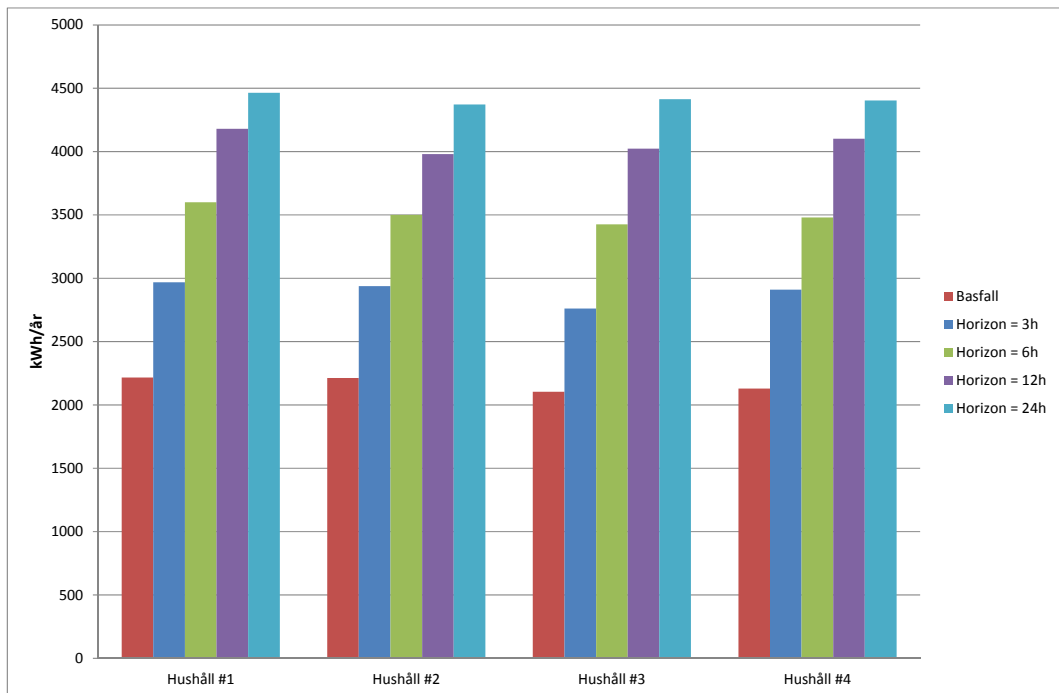
Figur 28, Besparingspotential med fördröjd starttid för tvättmaskin



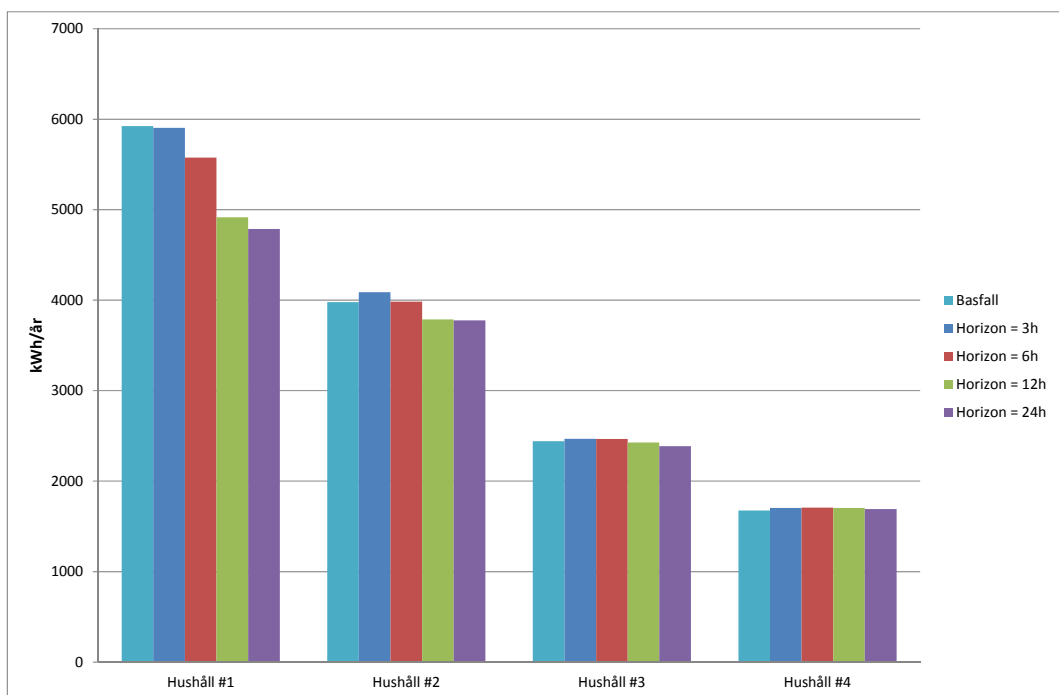
Figur 29, Besparingspotential med fördröjd starttid för torktumlare



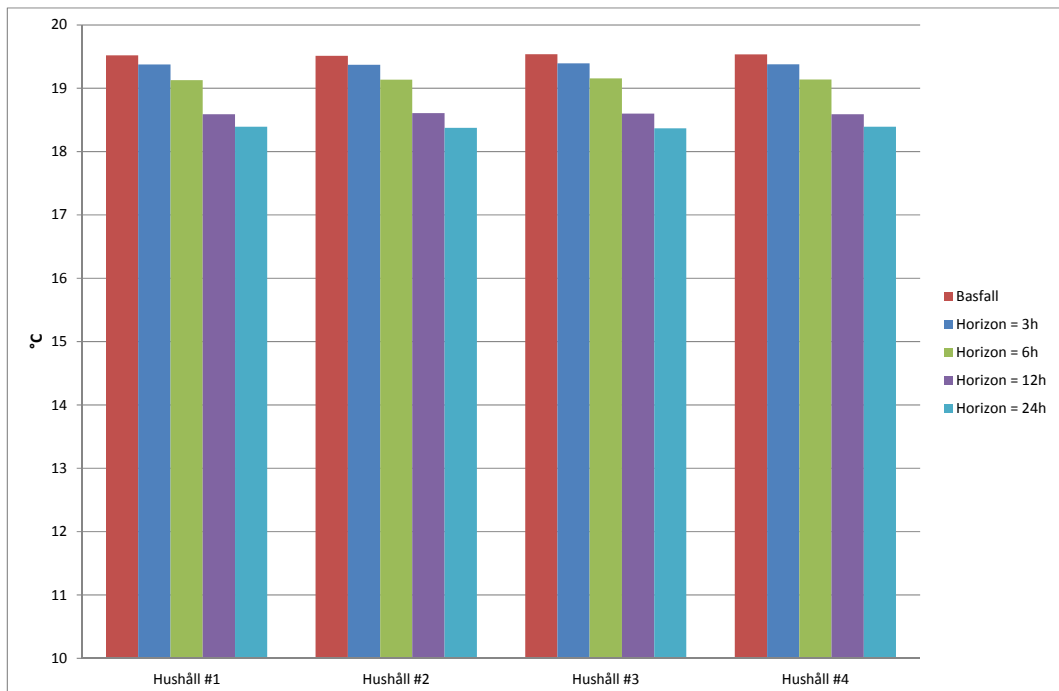
Figur 30, Energianvändning luft/luft-värmepump



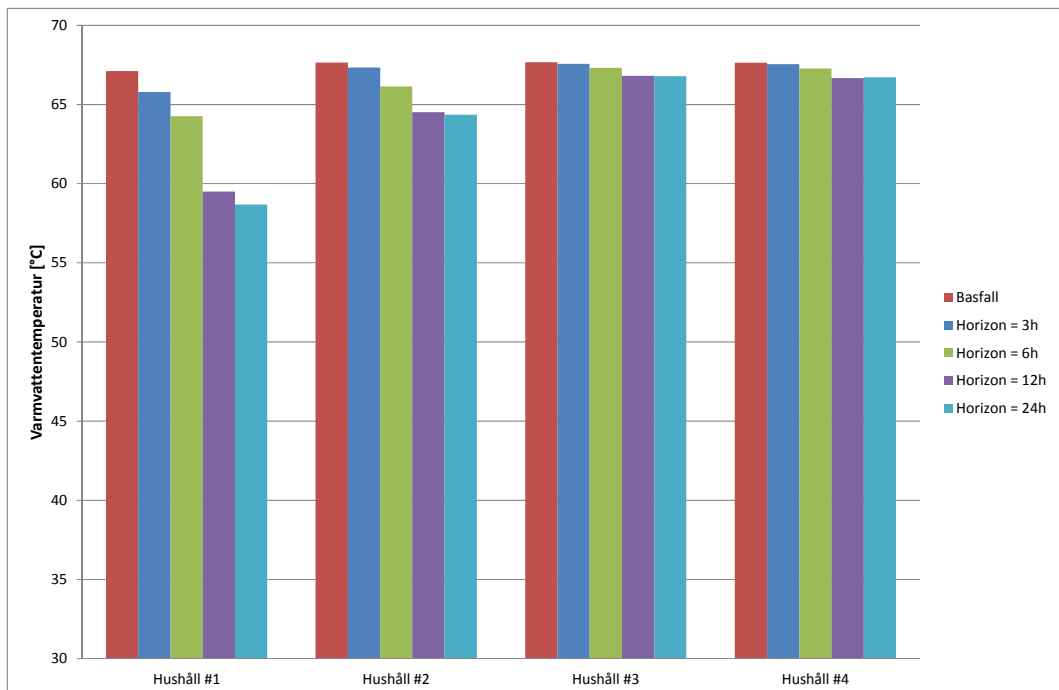
Figur 31, Energianvändning elradiator



Figur 32, Energianvändning varmvattenberedare



Figur 33, Medeltemperatur hos inomhusluften



Figur 34, Medeltemperatur hos varmvattnet i beredaren

Bilaga 3, Simuleringsmiljö Active Demand

Systemmodell

Systemmodellen består utav följande delmodeller:

- Det finns två systemmodeller En husmodell som ger temperaturen inomhus som funktion av tillförd värmeeffekt och utomhustemperatur
- Elradiator
- Luft/luft-värmepump
- Varmvattenberedardmodell som ger temperatur på tappvarmvatten som funktion av tillförd eleffekt, värmeförluster och tappning av vatten
- Tvättmaskin (effekt som funktion av tid)
- Torktumlare (effekt som funktion av tid)
- Diskmaskin (effekt som funktion av tid)

Integration_environment som används för att simulera basfallen (utan laststyrning) och **Integration_environment_delay** som har ett block där laststyrningen implementeras.

Indata

Storhet	Sort	Kommentar
Tappad mängd varmvatten	Liter/5 minuter	Räknas i modellen om till kg/s
Energianvändning hos apparater	Wh/10 minuter	Räknas i initieringen om till en medeleffekt (W) under 10 minuter
Elpris	SEK/kWh, h	
Utomhustemperatur	°C	
Parametrar som beskriver varmvattenberedaren (dimensioner etc.)		Se skript SimMainSystem.m

Utdata

Storhet	Sort	Namn på data- struktur	Kommentar
Massflöde och temperatur över tid på hetvatten	°C respektive kg/s	<i>SimHotWater</i>	Vatten som tappas från tanken (innan blandningsventil)
Massflöde och temperatur över tid på tappvarmvatten	°C respektive kg/s	<i>SimTapWater</i>	Vatten vid tappstället (efter blandningsventil)
Effektanvändning över tid för apparater i hushållet	W	<i>PowerUse</i>	
Inomhustemperatur, transmissions- och ventilationsförluster	°C respektive kWh	<i>HouseModelOutput</i>	

Användning

Simuleringsmiljön styrs genom ett antal skript (paket med kod) som initierar indata och genomför beräkningar baserat på utdata. I tabellen nedan ges en översikt av dessa skript.

Skript	Funktion
Make_Indata.m	Konstruerar indata till simuleringsmiljön baserat på uppmätta data såsom elpris, vattenanvändning och elanvändning.
SimMainSystem.m	Parametersätter modellerna i simuleringsmiljön, kör simuleringsmiljön och sparar utdata
GetSCstates.m	En funktion som <i>SimMainSystem.m</i> anropar för att generera effektkurvor för fördröjd starttid för diskmaskin, tvättmaskin och torktumlare
MapDelay.m	En funktion som <i>SimMainSystem.m</i> anropar för att göra en tabell över fördröjningen av starttider som funktion av <i>Horizon</i> och elpris
PlotResults.m	Genomför beräkningar och tar fram grafer baserat på simuleringsresultaten

I respektive skript som ingår i simuleringsmiljön kan användaren själv ange vilket hushåll som skall simuleras samt även ändra värden på parametrar. Instruktioner finns i respektive skript (se grön text).

För att genomföra en simulering görs följande:

1. Välj vilket hushåll som skall simuleras (1 – 4) i *SimMainSystem.m*
2. Kör *SimMainSystem.m*
3. Kör *PlotResults.m*

I skriptet MakeIndata.m finns möjlighet att ändra indata, t ex elpris. Se tabell ovan för vilken tidsupplösning som de olika indata använder.