

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Flexibelt energisystem genom samverkan mellan fjärrvärmesystem, elsystem och industri	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Flexible energy system - interactions between industry, DH and power sector	
Universitet/högskola/företag Linköpings universitet	Avdelning/institution Energisystem
Adress 581 83 Linköping	
Namn på projektledare Maria Johansson	
Namn på ev övriga projektdeltagare Danica Djuric Ilic, Igor Cruz	
Nyckelord: 5-7 st Elmarknad, Flexibilitet, Industri, Fjärrvärmesystem, Elsystem, Överskottsvärme, Intermittent elproduktion	

Förord

Denna rapport är en slutrapport för projektet ” Flexibelt energisystem genom samverkan mellan fjärrvärmesystem, elsystem och industri” och sammanfattar projektet och dess resultat. Projektet har finansierats av Energimyndigheten via den tredje utlysningen inom programmet TERMO under perioden 2019–2022.

Projektet har utförts av docent Maria Johansson (projektledare), tekn. dr Danica Djuric Ilic, och doktorand Igor Cruz.

Ett stort tack till alla de företag och företagsrepresentanter som deltagit i intervjuer och på andra sätt bidragit med information om sina arbetssätt, synsätt och förhållningssätt och på så sätt givit oss tillgång till det underlag och den empiriska data detta projekt bygger på.

Slutligen ett stort tack till Erik Dotzauer, Paul Göransson, Susanne Lindqvist, Mats Røjgård och Michael Sunström som genom sina erfarenheter, kunskap och kontaktnät fungerat som projektets referensgrupp och bidragit till projektets genomförande.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	3
Summary	3
Inledning/Bakgrund	4
Motivering	4
Teoretisk bakgrund	5
Syfte och mål	8
Genomförande	8
Projektstruktur	9
AP 1 – Ledning och koordinering.....	9
AP 2 – Informationssökning och datainsamling.....	9
AP3 – Modellering.....	9
AP4 – Känslighetsanalys	9
AP5 – Analys av ekonomiska incitament	9
AP6 – Påverkan på globala utsläpp av växthusgaser.....	9
AP7 – Analys av möjligheter och begränsningar	9
AP8 – Rapport skrivande och skrivande av vetenskapliga artiklar	10
Datainsamling och analys	10
Modellering av det svenska energisystemet	10
Intervjustudie	13
Resultat	14
Industriella processer och värme	14
Flexibilitet i energisystemet.....	15
Aktörers perspektiv	18
Potentialer för efterfrågefleksibilitet	18
Hinder mot användarflexibilitet.....	20
Incitament för användarflexibilitet	21
Diskussion.....	22
Vad betyder resultaten för utvecklingen av ett hållbart energisystem?	22
Rekommendationer	23
Publicationslista.....	24
Referenser, källor.....	24
Bilagor	29

Sammanfattning

Sveriges klimatmål är att uppnå nettonollutsläpp av växthusgaser till år 2045. Detta innebär att utsläppen av växthusgaser från verksamheter i Sverige ska vara minst 85% lägre år 2045 jämfört med utsläppen år 1990. Vidare säger Energiöverenskommelsen att svensk elproduktion 2040 ska vara 100 % förnybart. Många förnybara energikällor är intermittenta, dvs de erbjuder inte samma stadiga energitillförsel som fossila energikällorna. Det innebär en utmaning när slutkonsumenten förväntar sig en kontinuerlig och pålitlig tillgång till el, oberoende av väder och vind.

Detta projekt har därför genom matematisk modellering studerat hur användarflexibilitet inom och samverkan mellan FJV-sektorn, elsektorn och industrisektorn kan bidra till ett resurseffektivt framtida energisystem med en ökad andel intermittent förnybar elproduktion. Det genomfördes även intervjuer med aktörer från energibolag och industriföretag för att undersöka hinder, drivkrafter och incitament vad gäller användarflexibilitet.

Resultat visar att om kärnkraft ersätts med vindkraft i Sverige kommer Sveriges beroende av elimport från andra länder att öka med 21 TWh/år. Om flexibel styrning av kraftvärmeverk, värmepumpar och flexibel användning av el i industriella processer realiserar kan detta minska behovet av elimport med 36%, samtidigt som mängden överproduktion av el kan reduceras. Överproduktion kan uppstå då det blåser mycket och behovet är lågt och elnätet saknar tillräcklig överföringskapacitet till andra länder. Dock måste strategierna beskriva ovan kombineras med ny teknik i vindkraftverk som gör att dessa kan bidra till att upprätthålla stabiliteten i elnätet.

Resultat från intervjuerna visar att elpannor i värmesektorn har en teknisk potential att reglera en varierande vindkraftsproduktion. Dock hindras detta av höga elskatter i Sverige. Industrin uppvisar olika möjligheter till användarflexibilitet beroende på bransch, men kontinuerliga processer och en produktionskapacitet som är anpassad efter efterfrågan och inte omfattar någon överkapacitet utgör ett hinder.

Etablering av flexibilitetsmarknader och utveckling av smarta styrsystem som kan prediktera elproduktion och elbehov samt balansera elsystemet i realtid bör stimuleras.

Summary

Sweden's climate goal is to achieve net zero emissions of greenhouse gases by 2045. This means that greenhouse gas emissions from operations in Sweden must be at least 85% lower in 2045 compared to emissions in 1990. Furthermore, the Energy Agreement states that Swedish electricity production by 2040 will be 100% renewable. Many renewable energy sources are intermittent, ie they do not offer the same steady energy supply as fossil energy sources. This poses a challenge when the end users expect continuous and reliable access to electricity, regardless of weather and wind.

This project has therefore studied, through mathematical modeling, how user flexibility in and collaboration between the district heating sector, the electricity sector and the industrial sector can contribute to a resource-efficient future energy system with an increased share of intermittent renewable electricity production. Interviews were also conducted with actors from energy companies and industrial companies to analyze barriers, driving forces and incentives regarding user flexibility.

Results show that if nuclear power is replaced by wind power in Sweden, Sweden's dependence on electricity imports from other countries will increase by 21 TWh/year. If regulation of combined heat and power plants, heat pumps and flexible use of electricity in industrial processes is realized, this can reduce the need for electricity imports by 36%, while at the same time reducing the amount of overproduction of electricity. Overproduction can occur when there is high wind power production, the demand is low, and the electricity grid lacks sufficient transmission capacity. However, the strategies described above must be combined with new technology in wind turbines that enables them to contribute to balancing of the electricity grid.

Results from the interviews show that electric boilers in the heating sector have a technical potential to regulate a varying wind power production. However, this is hindered by high electricity taxes in Sweden. The industry presents different opportunities for user flexibility depending on the industry, but continuous processes and a production capacity that is adapted to demand and does not include any overcapacity constitute a barrier.

Establishment of flexibility markets and development of smart control systems that can predict electricity production and electricity demand as well as balance the electricity system in real time should be stimulated.

Inledning/Bakgrund

Motivering

Sveriges miljömål är att uppnå netto-nollutsläpp av växthusgaser till år 2045 (Globala målen för hållbar utveckling, 2017) och Energiöverenskommelsen (2016) sätter upp ett mål att svensk elproduktion ska vara 100 % förnybart till år 2040. Sol och vind är intermittenta (icke-planerbara) energikällor och en utmaning är att öka andelen intermittent elproduktion i elsystemet (Söder m.fl., 2014). För att övervinna dessa utmaningar krävs det ett bättre samspel mellan olika sektorer. Ett samarbete mellan el- och fjärrvärmesystem (FJV-system), där värmepumpar och kraftvärmeverk (KVV) körs beroende av tillgången på el från intermittenta energikällor, kan öppna möjligheter för en ökad andel intermittenta förnybara elproduktionsanläggningar i elsystemet (Lund m.fl., 2016; Lund och Münster, 2014; Sköldberg m.fl. 2015). Vidare, genom att industriell överskottsvärme levereras till ett lokalt FJV-nät kan FJV-bolaget minska sitt behov av primärenergi (Karlsson m.fl., 2009; Sandvall m.fl., 2015).

Beroende på vilka alternativa produktionslag som ersätts kan detta bidra till minskade utsläpp av koldioxid och svaveloxid (se t.ex. Grönkvist och Sandberg, 2006). Kopplingen till utsläppsminskning skapar också goodwill för industrin, vilket kan innebära en konkurrensfördel.

Energieffektiviseringsdirektivet lyfter fram fördelar med användning av överskottsvärme och framhåller användning i FJV-nät som speciellt intressant (European Parliament, 2012). I Sverige består 8,3 % av energitillförseln i FJV-nät av överskottsvärme (Energiföretagen Sverige, 2020), men potentialen för ökad användning anses betydande (IEA, 2015). Energimyndighetens rapport från utvecklingsplattformen för energiintensiv industri (Energimyndigheten, 2012) framhåller användning av överskottsvärme som ett av de sju prioriterade forskningsområdena. Tidigare forskning har visat att ekonomiska incitament är den vanligaste drivkraften vid inledning av värmesamarbeten, samt att samarbete kring investering och transparens är viktiga för långsiktigt samarbetet (Kovala m.fl., 2016).

Ett av de vanligaste misstagen vid utvecklingen av hållbarhetsåtgärder är att det sätts systemgränser runt enstaka system där varje expert endast är intresserad av sitt område (system). Ett sådant angreppssätt kan leda till sub-optimering. Oavsett experternas kompetenser, kan en sådan situation där ”man ser inte skogen för alla träd” bromsa hållbar utveckling eller även styra emot den. Exempel på sådana situationer är ökad elektrifiering av transportsektorn med syftet att minska växthusgasutsläpp inom transportsektorn utan att ta i hänsyn till hur elen produceras, eller att anta att användning av biomassa alltid är koldioxidneutral utan att ta hänsyn till vem de alternativa användarna av biomassa är. Tillämpning av bredare systemgränser då experter inom olika system och olika discipliner delar sina kunskaper, kan leda till att man upptäcker sådana möjliga avvägningar och trade-offs samt identifierar flera möjligheter för olika strategier som skulle leda till en gemensam nytta (t.ex. samarbete mellan olika energisektorer).

I Sverige regleras elsystemet med vattenkraft, men med en ökad andel intermittent elkraft behövs fler reglerande åtgärder. Flexibla elkunder (användarflexibilitet) är en sådan åtgärd och för att motivera kunderna kan det användas prisbaserade respektive incitamentsbaserade program (Jordehi, 2019). Hur sådana program ska optimeras är ett hett forskningsämne, men för att få en helhetssyn behöver även värmesektorn inkluderas i analysen.

Teoretisk bakgrund

Sverige ser Agenda 2030 och Parisavtalet från 2015 som det nya globala ramverket för hållbar utveckling och deltar därför aktivt i det internationella arbetet för att bidra till deras genomförande. I mars 2017 överlämnade den svenska regeringen en proposition till riksdagen om ett klimatpolitiskt ramverk enligt vilket Sverige kommer att uppnå netto-noll utsläpp till år 2045 (Globala målen för hållbar utveckling, 2017). Några åtgärder för att uppnå målet är t.ex. en ökad andel av förnybar elproduktion och en ökad energieffektivitet inom industrisektorn. Intresset att öka andelen av förnybar el i europeiska elsystem är stort. I ”Energy Roadmap 2050” presenterar European Commission ett framtids-

scenario som består av 97 % förnybar energi (European Commission, 2011). Sverige ställer ett ännu mer ambitiöst mål för svensk elproduktion, att den ska vara 100 % förnybart till år 2040 (Energioverenskommelsen, 2016). Baserat på Energieffektiviseringsdirektivet (European Parliament, 2012), som syftade till att fastställa en gemensam ram för att främja energieffektivisering inom EU, definierades Sveriges regeringsproposition (Reinfeldt och Lööf, 2013) som beskriver hur Sverige ska genomföra Energieffektiviseringsdirektivet. Proposition innebär bland annat förslag på nya åtaganden inom FJV- och industrisektorn i syfte att främja tillgodogörande av industriell överskottsvärme.

Att öka andelen intermittent kraftkapacitet kommer att följas av flera utmaningar (Söder m.fl., 2014). De flesta av dessa utmaningar kommer inte att vara energirelaterade utan snarare effektrelaterade (balansera produktionen och efterfrågan i varje tidpunkt). Projektet som presenteras in denna rapport har fokus på två av dessa utmaningar: överskottssituation (som uppstår vid hög elproduktion från intermittenta energikällor och låg elförbrukning) och underskottssituation (som uppstår vid låg elproduktion från intermittenta energikällor och hög elförbrukning). Med tanke på dessa utmaningar föreslår Söder m.fl. (2014) och Söder (2014) två möjliga åtgärder: att bygga en reservkapacitet i elnätet och att utveckla flexibilitet i elförbrukningen. Båda strategier kräver investeringar.

De befintliga traditionella elsystemen med en stor andel centralt styrda kondens- och vattenkraftverk kännetecknas av flexibilitet på produktionssidan. Med en ökad andel intermittenta elkraftverk kommer denna flexibilitet att minska avsevärt. Att bygga nya gränsöverskridande sammankopplingar mellan länder och öka kapaciteten i de befintliga näten kan bara delvis lösa detta problem. För att undvika beroendet av gränsöverskridande sammankopplingar krävs det därför att större flexibilitet på efterfrågesidan av systemet (Söder m.fl., 2014; Connolly m.fl., 2014; Lund m.fl., 2014). Större tim- och säsongsvariationer av produktionen av sol- och vindkraft samt svårigheter att förutsäga vädret är inte de enda utmaningarna. En hög produktion av intermittent elproduktion kan äventyra kortsiktig nätstabilitet och därmed även leveranssäkerheten (Söder m.fl., 2014; Connolly m.fl., 2014). Nätstabilitet kan klassificeras enligt följande egenskaper hos systemet: spänningsstabilitet, frekvensstabilitet, samt förmågan att dämpa effektsvängningar (Kundur m.fl., 1994). Traditionellt är det konventionella kondens- och vattenkraftverk som bidrar till kortsiktig nätstabilitet. På grund av ett ökat intresse för att investera i vindkraftsproduktion behövs dock även nya strategier som kan bidra till den kortsiktiga nätstabiliteten.

Flera studier visade att vindkraftverk i framtiden kan designas och drivas för att bidra till den kortsiktiga nätstabiliteten och delta i balansmarknaden (Söder m.fl., 2014; Domínguez-García m.fl., 2012). Domínguez-García et al. (2012) gör en genomgång av olika styrmetoder för vindkraftverk för att dämpa effektsvängningar, medan Sorknæs m.fl. (2013) visade en möjlighet att öka vinsten för en vindkraftspark i Danmark genom att använda den för nedreglering. De hävdade att det är möjligt att aktivera uppreglering också. Enligt flera studier, kan penetration av vindkraft i systemet också öka kostnaden för att balansera elsystemet (Albadi och El-Saadany, 2010; Tarroja m.fl., 2012).

Sköldberg m.fl. (2015) gjorde en systematisk genomgång av fjärrvärmens möjliga roller vid dessa utmaningar. De presenterade hur ett FJV-system kan bidra till att möjliggöra en ökad andel av intermittenta elproduktionsanläggningar genom styrning av elproduktion i KVV och elanvändning i värmepumpar och elpannor. De presenterade hur FVJ-anläggningarna måste köras för att uppnå målet och undersökte även förhållande som kan bromsa potentialen (t.ex. efterfrågan på FJV och ekonomiska förhållande). Sköldberg m.fl. (2015) analyserade fortsättningsvis hur det framtida elsystemet med en större andel av intermittenta elproduktionsanläggningar kan påverka samverkan mellan el- och FJV-marknaden. Fjärrvärmens potential att bidra till en ökad andel av intermittenta elproduktionsanläggningar analyserades i ytterligare ett antal fallstudier (Lund m.fl., 2016; Lund och Münster, 2014; Gustafsson m.fl., 2018).

Laststyrning, dvs fördelning av energianvändningen över tid, är ett sätt för industrin att minska sina energikostnader samtidigt som det kan fungera som en reglerande funktion i elsystemet och därmed bidra till en ökad andel av intermittenta elproduktionsanläggningar (se t.ex. Kelley m.fl., 2019; Cui och Zhou, 2018; Rodríguez-García m.fl., 2018). Följande är exempel på laststyrning (NE, 2019):

- Lastprioritering: innebär att driften av elektriska utrustningar styrs av angelägenhetsgraden
- Tidsförskjutning: driften av utrustningen kan utan olägenhet skjutas upp till ett senare tillfälle
- Ackumulering: varmvattenberedare är exempel på ackumulering, där elanvändningen sprids över en längre tid
- Bivalenta system: innebär omväxlande användning av olika energikällor där användningen styrs av priset. t.ex. olja och el, där olja används när elen är dyr
- Egen elproduktion: t.ex. mottrycksanläggningar för egen elproduktion som kan samordnas med extern elförsörjning.

En annan utmaning på vägen till framtida hållbara system är att öka andelen överskottsvärme som används och kommer till nytta. Överskottsvärme definieras enligt IEA (2015) som "... värmen i alla strömmar (gas, vatten, luft, etc.) som frigörs från en industriell process vid en given tidpunkt...". Enligt Werner (2016) förlorades två tredjedelar (ungefär 1,3 EJ) av den totala primärenergien som används i Sverige 2014 i form av överskottsvärme och en stor andel av denna överskottsvärme kommer från industriella processer. Vid bestämning av tillgänglig överskottsvärme kan potentialerna redovisas som teoretiska, tekniska eller ekonomiska (IEA, 2015). Energiintensiv industri, såsom järn- och stål-, massa- och papper-, kemi-, aluminium- och petroleumindustrin, genererar stora mängder överskottsvärme. Enligt IEA (2015) kan användning av överskottsvärme delas in i tre huvudgrupper: (1) direkt användning utan uppgradering, (2) användning efter uppgradering med värmepumpar, och (3) elproduktion från överskottsvärme. De första två grupperna inbegriper användning av industriell

överskottsvärme i FJV-nät. Tidigare studier visar dock att det kan uppstå konflikt mellan avfallsförbränningsanläggningar och utnyttjande av industriell överskottsvärme i FJV-system (SOU, 2005). Enligt utredningen bör därför avfallsförbränningsanläggningar endast etableras i FJV-system där industriell överskottsvärme inte finns tillgänglig.

Syfte och mål

Mot denna bakgrund har projektet syfte varit att undersöka hur användarflexibilitet inom och samverkan mellan FJV-sektorn, elsektorn och industrisektorn kan bidra till ett resurseffektivt framtida energisystem med en ökad andel intermitterant förnybar elproduktion (vindkraft och sol) och en ökad användning av industriell överskottsvärme.

Ett antal delmål har satts upp inom projektet:

1. En sammanställning över industriella processer som kan:
 - a. lagra el (efter omvandling till energiform som kan lagras)
 - b. leverera överskottsvärme med tillräckligt hög temperatur för elproduktion
 - c. leverera överskottsvärme med tillräckligt hög temperatur för användning i lokala FJV-system
 - d. använda FJV
2. En studie av hur FJV-system, elsystem och industriella system bör samverka (dynamiken i energisystemet) för ökad andel intermitteranta förnybara energikällor i elsystemet och ökad användning av industriell överskottsvärme.
3. En analys av framtida förändringar i omvärlden som kan påverka resultaten.
4. En analys av vilka ekonomiska incitament som behövs för att aktörerna (industri, FJV-bolag, elbolag) ska samverka för ett flexibelt och resurseffektivt energisystem.
5. En analys av hur ett sådant samarbete skulle påverka globala utsläpp av växthusgaser.
6. En analys av möjligheter och begränsningar som föreligger för en sådan samverkan.

Projektet har pågått mellan juli 2019 och juni 2022 och finansierats av Energimyndigheten.

Genomförande

Detta projekt har genomförts av forskare från avdelningen Energisystem på Linköpings universitet.

Projektstruktur

Projektet var organiserat i åtta arbetspaket (AP).

AP 1 – Ledning och koordinering

Projektet har letts av Maria Johansson (LiU) med stöd av en referensgrupp, bestående av Erik Dotzauer, Mats Røjgård, Paul Göransson, Susanne Lindqvist och Michael Sunström som har bidragit med kommentarer och ämnesspecifik kunskap.

AP 2 – Informationssökning och datainsamling

I detta AP har information och data som behövts för modelleringen i AP3 och 4 samlats in från litteratur och genom intervjuer. Sådan information och data är (1) potentialer för flexibel styrning av industriella processer som nämndes under delmål 1, (2) processdata för svenska FJV-system, (3) statistik och antaganden av elprisvariationer som beror på tillgång på vind och sol.

Antagandena relaterade till framtida elprisvariationer baserades på studier där framtida utveckling av elsystemet har analyserats.

AP3 – Modellering

I detta AP har dynamiken mellan FJV-system, elsystem och industriella processer analyserats. Olika strategier för ökad flexibilitet i energisystemet modellerades matematiskt. Resultat av analysen är beskrivna i ett en snart färdig artikel som ska skickas till vetenskaplig journal (Cruz m.fl., 2022b).

AP4 – Känslighetsanalys

I detta AP har en känslighetsanalys genomförts som studerar hur framtida förändringar i systemet och omvärlden kan påverka resultaten. Ett exempel är utveckling av fjärde generationens FJV (lägre temperaturer i nätet) som i sin tur kan påverka COP hos värmepumpar och elverkningsgrad hos KVV. Metoder som använts är litteraturstudier, och matematisk modellering.

AP5 – Analys av ekonomiska incitament

I AP5 har en analys gjorts över ekonomiska incitament för styrning respektive investering i teknik för att möjliggöra ett flexibelt energisystem. Aktörer i energi- och industrisektorerna intervjuades. Resultat av analysen är beskrivna i en referegranskad konferensartikel (Johansson & Djuric Ilic, 2022).

AP6 – Påverkan på globala utsläpp av växthusgaser

Arbetspaketet analyserade hur de olika strategierna i AP3 påverkar globala utsläpp av växthusgaser. Analysen gjordes genom beräkningar.

AP7 – Analys av möjligheter och begränsningar

Arbetspaketet studerade vilka möjligheter och begränsningar som kan finnas vad gäller användarflexibilitet. Metod var intervjuer med aktörer från industri och energibolag. Resultat av analysen är beskrivna i en referegranskad konferensartikel (Johansson & Djuric Ilic, 2022).

AP8 – Rapport skrivande och skrivande av vetenskapliga artiklar

Datansamling och analys

Data samlades in genom statistik från officiella källor, litteraturstudier och en intervjustudie på företagsnivå, vilka beskrivs mer i detalj nedan.

Till grund för intervjustudien låg en litteraturstudie som användes för att identifiera olika teman och frågeområden. Litteraturstudien användes också till att identifiera potentialer för efterfrågefleksibilitet och välja ut scenarier för framtidens energisystem som användes i en simuleringsmodell för att analysera dynamiken i elsystemet och relaterade utsläpp av växthusgaser. Potentialer för användarfleksibilitet som identifierades i intervjustudien fungerade även som input till modelleringen.

Modellering av det svenska energisystemet

I denna studie användes modelleringsverktyget EnergyPLAN (Lund m.fl., 2021; Østergaard, 2015). EnergyPLAN utvecklades för analys av framtida storskaliga energisystem som kännetecknas av stora andelar intermittenta energikällor (t.ex. för att studera strategier som skulle möjliggöra en ökad andel av intermittent elproduktion) (Lund och Thellufsen, 2020). Verktyget låter användare fånga komplexiteten i ett energisystem som inkluderar el-, transport-, industri- och värme- och kylsektorer (Lund m.fl., 2021; Østergaard, 2015).

Först byggdes en matematisk modell över Sveriges energisystem år 2019, vilket är det sista året för vilket data finns tillgängligt och det sista året innan covid-19-pandemin. Data för industri-, transport-, värme- och elsektorerna har samlats in från officiell nationell statistik och från olika aktörer inom energisektorn (Energimyndigheten, 2020a; 2020b; Svenska Kraftnät, 2020; Nord Pool, 2022; Energiföretagen Sverige, 2020). Denna modell benämns basmodell.

De flesta indata till EnergyPLAN måste definieras som en total årlig efterfrågan (i TWh/år), kombinerat med en normaliserad fördelning (med värden mellan 0 och 1) för en 8784 timmar lång period (matas in i modellen som en Excel-fil). Detta gör att de totala energibehoven (t.ex. el- eller värmebehov) i modellen kan ändras, utan att det påverkar behovets och produktionens dynamik över året.

Den installerade kapaciteten för elanläggningar i det svenska elsystemet och den totala kapaciteten av transmissionsledningarna mellan Sverige och grannländerna baserades på data från Svenska Kraftnäts (2020) och Nord Pools (2022) officiella webbsidor. Värmesektorn består av FJV-sektor och privata (individuella) uppvärmningsanläggningar och uppvärmningsbehov. Data och antaganden relaterade till de individuella uppvärmningsanläggningarnas och uppvärmningsbehov är baserade på statistik från Energimyndigheten (2020b) och SCB (2020). I modellen omfattar FJV-sektorn två grupper av FJV-system som representeras av aggregerade data för (1) alla svenska FJV-system som inkluderar endast bränsleeldade pannor, och (2) alla svenska FJV-system som inkluderar både KVV och bränsle-pannor (SCB, 2020; Werner, 2018).

Ett urval av indata som användes i modellen finns i Tabell 1 men mer detaljerade beskrivning av modellen presenterades i Cruz m.fl. (2022b).

Tabell 1. Indata till modellen av Sveriges energisystem år 2019 (Basmodell).

Elsektor		
Inhemskt elbehov	TWh	139,3
Nettoexport	TWh	26,2
Bränslebehovet för individuella uppvärmningsanläggningar		
Olja	TWh	0,80
Naturgas	TWh	0,71
Biomassa	TWh	9,32
El i värmepumpar	TWh	14,60
Direktverkande elvärme	TWh	5,81
Uppvärmningssektor		
FJV-behov i FJV-system som inkluderar endast bränslepannor	TWh	26,3
FJV-behov i FJV-system som inkluderar även KVV	TWh	28,1
Kylbehov		
FJV-driven absorptionskyla	TWh	0,52
Värmepumpar och kompressionskylare	TWh	0,59
Bränslebehovet inom industri och transportsektor		
Kol	TWh	13,1
Olja	TWh	15,1
Naturgas	TWh	4,2
Biomassa	TWh	58,1
Övriga bränslen	TWh	5,80
Flygbränsle	TWh	1,9
Diesel	TWh	38,6
DME (dimetyleter)	TWh	14,0
Bensin	TWh	23,1

Otto-biobränslen	TWh	1,0
Naturgas (gasnät)	TWh	0,3
El för transport	TWh	2,9

För att validera basmodellen jämfördes simuleringsresultaten med befintlig statistik över bland annat den totala bränsleanvändningen i Sverige. Efter valideringen ändrades bas-modellen till att beskriva framtida ändringar av energisystemet. Här valdes ett av de scenarier som presenteras i IVA:s rapport ”Future Electricity Production in Sweden” (IVA, 2017). Det valda scenariot inkluderar en storskalig användning av vind- och solenergi (se Tabell 1). Denna modell över framtidens energisystem benämns referensmodell. Analyserna i referensmodellen genomfördes för ett intervall av årlig vindkraftsproduktion mellan 45 TWh och 60 TWh.

Tabell 2. Framtidens energisystem (IVA, 2017). (Referensmodell)

Elproduktionsanläggningar		
Vattenkraft	TWh/år	65
Vindkraftsproduktion	TWh/år	55
Vindkraftskapacitet	GW	~ 19
Solkraft	TWh/år	15
Bioenergi	TWh/år	25
Kärnkraft	TWh/år	0
Totalt årligt elbehov	TWh/år	160

Referensmodellen användes vidare för att analysera potentialer av olika strategier (med KVV, värmepumpar och flexibel elanvändning) för att öka flexibilitet i elsystemet.

Med en ökad andel vindkraftsproduktion kommer systemet att bli mer beroende av att exportera el (i de ögonblick då vindkraftsproduktionen är hög medan efterfrågan är låg) och att importera el (i de ögonblick då elproduktionen inte är tillräckligt hög för att täcka efterfrågan). Därför användes dessa två parametrar för att utvärdera systemets stabilitet. Potentialer av olika strategier för att öka flexibilitet i elsystemet bedöms genom en jämförelse av hur mycket el som måste importeras samt hur mycket överskottsel som genereras vid simuleringen av de valda strategierna. Överskottseln är el som överskrider den maximala effekten som kan exporteras med dagens kapacitet i transmissionsledningarna (7400 MW). Om denna begränsning överskrids antyder det att det finns en risk att det uppstår ostabilitet i nätet.

Vidare, ett minimikrav på stabilisering av elnätet sattes till 30 % i modellen. Det betyder att modellen tvingas garantera att för varje timme så produceras minst 30 % av elen i anläggningar som kan bidra till stabiliteten (vanligtvis kondens- och vattenkraftverk). När intermittent elproduktion är mycket hög kan dock kravet på stabilisering av elnätet leda till överskottsel. För att lösa det problemet måste några av vindkraftverken ha möjlighet att bidra till nätstabiliseringen. Därför analyserades också hur resultaten påverkas av att olika andelar av vindkraftverken kan bidra till nätstabilisering.

Vid beräkning av effekterna på globala växthusgasutsläpp orsakade av import av el antas att elen produceras i koleldade kondenskraftverk eller naturgasdrivna kondenskraftverk med verkningsgrader 0,46 respektive 0,58 (Nohlgren m.fl., 2014). Växthusgasutsläpp från kol är 374 kg CO₂eq/MWh och för naturgas 242 kg CO₂eq/MWh (IPCC, 2001). Utsläppen från elproduktionen är alltså 800 kg CO₂eq/MWh respektive 400 kg CO₂eq/MWh.

För att bedöma hur utvecklingen av fjärde generationens FJV (som kännetecknas av lägre temperatur i FJV-nätet) påverkar importen och överskottselen kördes känslighetsanalys för två parametrar: COP i värmepumpar (3; 3,25; 3,5) och elverkningsgrad/värmeverkningsgrad för KVV (0,25/0,7; 0,275/0,7; 0,31/0,69). Potentialen att öka COP i värmepumpar genom att sänka temperaturen i FJV är ännu högre, men det antogs att endast en del av FJV kommer att konverteras till fjärde generationens FJV-system.

Intervjustudie

Aktörer inom energi- och industrisektorerna intervjuades för att undersöka hur de såg på potentialer och utmaningar gällande flexibel användning av el i sina processer. Intervjuerna med industriföretagen innefattade även frågor om de genererar överskottsvärme och om de har processer som kan använda FJV. Intervjuguiden utarbetades utifrån tre teman: potentialer, hinder och drivkrafter och incitament. Intervjuerna genomfördes online med hjälp av de digitala verktygen Zoom och Teams, och följde ett halvstrukturerat format som gav frihet att ändra ordningen på frågorna och att följa upp intressanta svar (Kvale och Brinkmann, 2014). Totalt genomfördes 16 intervjuer hösten och vintern 2021–2022 och intervjuernas längd varierade från 45 till 90 minuter. I studien ingick respondenter från energibolag i olika regioner i Sverige och från olika industribranscher. Representanter från fyra energiföretag, fyra massa- och pappersbruk, tre metallföretag, ett livsmedelsföretag, ett gjuteri, en fordonsindustri och två kemiföretag intervjuades. Majoriteten av de studerade industriföretagen är energiintensiva och då massa- och pappersindustrin och metallindustrin tillsammans står för mer än 55 % av den industriella elanvändningen i Sverige (Energimyndigheten, 2022) har fokus legat på dessa företag. Kontaktinformation hittades på företagshemsidor och LinkedIn och den första personen som kontaktades hade möjlighet att vidarebefordra förfrågan om att delta till en annan person på företaget.

Intervjuerna spelades in och transkriberades ordagrant och utskrifterna kodades och kategoriserades utifrån teman i intervjuguiden, det vill säga potentialer, hinder och drivkrafter/incitament.

Resultat

Industriella processer och värme

Baserat på litteratur och intervjuer med aktörer i ett urval av branscher i industrin har en sammanställning gjorts över industriella processer som genererar överskottsvärme (ÖV) som kan användas till elproduktion eller i FJV-nät, samt industriella processer som kan använda FJV. Sammanställningen gör inte gällande att vara heltäckande och tar inte hänsyn till ekonomiska aspekter.

Flertalet av metallindustrins processer körs vid höga temperaturer och smältning och värmning av material sker i olika typer av ugnar. Rökgaser från ugnarna har en hög temperatur och lämpar sig för elproduktion eller FJV efter värmväxling. Kylvatten från ugnar, induktorer, gjutning, valsverk, glödningsanläggning, och hydraulsystem kan enligt respondenterna användas som FJV. Det finns tekniker (t.ex. Organic Rankine Cycle (ORC)) som kan producera el från värme med lägre temperatur än vad som är möjligt i en konventionell ångcykel och kylvatten med tillräcklig temperatur för avsedd teknik kan då utnyttjas för elproduktion. Strålning från svalbäddar för varmt gods skulle kunna tas tillvara för produktion av FJV och eventuellt även elproduktion (Ekelöw m.fl., 2018; Johansson, 2014). Intervjuerna visade på begränsad möjlighet för användning av FJV i processer pga att temperaturen i FJV inte är tillräckligt hög. En process som nämndes är värmning av betningskar.

Även gjuteriindustrin använder olika typer av ugnar och rökgaserna kan på samma sätt som i metallindustrin användas för produktion av el eller FJV. Ytterligare processer som enligt respondenterna genererar värme som är lämplig som FJV är kylning av kompressorer och frånluft från avkylningstunnel.

Det framkom att inom kemiindustrin kan kylvatten från fraktioneringsanläggning samt värme från ångkondensatorer användas som FJV. Dessutom skulle FJV kunna användas inom industrin för produktion av processkyla (Djuric Ilic och Trygg, 2014).

Livsmedelsindustrin genererar värme från kylkompressorer vilken kan lämpa sig som FJV. Processer som kan använda FJV inom denna bransch är torkning, förvärmning av diskvatten och processkyla (absorptionskyla) (Djuric Ilic och Trygg, 2014).

Flera processer inom massa- och pappersindustrin använder ånga och överskott från ångsystemet kan utnyttjas för elproduktion eller som FJV (Cruz, 2022a). Dessutom finns ett värmeöverskott från hetvattensystemet, vilket kan användas som FJV. Vid låg temperatur skulle det kunna användas för värmning av returvattnet i FJV-systemet. Rökgaser från pannor (t.ex. sodapanna och barkpanna) kan på samma sätt som i metall- och gjuteriindustrin användas för

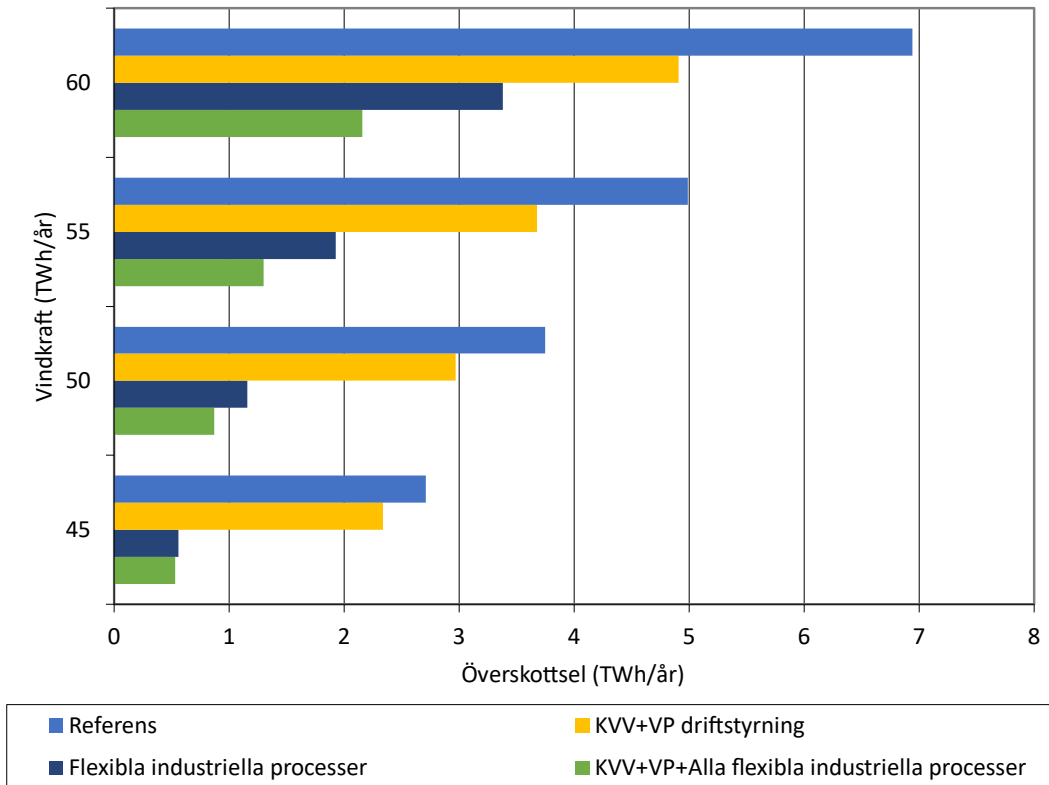
produktion av el eller FJV. Torkning av pappersmassa genererar värme lämplig för FJV.

Flexibilitet i energisystemet

Den importerade elen och den så kallade överskottselen används som mått för att bedöma möjligheten att öka den intermittenta elproduktionen i systemet utan att påverka nätstabiliseringskraven och leveranssäkerheten. Det är eftersträvärt att minimera mängden importerad el och överskottsel.

Figur 1 visar överskottselen för tre strategier som syftar till att öka flexibiliteten i systemet: (1) driftstyrning av KVV och värmepumpar, (2) användning av flexibla elbehov inom industrin (som kan förskjutas inom en dag, en vecka eller fyra veckor) och (3) en kombination av dessa två strategier. Dessa flexibla elbehov sätts till 10 % av topeffektbehovet vilket är baserat på IVAs rapport "Future Electricity Production in Sweden" (IVA, 2017).

Referensmodellen som är baserad på IVA:s uppskattningar (55 TWh och 19 GW vindkraft) resulterar i överskott i elproduktion på cirka 4,4 TWh per år. Med varierande installerad kapacitet av vindkraft, i intervallet 16 GW till 21.3 GW, varierar elöverskottsproduktionen mellan 2,7 TWh och 7 TWh. Genom att tillämpa driftstyrning av KVV och värmepumpar i modellen minskar överskottselen med 26 % vid 55 TWh vindkraftsproduktion och med 29 % vid 60 TWh vindkraftsproduktion (skillnaden mellan den ljusblå och gula stapeln i Figur 1). Bidraget från styrning av KVV och värmepumpar för att minska överskottselen ökar med ökande vindkraftsproduktion. Bidraget till att minska överskottselproduktionen genom flexibla elbehov i industrin har mer betydelse vid en lägre årlig vindkraftsproduktion. Till exempel, användningen av flexibla elbehov skulle minska överskottsel med 61 % när den årliga vindkraftsproduktionen är 55 TWh/år (skillnaden mellan den ljusblå och mörkblåa stapeln). Den kombinerade effekten av driftstyrning av KVV, värmepumpar och industriella processer ger en minskning av överskottselen med 74 % vid 55 TWh årlig vindkraftsproduktion. När man kombinerar dessa regleringsstrategier varierar minskningen av överskottsel från 80 % vid 45 TWh (kapacitet av vindkraft 16 GW) vindkraft till 68% vid 60 TWh (kapacitet av vindkraft 21.3 GW) vindkraft.

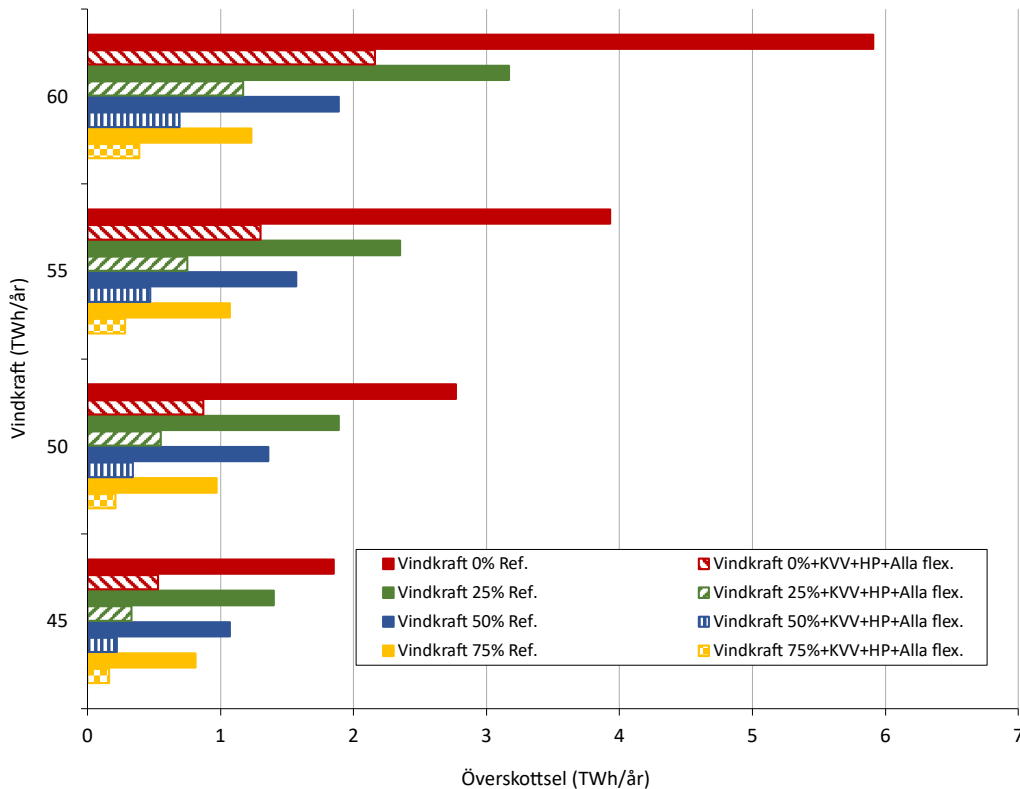


Figur 1. Överskottsel när den årliga vindkraftsproduktionen ökar. Resultat visas för referensmodellen och för de olika strategierna som föreslås för att öka flexibiliteten i elsystemet.

I modellen användes de konventionella sätten för nätstabilisering, med vattenkraft och kondenskraftverk. Ett minimikrav i modellen är att 30 % av den totala elproduktionen i systemet måste produceras i dessa kraftverk vid varje timme. Detta resulterar i mer överskottsel under timmarna med hög vindkraftsproduktion. För att möjliggöra för vindkraftelproduktion att öka utan att kompromissa nätstabiliseringskraven och utan att vara beroende på möjligheten att exportera elen måste andra sätt för att stabilisera nätet användas i modellen. Därför, i syftet för att kunna utnyttja den hela potentialen av driftstyrningen av KVV och värmepumpar, samt användningen av flexibla elbehov inom industrisektorn i modellen valdes att även en del av vindkraftverk kommer att kunna bidra till nätstabilisering i framtiden. Figur 2 visar vilken påverkan stabiliseringen med vindkraftverk kan ha på tidigare resultat.

Resultatet visade att för lägre vindkraftelproduktion ger driftstyrning av KVV och värmepumpar i kombination med flexibla elbehov lägre överskottsel jämfört med nätstabiliseringen med vindkraftverket. Men med en ökning av den årliga vindkraftsproduktionen i systemet får möjligheten att vindkraftverkanläggningarna bidrar till nätstabiliteten en större betydelse för minskning av överskottsel. När alla strategier för att öka flexibiliteten tillämpas och när 75 % av vindkraftsanläggningarna kan bidra till nätstabiliseringen är

överskottselen för den årliga vindelproduktionen på 60 TWh 56 % lägre jämfört med när vindkraft inte bidrar till nätstabiliseringen.



Figur 2. Överskottselproduktion för fallen utan driftstyrning av KVV och värmepumpar (VP) och flexibla elbehov men med varierande mängd vindkraft som bidrar till nätstabilisering (halfyllda staplar), och överskottselproduktion i fallen med driftstyrning av KVV och värmepumpar och flexibla elbehov samt möjlighet till varierande mängd vindkraft som bidrar till nätstabilisering (mönstrade staplar).

Utan kärnkraftsproduktion (7,7 GW och 64 TWh/år) och med en hög andel vindkraftskapacitet i systemet (21 GW och 55 TWh/år) kommer även den importerade elen att öka (jämförelse mellan "Basmodellen" och "Referensmodellen"). Om inte strategierna för att öka flexibiliteten i systemet och den kortsiktiga nätstabiliseringen med vindkraftverk tillämpas skulle den årliga elen som importeras öka med 21 TWh. Detta innebär att Sverige skulle vara i ett större beroende av andra länder. Om man dessutom antar att denna el produceras i kondenskraftverk (eftersom denna typ anläggning tillhör de konventionella anläggningarna som kan bidra till nätstabiliseringen) kommer denna export att resultera i ökade globala växthusgasutsläpp (Tabell 3).

Om reglering av KVV, värmepumpar och flexibla industriella processer tillämpas skulle den importerade elen minska med 36 %, men den blir fortfarande 13,44 TWh högre jämfört med nuvarande system (Basmodellen 2019).

Tabell 3. Ökning av globala växthusgasutsläpp om man antar att den importerade elen produceras i koleldade kondenskraftverk eller naturgasdrivna kondenskraftverk med verkningsgrader 0,46 respektive 0,58.

	Ökad import av el	Effekter på globala utsläpp av växthusgaser (koleldade kondenskraftverk)	Effekter på globala utsläpp av växthusgaser (naturgasdrivna kondenskraftverk)
Referensmodell	20,94 TWh	17 Mton CO ₂ eq	8,7 Mton CO ₂ eq
Referensmodell + KVV+VP+flexibla industriella processer +nätstabilisering med 75 % vindkraft	13,44 TWh	10 Mton CO ₂ eq	5,6 Mton CO ₂ eq

Man kan hävda att export av el har en potential att minska globala växthusgaser om denna el ersätter elproduktionen i kondenskraftverk. Om detta kommer att hända eller inte beror på utvecklingen av kraftsektorer i andra länder. De flesta av EU-länderna försöker också öka andelen av sin förnybara el (oftast genom att investera i vindkraft) vilket innebär en låg potential för svensk elexport att minska växthusgaserna i de andra länderna.

Om några av FJV-systemen i Sverige konverterar till fjärde generationen genom att sänka temperaturen i nätet, kommer elanvändningen för FJV-produktion i värmepumpar att minska samtidigt som elen som produceras från KVV ökar. Detta visade sig dock inte att ha någon större inverkan på potentialen i de analyserade strategierna. Den el som importeras under de timmar då vindkraftsproduktionen är låg kommer att minska med 5–10 %. Orsaken till detta är högre elproduktion i KVV och lägre elanvändning i värmepumpar. Under timmarna med överproduktion kommer överskottselen att öka med mindre än 4 %.

Aktörers perspektiv

Potentialer för efterfrågefleksibilitet

Intervjuerna visade på flera möjligheter för energibolag (fjärrvärmeproducenter) och industri att fungera som flexibla elkunder.

Energibolag

Energibolagen som intervjuades berättade att elpannor och värmepumpar för produktion av FJV kan utgöra flexibla elanvändare. Dessa kan köras vid lågt elpris, till exempel under perioder av stor elproduktion från vindkraft. Elpannor kan med fördel kombineras med någon typ av värmelager såsom ackumulatortank eller borrhål.

Flera respondenter nämnde introduktion av vätgasproduktion genom elektrolys som en lösning för flexibilitet. Vätgas produceras vid överskottsel i systemet och kan lagras och användas för elproduktion vid elunderskott i elsystemet. Överskottsvärme från elektrolysören kan även användas som FJV.

Om energibolaget har kraftvärme i sitt system, kan proportionerna av producerad värme och el anpassas så att anläggningen kan fungera som en flexibilitetstjänst på utbudssidan. Ett bolag pekade lyfte dock att deras KVV var mycket stort och därför endast körs vintertid när värmebehovet är stort. Bolaget planerar dock att investera i ett mindre KVV med högre styrbarhet som kan drivas under större delen av året med befintligt värmebehov.

Industri

Under intervjuerna framkom att industrin skulle kunna vara flexibel i de processer som erbjuder en möjlighet till överproduktion där de kan bygga upp ett lager under perioder av effektöverskott. Vid perioder av effektbrist skulle då dessa processer kunna minska eller stänga av sin produktion och istället används de lagrade produkterna. Ett annat alternativ som nämndes är att köra produktionen på maxkapacitet del av dag och halv kapacitet andra delen av dagen om elpriset varierar över dygnet. Detta körsätt förutsätter tillgång på personal, utrustning, lagerutrymme, och hantering av eventuella ökade kostnader.

Massa- och pappersindustrin har barkkrossar och flishuggare som kan fungera som flexibla användare av el och stängas av vid effektbrist. Respondenterna i denna bransch berättade även om möjligheten att köra elpannor i kombination med barkpannan för produktion av processånga. Detta erbjuder en flexibel lösning där barken lagras då elpannan körs. Det blir här en avvägning mellan el- och bränslepriser, som avgör när elpannan respektive barkpannan används.

Ljusbågsugnen som smälter stålskrot i järn- och stålindustrin är en satsvis process och den kan till viss del laststyras. Denna möjlighet är dock lättare att implementera för stålverk med göt gjutning eftersom detta är en satsvis gjutning. Stränggjutning däremot är en kontinuerlig gjutning som kräver kontinuerlig tillförsel av smält stål. Dessutom kan värme-, värmebehandlings- och hållugnar i metallindustrin och gjuterier i vissa fall stängas av under en kortare period utan att produktkvaliteten påverkas. Respondenten från gjuteribranschen berättade att deras indunstare kan utgöra en flexibel användare, men det förutsätter att företaget investerar i större indunstningskapacitet. Även ventilationen skulle kunna laststyras till viss del om det inte påverkar arbetsmiljön.

En respondent från stålindustrin berättade om möjligheten att introducera vätgasproduktion genom elektrolys. I detta fall kan uppvärmningsugnarna växla mellan att använda väte och gasol som bränsle, vilket erbjuder en flexibilitet i driften.

Torkugnar inom bilindustrin kan stängas av under en kortare period utan att produktkvaliteten påverkas. Dessutom kan begagnade batterier från fordon användas som energilager och reservsystem på företaget.

Kylrum inom livsmedelsindustrin är tröga system som kan stängas av i en eller två timmar (särskilt under vintern) utan att kylkvaliteten påverkas. Vidare erbjuder kylning med is en möjlighet att producera is under perioder med låga elpriser. Ett annat alternativ som togs upp är möjligheten att använda två kyltekniker sida vid sida: elektriska kylmaskiner och FJV-driven absorptionskyla. I det här fallet kan företaget byta mellan de två beroende på effekttillgång i elnätet.

Många processer i livsmedelsindustrin har ett behov av ånga och ånga kan lagras i ackumulatortankar för att säkerställa en stabil tillgång. Detta erbjuder flexibilitetsalternativ.

Drifttiden för de pumpar som används för att transportera de producerade kemikalerna i kemiindustrin kan enligt en respondent förskjutas ett par timmar utan att det påverkar produktionen. Det finns också en möjlighet att använda väte som produceras genom elektrolys som råmaterial, vilket skulle kunna möjliggöra flexibilitet. En annan möjlighet till flexibilitet som kom upp är att installera en elpanna som kan köras i symbios med en befintlig bränseleddad panna.

Hinder mot användarflexibilitet

Energibolag

Ett hinder mot flexibel elanvändning inom värmesektorn är att elpriserna inte alltid följer elbehovet i systemet. Ett högt elpris under perioder av lågt elbehov och stor produktion av vindkraft hindrar att energibolag i dessa situationer använder värmepumpar och elpannor för FJV-produktion.

Ett annat hinder är osäkra prognoser för vindkraftsproduktion. Dagen-föremarknaden för elhandel stänger kl. 12 dagen före vilket anses vara ett hinder. Mer oplanerad elproduktion medför att det behövs mer flexibilitet i handelssystemet så att aktörerna kan lägga sina bud senare.

En respondent lyfte att vindkraftsproducenterna inte är intresserade av att producera el utan vinst, vilket kan hindra genereringen av överskottsenergi som kan lagras i exempelvis batterier och vätgas. Respondenten poängterade behovet av affärsmodeller som kan hantera detta.

Dessutom hindrar Sveriges höga elskatter användning av framförallt elpannor, men även värmepumpar för FJV-produktion.

Industri

Många processer inom industrin är kontinuerliga och är därför svåra att lastsyra utifrån effekttillgång i elsystemet. Processer som tar lång tid att starta och stoppa är mindre flexibla och i vissa fall kan upprepade start och stopp orsaka slitage på utrustningen.

Anläggningar som kontinuerligt arbetar på maximal kapacitet och/eller har begränsad lageryta har få möjligheter att vara flexibla. De kan inte bygga upp ett lager som kan säkra produktionen under perioder då processer regleras ner.

Risk att användarflexibilitet påverkar produktkvalitet och möjligheten att leverera produkter i tid till kund ansågs vara ett hinder. Företagens trovärdighet gentemot kund får inte äventyras.

Ett annat hinder som kom upp är bristande kompetens inom företaget om hur processer kan styras utifrån effekttillgång i elsystemet. Dessutom ansågs brist på information om hur en flexibilitetstjänst på en flexibilitetsmarknad fungerar vara ett hinder.

Incitament för användarflexibilitet

Energibolag

Respondenter från energibolagen nämnde att ett incitament för användarflexibilitet vore att införa differentierade elskatter där hänsyn tas till regionala förutsättningar i de olika elprisområdena. Detta skulle kunna vara utformat så att områden med stor andel oplanerad elproduktion (vindkraft) får lägre elskatt vilket möjliggör användning av elpannor och värmepumpar för produktion av värme i FJV-nätet.

En annan drivkraft som nämndes är att införa utsläppsrätter för växthusgaser med biogent ursprung. Enligt respondenten skulle detta medföra en minskning av FJV-produktion i biobränsleeldade pannor till förmån för flexibel värmeproduktion med förnybar el i elpannor kombinerade med värmelager.

Mätning av elanvändning hos kund varje kvart istället för en gång i timmen togs upp som en annan drivkraft. Detta skulle möjliggöra att kunden kan debiteras ett elpris som följer prissvängningar bättre istället för att betala ett genomsnittligt timpris. Kunden får härigenom ett incitament att förskjuta sin elanvändning i tid eftersom det syns på elräkningen.

Ytterligare ett incitament som kom upp är implementering av elavtal med individuell prissättning där det finns olika nivåer av leveranssäkerhet på el. Här får elkunder individuella elavtal baserade på vilken tolerans de har vad gäller tillfälliga effektbortfall.

En pålitlig marknad för flexibilitetstjänster där det finns enhetliga prismodeller lyftes fram som ett incitament för att få aktörer att medverka. Något som också lyftes som en förutsättning för en fungerande flexibilitetsmarknad var att det måste vara tydligt med vilka roller som finns och hur ansvarsfördelningen ser ut.

En viktig drivkraft som lyftes är att det finns verktyg som kan ge säkrare långtidsprognoser för sol- och vindkraft.

Slutligen efterfrågades proaktiva beslut från regeringen så att företag vet vilka förutsättningar som gäller i framtiden. Detta kan få företag att investera och genomföra nödvändiga förändringar.

Industri

Respondenter från industrin angav ett rörligt elpris som ett incitament för laststyrning. Även ersättning från nätbolaget för tillhandahållande av

efterfrågefleksibilitet nämndes. Respondenterna poängterade då att de ekonomiska vinsterna för att tillhandahålla en flexibilitetstjänst på en marknad måste ligga på en nivå som kompenserar för eventuella inkomstbortfall eller högre utgifter.

En ytterligare drivkraft som nämndes är högupplöst övervakning av elförbrukningen (var 15:e minut) eftersom det möjliggör en mer exakt prissättning som kan stimulera lasthantering inom industrin. Det efterfrågades även programvaror med realtidsövervakning och balansering av tillgång och efterfrågan på el, som kan hjälpa företag att bidra med flexibilitet på efterfrågesidan.

Goodwill och efterfrågan från kunderna var andra drivkrafter för användarflexibilitet inom industrin, eftersom företagen kunde profilera sig som fossilfria.

Samarbete mellan aktörer lyftes fram som en möjliggörare och en drivkraft för lösningar som kräver kompetens och kunskap från olika kompetensområden och/eller stora investeringar. Ett sådant exempel är implementeringen av elektrolysörer för väteproduktion.

Respondenterna önskade ett nationellt energicenter som samordnar riktad forskning och hjälper företag att implementera nödvändiga system och lösningar. Bidrag från staten för att utföra förstudier och pilotstudier ansågs också vara en drivkraft.

Diskussion

Projektets övergripande målsättning var att öka kunskapen om hur användarflexibilitet inom och samverkan mellan FJV-sektorn, elsektorn och industrisektorn kan bidra till ett resurseffektivt framtida energisystem med en ökad andel intermittent förnybar elproduktion (vindkraft och solel) och en ökad användning av industriell överskottsvärme. Resultaten har sammanfattats ovan. I detta avsnitt sätts de in i ett energisammanhang så att deras konsekvenser för utvecklingen av ett hållbart energisystem lyfts fram. Avsnittet innehåller även några rekommendationer till företag och till politiska beslutsfattare.

Vad betyder resultaten för utvecklingen av ett hållbart energisystem?

Omställningen till ett förnybart energisystem innebär en större andel intermittent elproduktion såsom vindkraft och solel. Då andelen elproduktionsanläggningar som kan användas för reglering på tillförselsidan minskar behöver elsystemet regleras även genom flexibel användning. Bidraget från driftstyrning av KVV och värmepumpar för att minska överskottselen ökar med ökande vindkraftsproduktion. I motsats till detta ger användarflexibilitet i industriella processer ett större bidrag vid lägre mängder vindkraftsproduktion. Däremot, i praktiken har industrin mindre möjligheter till användarflexibilitet, vilket till stor del beror på kontinuerliga processer och att produktionskapaciteten är anpassad efter efterfrågan. Avsaknad av överkapacitet minskar möjligheten till flexibel elanvändning. Tröga system såsom kylrum och hållugnar har större potential att fungera som flexibla elanvändare.

För att möjliggöra en ökad andel vindkraftsproduktion i vårt energisystem utan att minska landets energiförsörjningssäkerhet är det också viktigt att investera i kraftelektronik och utveckla styrsystem som möjliggör att även vindkraftverk bidrar till balanshantering i nätet. Om vindkraftverken inte kan bidra till balanshanteringen så kan inte hela potentialen genom driftstyrningen av KVV, värmepumpar och flexibla elbehov uppnås.

I dagsläget motiveras flexibel elanvändning av höga priser på el och det gäller framförallt elintensiv industri. Ytterligare ekonomiska incitament för att erbjuda flexibilitetstjänster saknas.

Rekommendationer

- *Transparenta och ekonomiskt attraktiva ersättningsnivåer för flexibilitetstjänster.* För att driva en ökad användarflexibilitet behövs flexibilitetsmarknader med trovärdighet som erbjuder ersättningsnivåer som kompenserar för kostnader och inkomstbortfall. Olika användare bör kunna erbjudas olika ersättningsnivåer beroende på vilken process som utgör flexibilitetstjänst eftersom det kan vara kopplat till olika kostnader och inkomstbortfall.
- *Öka kunskapen om användarflexibilitet.* Statliga satsningar för att öka kunskapen om användarflexibilitet och hur det kan implementeras i olika sektorer och branscher kan vara en drivande åtgärd för en ökad flexibilitet i energisystemet.
- *Etablera statliga och regionala stödfunktioner.* Dessa kan hjälpa och guida företag att kartlägga sina möjligheter att erbjuda flexibilitetstjänster, samt stödja vid implementering av system och lösningar.
- *Statliga investeringsbidrag.* Investeringsbidrag för installation av styrsystem eller bidrag för förstudier och pilotstudier kan fungera som en drivkraft.
- *Utveckla och testa smarta system.* Utveckling och testning av smarta styrsystem som kan prediktera elproduktion och elbehov samt balansera elsystemet i realtid bör stimuleras.
- *Se över elskatten.* Elflexibilitet i värmesektorn hindras av höga elskatter och här behövs en översyn av hur detta kan justeras beroende på olika regionala förutsättningar och olika situationer.
- *Stimulera samarbete mellan sektorer.* Samarbete mellan sektorer och inom sektorer är en viktig pusselbit i energiomställningen. Det behövs kunskapsutbyte och samverkan mellan olika kompetenser. Stora investeringar kan även bli möjliga genom gemensamma investeringsåtaganden.
- *Främja forskning inom användarflexibilitet och smarta system.* Ytterligare forskning kring hur sektorssamverkan kan stimuleras och realiseras rekommenderas.

- *Omformning av alla sektorer måste ske utifrån ett holistiskt angreppssätt. Det krävs omformning av alla sektorer för att utveckla infrastrukturer som kan stödja strategier som kan öka flexibilitet i vårt energisystem.*
- *Investera i ny teknik som kan öka flexibilitet i elsystemet. Driftstyrning av KVV, värmepumpar och flexibla industriella processer är inte tillräckligt utan måste kombineras med andra strategier, t.ex investering i ny teknik såsom elektrolysörer för vätgasproduktion och batterilager.*

Publikationslista

Johansson, M.T., Djuric Ilic, D. (2022) Incentives and barriers to flexible operations of industrial processes and district heating production to increase intermittent renewable electricity production – an interview study with involved actors. Proceedings of ECEEE Summer Study 2022, Hyères, France 6–11 June 2022. *Sammanfattning: Artikeln syftar till att undersöka vilka möjligheter värmesektorn och industrin har att fungera som flexibla elanvändare, samt vilka hinder och drivkrafter som föreligger. Resultaten visar att produktion av värme med elpannor och värmepumpar vid effektöverskott i systemet hindras av höga elskatter. Vidare har industriföretag med kontinuerlig produktion som går på maxkapacitet små möjligheter till användarflexibilitet. Batchvisa processer har större möjlighet till flexibilitet. Trovärdiga flexibilitetsmarknader som erbjuder en ersättning för flexibilitetstjänster som täcker företagets eventuella ökade kostnader och minskade intäkter kan fungera som en drivkraft. Vätgasproduktion genom elektrolys kan möjliggöra flexibilitet i både energi- och industrisektorn.*

Cruz, I., Djuric Ilic, D., Johansson, M.T. (2022) Flexible energy system - interactions between industry, district heating and power sector to increase renewable energy penetration. Manuskript. *Sammanfattning: Artikeln syftar till att undersöka teoretiska potentialer för att öka flexibilitet i elsystemet i Sverige genom styrning av industriella processer, samt värmepumpar och kraftvärmeverk i fjärrvärmesektorn. Ökad flexibilitet kan bidra till att möjliggöra en ökad andel av intermittent elproduktion (framför allt vindkraft, upp till 55TWh per år) i landet utan att det påverkar vår energiförsörjningssäkerhet. Två parametrar användes för att analysera potentialen: import av el och överskott av el som inte kan exporteras på grund av begränsningar i nätkapacitet. Resultaten visar att för att ha möjlighet att utnyttja hela potentialen av dessa strategier så måste det samtidigt investeras i tekniker som skulle möjliggöra att även vindkraftverk bidrar till balanshanteringen i nätet. Om vindkraftverk kan bidra till balanshanteringen i nätet och om alla strategier används kommer den importerade elen att minska med 36 %.*

Referenser, källor

Amiri, S. 2013. Economic and environmental benefits of CHP based district heating systems in Sweden. Doktorsavhandling: Linköping Studies in Science and Technology Nr. 1524.

- Albadi, M.H., El-Saadany, E.F. 2010. Overview of Wind Power Intermittency Impacts on Power Systems. *Electric Power Systems Research*, 80, 627–632.
- Broberg Viklund, S. 2015. System studies of the use of industrial excess heat. Doktorsavhandling: Linköping Studies in Science and Technology Nr. 1679. ISBN 978-91-7519-042-6.
- Connolly, D., Mathiesen, B.V. 2014. A Technical and Economic Analysis of One Potential Pathway to a 100% Renewable Energy System. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 1, 7–28
- Cruz, I. 2022a. Evaluating the utilization of industrial excess heat from an energy systems perspective. Licentiatavhandling: Linköping Studies in Science and Technology Nr. 1926. ISBN 987-91-7929-233-1.
- Cruz, I., Djuric Ilic, D., Johansson, M.T. 2022b. Flexible energy system - interactions between industry, district heating and power sector to increase renewable energy penetration. Manuskript.
- Cui, H., och Zhou, K. 2018. Industrial power load scheduling considering demand response. *Journal of Cleaner Production*, 204, 447-460.
- Danestig, M. 2009. Efficient heat supply and use from an energy system and climate perspective. Doktorsavhandling: Linköping Studies in Science and Technology Nr. 1242.
- Difs, K. 2010. District heating and CHP – local possibilities for global climate change mitigation. Doktorsavhandling: Linköping Studies in Science and Technology Nr. 1336.
- Djuric Ilic D., 2014. With district heating toward a sustainable future - System studies of district heating and cooling that interact with power, transport and industrial sectors Doktorsavhandling: Linköping Studies in Science and Technology Nr. 1601.
- Djuric Ilic D and Trygg L. 2014. Economic and environmental benefits of converting industrial processes to district heating. *Energy Conversion and Management* 87: 305-317.
- Domínguez-García, J.L., Gomis-Bellmunt, O., Bianchi, F.D., Sumper, A. 2012. Power Oscillation Damping Supported by Wind Power: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 4994–5006.
- Ekelöv, K., Jahedi, M., Holmberg, U., Moshfegh, B. 2018. Kylning av stål med Impinging Jet. Slutrapport Mars 2018, LiU - Research report. Tillgänglig på: <https://liu.se/dfsmedia/dd35e243dfb7406993c1815aaf88a675/25514-source/options/download/slutrapport-impinging-jet-2018-liu>
- Energiföretagen Sverige. 2020. Fjärrvärmestatistik. Tillgänglig på: <https://www.energiforetagen.se/statistik/fjarrvarmestatistik/>.

- Energimyndigheten. 2012. Utvecklingsplattformen Industri. ER 2015:28 UP-rapport Energiintensiv industri.
- Energimyndigheten och SCB, 2018. Electricity supply, district heating and supply of natural gas 2017. Final statistics. EN 11 SM 1801.
- Energimyndigheten. 2020a. Energy in Sweden 2020 - An Overview. Eskilstuna, Sweden.
- Energimyndigheten. Statistics. 2020b. Tillgänglig online: <https://www.energimyndigheten.se/en/facts-and-figures/statistics/> (besökt 1 mars 2020).
- Energimyndigheten, 2022. Statistics database: Annual energy balance – Electricity consumption in industry by branch of industry from 1990.
- Energiöverenskommelsen, 2016. Fem-parti-överenskommelsen om energi. (S, M, MP, C, KD). Publicerad 6 juni, 2016.
- European Commission, 2011. Energy Roadmap 2050, COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN.
- European Parliament. 2012. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency. Off. J. Eur. Union, vol. L315/1.
- Globala målen för hållbar utveckling, 2017. Sverige och Agenda 2030 — rapport till FN:s politiska högnivåforum 2017 om hållbar utveckling (Mål 13).
- Grönkvist, S., och Sandberg, P., 2006. Driving Forces and Obstacles with Regard to Co-operation between Municipal Energy Companies and Process Industries in Sweden. Energy Policy, Vol. 34, s. 1508-1519.
- Gustafsson, M. S., Myhren, J.A., Dotzauer, E., 2018. Potential for district heating to lower peak electricity demand in a medium-size municipality in Sweden. Journal of Cleaner Production 186, 1-9.
- IEA. 2015. Annex XV: Industrial Excess Heat Recovery – Technologies and Applications. Final Report. Tillgänglig från: <https://iea-industry.org/app/uploads/annex-15-final-report-phase-1-appendix-1.pdf>
- IPCC, 2001. Climate Change 2001: Synthesis Report', Eds. R T Watson and the Core Writing Team, Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment.
- Report of the International Panel on Climate Changes, University Press, New York, USA.
- IVA. 2017. Future Electricity Production in Sweden.
- Johansson, M.T. 2014. Improved energy efficiency and fuel substitution in the iron and steel industry. Linköpings universitet. Doktorsavhandling: Linköping Studies in Science and Technology Nr. 1586. ISBN 978-91-7519-367-0.

- Jordehi, A.R. 2019. Optimisation of demand response in electric power systems, a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 308-319.
- Karlsson, M. 2002. Analysing strategic energy-related investments in process industries : applied studies at a pulp and board mill. Linköpings universitet. Doktorsavhandling: Linköping Studies in Science and Technology Nr. 791. ISBN 91-7373-476-4.
- Karlsson, M., Gebremedhin, A., Klugman, S., Henning, D., Moshfegh, B. 2009. Regional energy system optimization – Potential for a regional heat market. *Appl. Energy*, 86(4), 441–451.
- Kelley, M.T., Baldick, R., Baldea, M. 2019. Demand Response Operation of Electricity-Intensive Chemical Processes for Reduced Greenhouse Gas Emissions: Application to an Air Separation Unit. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(2),1909-1922.
- Klugman, S. 2008. Energy systems analysis of Swedish pulp and paper industries from a regional cooperation perspective: Case study modeling and optimization. Linköpings universitet. Doktorsavhandling: Linköping Studies in Science and Technology Nr. 1194. ISBN 978-91-7393-874-7.
- Kvale, S., Brinkmann, S., 2014. Den kvalitativa forskningsintervjun (3rd ed.), Studentlitteratur.
- Kovala, T., Wallin, F., Hallin, A. 2016. Factors influencing industrial excess heat collaborations. *Energy Procedia*, 88, 595-599.
- Kundur, P., Balu, N.J., Lauby, M.G. 1994. *Power System Stability and Control*; McGraw-hill New York, Vol. 7.
- Lund, R., Djuric Ilic, D., Trygg, L., 2016. Socioeconomic potential for introducing large-scale heat pumps in district heating in Denmark. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 139, s. 219-229.
- Lund, H., Mathiesen, B., Connolly, D., Østergaard, P.A. 2014. Renewable Energy Systems - A Smart Energy Systems Approach to the Choice and Modelling of 100 % Renewable Solutions. *Chemical Engineering Transactions*, 39, 1-6.
- Lund, H. och Münster, E., 2014. Integrated energy systems and local energy markets. *Energy Policy*, 34(10), 1152-1160.
- Lund, H., Thellufsen, J.Z. 2020. EnergyPLAN - Advanced Energy Systems Analysis Computer Model.
- Lund, H., Thellufsen, J.Z., Østergaard, P.A., Sorknæs, P., Skov, I.R., Mathiesen, B.V. 2021. EnergyPLAN – Advanced Analysis of Smart Energy Systems. *Smart Energy*, 1, 100007.
- NE (Nationalencyklopedin). 2019. Laststyrning. <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/laststyrning> (hämtad 2019-01-31)

- Nohlgren, I., Herstad Svärd, S., Jansson, M., Rodin, J. 2014. El från nya och framtida anläggningar, Elforsk rapport 14:40.
- Nord Pool. 2022. Nord Pool Market Data. Tillgänglig online: <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/#/nordic/table> (besökt 15 juni 2022).
- Reinfeldt, F., och Lööf, A., 2013. Genomförande av energieffektiviseringsdirektivet. Regeringens proposition 2013/14:174, Stockholm.
- Rodríguez-García, J., Álvarez-Bel, C., Carbonell-Carretero, J.-F., Escrivá-Escrivá, G., Calpe-Esteve, C. 2018. Design and validation of a methodology for standardizing prequalification of industrial demand response resources. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(6), 6118-6127.
- Sandberg, P. 2004. Optimisation and co-operative perspectives on industrial energy systems. Linköpings universitet. Doktorsavhandling: Linköping Studies in Science and Technology Nr. 913. ISBN 91-85295-95-7.
- Sandvall, A. F., Börjesson, M., Ekvall, T., Ahlgren, E. O. 2015. Modelling environmental and energy system impacts of large-scale excess heat utilisation – A regional case study, *Energy*, 79, 68–79.
- SCB. 2020. Årlig Energistatistik (El, gas och fjärrvärme). Tillgänglig online: <https://scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/energi/tillforsel-och-anvandning-av-energi/arlrig-energistatistik-el-gas-och-fjarrvarme/>.
- Sköldberg, H., Unger, T., Holmström, D., 2015. El och fjärrvärme – samverkan mellan marknaderna. Fjärrsyn rapport 2015:223.
- Sorknæs, P., Andersen, A.N., Tang, J., Strøm, S. 2013. Market Integration of Wind Power in Electricity System Balancing. *Energy Strategy Reviews*, 1, 174–180.
- SOU, 2005. SOU 2005:033 Fjärrvärme och kraftvärme i framtiden. Betänkande av fjärrvärmeutredningen.
- Svenska Kräfteföretagen. 2020. Rapporter och remissvar. Tillgänglig online: <https://www.svk.se/om-oss/rapporter-och-remissvar/> (besökt 1 mars 2020).
- Svensson I.L. 2011. Evaluating system consequences of energy co-operation between industries and utilities. Doktorsavhandling: Linköping Studies in Science and Technology Nr. 1407. ISBN 978-91-7393-035-2.
- Söder, L., 2014. På väg mot en elförsörjning baserad på enbart förnybar el i Sverige. *Svensk Energi*, 2014. Elåret & Verksamheten 2013.
- Söder, L., Larsson S., Dahlbäck N., Linnarsson J. 2014. Reglering av ett framtida svenskt kraftsystem - reglering av stora mängder vindkraft. NEPP rapport
- Söder, L., 2018. Muntlig källa

Tarroja, B., Mueller, F., Eichman, J.D., Samuelson, S. 2012. Metrics for Evaluating the Impacts of Intermittent Renewable Generation on Utility Load-Balancing. *Energy*, 42, 546–562.

Werner, Sven, 2016. *Energiförsörjning – En introduktion till vårt energisystem*; Studentlitteratur AB, Lund.

Werner, S., 2017. District heating and cooling in Sweden. *Energy*, Vol. 126, 419-429.

Wolf, A. 2007. *Industrial symbiosis in the Swedish forest industry*. Linköpings universitet. Doktorsavhandling: Linköping Studies in Science and Technology Nr. 1065. ISBN 978-91-85895-86-1.

Østergaard, P.A. 2015. Reviewing EnergyPLAN Simulations and Performance Indicator Applications in EnergyPLAN Simulations. *Applied Energy*, 154, 921–933.

Bilagor

Bilaga 1. Administrativ bilaga

Bilaga 2_Conference_article_KÄNSLIG INFORMATION (*Johansson, M.T., Djuric Ilic, D. (2022) Incentives and barriers to flexible operations of industrial processes and district heating production to increase intermittent renewable electricity production – an interview study with involved actors. Proceedings of ECEEE Summer Study 2022, Hyères, France 6–11 June 2022.*)

Bilaga 3_Journal_article_KÄNSLIG INFORMATION (*Cruz, I., Djuric Ilic, D., Johansson, M.T. (2022) Flexible energy system - interactions between industry, district heating and power sector to increase renewable energy penetration. Manuskript*)