

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Nya krafter, nya nätverk: om framväxt, spridning och konsekvenser av alternativa elsystemarkitekturer	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska New networks of power: on the emergence, diffusion and impact of alternative electricity system architectures	
Universitet/högskola/företag Chalmers tekniska högskola	Avdelning/institution Miljösystemanalys/Teknikens ekonomi och organisation
Adress 412 96 Göteborg	
Namn på projektledare Björn Sandén	
Namn på ev övriga projektdeltagare Harald Rohrer, Mikael Odenberger, Helene Ahlberg, Dick Magnusson, Lisa Göransson, Kristina Hojckova, Verena Heinisch, Fredrik Envall	
Nyckelord: 5-7 st energiomställning, elsystem, smarta nät, prosumenter, experiment	

Förord

Projektet utgör en del av Forskarskola Energisystem, ett program finansierat av Energimyndigheten i syfte att stimulera tvärvetenskaplig forskning om energisystemet och bygga kompetens kring samspelet mellan teknik och samhälle. 2015 startade tio doktorander i programmet, uppdelade på fyra projekt. Det här avrapporterade projektet utgjorde ett av dessa projekt och genomfördes som tre doktorandarbeten placerade i olika forskarmiljöer, två på Chalmers tekniska högskola på institutionerna Teknikens ekonomi och organisation och Rymd-, geo- och miljövetenskap och ett på Tema T på Linköpings universitet. Denna slutrapport fokuserar på några övergripande slutsatser. För mer detaljerade resultat rekommenderar vi de tre avhandlingarna och deras ingående delarbeten.

Innehållsförteckning

Förord.....	1
Innehållsförteckning	1
Sammanfattning	2
Summary	3
Inledning/Bakgrund	3
Genomförande	4
Resultat och diskussion.....	4
Publikationslista.....	7
Bilagor	8

Sammanfattning

Snabbt sjunkande kostnader för ny teknik som småskalig förnybar elproduktion, energilagring, informationsteknik och teknik för högspänd likström utmanar det etablerade elsystemet och öppnar nya utvecklingsvägar. Projektets syfte var att följa denna omställning och identifiera kritiska faktorer för utvecklingen samt hur olika aktörer påverkar och påverkas av utvecklingens riktning. Projektet genomfördes i form av tre doktorandprojekt på Chalmers tekniska högskola och Linköpings universitet. Projektet ingick i Forskarskola Energisystem. I delprojekten användes kvantitativa teknoekonomiska optimeringsmodeller, kvalitativa teknologiska innovationssystemmodeller och en STS-ansats.

I projektet har vi identifierat flera parallella utvecklingstendenser som pekar i delvis motsägelsefulla riktningar: från framväxten av system baserade på oberoende prosumenter, till prosumenter sammankopplade i mindre eller större smarta nät, system där städer utvecklar ett större oberoende från resten av nätet och nät optimerade på en kontinental eller global skala. En avgörande fråga handlar om på vilken systemnivå man försöker balansera utbud och efterfrågan genom systemintegration, och hur man gör detta. De nya tekniska möjligheterna och nya utsikter för ekonomisk optimering på olika systemnivåer gör att aktörers skilda och ibland motstående intressen får en allt större betydelse för åt vilket håll utvecklingen kan tippa. Utvecklingens riktning blir lika mycket en fråga om kultur och politik som om teknik. Makten över systemet står på spel.

I denna osäkra situation pågår många processer där både nya och gamla aktörer söker kunskap och försöker konsolidera sina positioner eller vinna ny terräng. I våra studier av experiment i Sverige, USA och Australien ser vi hur etablerade aktörer försöker försvara sina positioner medan nya aktörer kämpar för att etablera alternativa strukturer. En central fråga handlar om hur experiment designas, vilka politiska diskurser som styr, vilka aktörer som tillåts delta och vilket lärande som uppstår eller uteblir. En annan fråga rör hur nya entreprenörer kan dra nytta av resurser utanför (eller innanför) det lokala elsystemets rigida strukturer för att bygga nya typer av system.

Resultatet av detta projekt är inte ett entydigt svar på i vilken riktning elsystemen går i världen, Europa eller Sverige. Vi tror dock att projektet bidrar med empiriska resultat som visar på viktiga drivkrafter och motkrafter för utveckling i olika riktningar. Projektet har även genererat nya modeller för att kvantitativt utvärdera optimering på olika systemnivåer, nya kvalitativa innovationssystemmodeller för att analysera framväxten av alternativa teknologiska system och ett nytt perspektiv på vilken roll experiment som demonstrationsprojekt spelar, och kan spela, i omställningsprocesser.

Summary

Rapidly declining costs for new technology such as small-scale renewable electricity production, energy storage, information technology and technology for high-voltage direct current are challenging the established electricity system and opening up new development paths. The purpose of the project was to follow this development and identify critical factors for the transition and how different actors affect and are affected by the direction of the change. The project was carried out in the form of three doctoral student projects at Chalmers University of Technology and Linköping University. The project was part of Forskarskola Energisystem. The subprojects used quantitative techno-economic optimization models, qualitative technological innovation system models and an STS approach.

In the project, we have identified several parallel trends that point in different contradictory directions: from the emergence of systems based on independent prosumers, to prosumers connected in smaller or larger smart grid, systems where cities develop greater independence from the rest of the grid as well as grids balanced at the continental or global scale. A crucial question is at which system level supply and demand of electricity is balanced through system integration, and how this is done. The new technical possibilities and new prospects for economic optimization at different system levels mean that the different and sometimes opposing interests of actors are becoming increasingly important. The direction of change becomes as much a question of culture and politics as of technology. The power over the system is at stake.

In this uncertain situation, many processes are underway where both new and old players seek knowledge and try to consolidate their positions or gain new ground. In our studies of experiments in Sweden, the USA and Australia, we see how established actors try to defend their positions while new actors struggle to establish alternative structures. A central question is about how experiments are designed, which political discourses govern these, which actors are allowed to participate and what learning is gained or lost. Another issue concerns how new entrepreneurs can take advantage of resources outside (or inside) the rigid structures of the local electricity system to create new solutions.

The result of this project is not an distinct answer to the question in which direction the electricity systems are heading in the world, Europe or Sweden. However, we believe that the project contributes with empirical results that show important driving forces and counterforces for development in different directions. The project has also generated new models for quantitatively evaluating optimization at different system levels, new qualitative innovation system models for analyzing the emergence of alternative technological systems and a new perspective on the role experiments and demonstration projects play and can play in the energy transition.

Inledning/Bakgrund

Projektets utgångspunkt var att snabbt sjunkande kostnader för småskalig förnybar elproduktion, energilagring och informationsteknik gör att elsystemen står

inför en radikal förändring. I ansökan skissade vi på två alternativa utvecklingsvägar, en som leder mot smarta nät där den ökande andelen variabel förnybar småskalig produktion leder till intensifierad handel med el, och en alternativ väg som i stället leder till ökat oberoende genom frånkoppling från elnäten och mer lokal energilagring. Projektets syfte var att följa denna utveckling och identifiera kritiska faktorer för utvecklingen samt hur olika aktörer påverkar och påverkas av omställningens riktning.

Genomförande

Projektet genomfördes som tre fristående doktorandprojekt, med fortlöpande möten, seminarier och avstämningar mellan projekten. Under dessa möten formades nya idéer, förslag till forskningsfrågor och möjliga fallstudier och det gavs utrymme att pröva nya tankar och presentationer av resultat i en tvärvetenskaplig miljö. De tre doktorandprojekten ingick i forskarskola Energisystem som erbjöd en än bredare miljö för lärande.

I ett av delprojekten användes teknoekonomiska optimeringsmodeller för att analysera ekonomiska konsekvenser av att optimera på lägre systemnivåer från enstaka hushåll till grupper av hushåll och städer i stället för att optimera hela det nordiska elsystemet som en enhet, samt betydelsen av att integrera stadens elsystem med värme- och transportsektorn (elbilsladdning). I det andra delprojektet identifierades först tre alternativa extrema systemkonfigurationer (som spänner upp ett möjligt utfallsrum). Därefter användes ett innovationssystemramverk för att undersöka hinder och drivkrafter för två av dessa alternativ: smarta nät och det globala supernätet, bland annat genom studier av entreprenöriella experiment i USA och Australien. I det tredje delprojektet studerades fyra experiment kring smarta nät i Sverige med en STS-ansats för att utröna experimentens design, politiska innehåll och vidare effekter samt olika aktörers inflytande över experimenten.

Två projekt avslutas med sammanläggningsavhandlingar med fem till sex ingående artiklar per avhandling och en med en monografi. Kristina Hojckova försvarade sin avhandling "Emerging networks of power: Exploring sociotechnical pathways towards future electricity systems based on renewable energy technologies" den 26 november 2020. Fredrik Envalls försvarar avhandlingen "Experimenting for change? The politics of accomplishing environmental governance through smart energy pilot projects" den 5 februari 2021 och Verena Heinisch kommer att försvara sin avhandling i April 2021.

Resultat och diskussion

I projektet har utgångspunkten nyanserats. En avgörande fråga handlar om på vilken systemnivå man försöker balansera utbud och efterfrågan genom systemintegration. Ordet "man" skall här förstås som en variabel som går att fylla med olika typer av aktörer, eller ett systemiskt resultat av många aktörers handlingar.

I början av 1900-talet var svaret på frågan om lämplig integrationsnivå inte självklart. Efter att lokal produktion och små system initialt hade dominerat, började näten växa. Att bygga större nät för att nå lägre systemkostnad utvecklades till en vägledande norm inom det elektrotekniska fältet och i mellankrigstiden fanns en drivkraft mot transnationella nät, i synnerhet i Europa (Hojckova et al 2020b). Nationalistiska strömningar bromsade dock den utvecklingen och 1900-talet kom att präglas av systembalansering, integration och optimering på den nationella nivån. Under de senaste tre decennierna har den inriktningen utmanats av både ny teknik och kulturella strömningar som förändrar både vad som är möjligt och vad som många ser som önskvärt. Utvecklingen är dock på inget sätt entydig. I projektet har vi identifierat flera parallella utvecklingstendenser som pekar i olika motsägelsefulla riktningar: från framväxten av små oberoende prosumenter ("off-grid") till prosumenter sammankopplade i mindre eller större smarta nät ("smart-grid") till nät optimerade på en skala vi tidigare inte sett ("super-grid") (Hojckova et al 2017).

Våra resultat visar att den gamla tanken om transnationella nät, utkristalliserad i visionen om ett supernät, har fått näring genom utvecklingen av ny teknik för högspänd likström och den allmänna globaliseringen av ekonomi och kultur (Hojckova et al 2020b). I den extrema varianten av den visionen balanseras storskalig sol- och vindproduktion med efterfrågan från världens befolkningscentrum på den globala nivån. I den andra änden av skalan öppnar billiga solceller och batterier och en kultur präglad av ökande individualism för en balansering på hushålls- eller företagsnivån (Heinisch et al 2019a). Våra resultat visar också att det finns många intressanta nivåer däremellan. Om några få hushåll går samman och skapar en elgemenskap kan man kraftigt minska kostnaden för antingen köpt el från det större nätet eller för behov av batterilagring (Heinisch et al 2019b). I bostadsområden på olika håll i världen skapas små elnät, där man testar ny teknik, som blockkedjor, för att hantera utbytet (Hojckova et al 2020a). Även på nivåer mellan de gamla nationella elnäten och de nya mikronäten kan det uppstå nya möjligheter. På stadsnivån kan optimerad värmeproduktion och laddning av elbilar skapa nya synergier (Heinisch et al 2019c, Heinisch et al 2020).

Alla nya tekniska möjligheter och nya utsikter för ekonomisk optimering på olika systemnivåer, gör att olika aktörers skilda intressen kan få en allt större betydelse för åt vilket håll utvecklingen tippas. Makten över systemet står på spel.

I denna osäkra situation pågår många processer där både nya och gamla aktörer söker kunskap och försöker konsolidera sina positioner eller vinna ny terräng. Även myndigheter som den svenska Energimyndigheten deltar som aktör genom att finansiera experiment och större demonstrationsprojekt. Vår studie av "smarta nät"-projekten i Malmö, Stockholm, Västerås och på Gotland visar att sådana experiment inte endast kan betraktas som arenor för objektiva kunskapssökande utan bör betraktas som politiska projekt, i så måtto att de motiveras av och tydligt formas av vissa politiska mål, t.ex. en kombination av energi- och

industripolitiska mål i en anda av ekologisk modernism (Envall 2021). Projekten visar hur styrandet ("governance") av omställningen går till i praktiken. Vidare formas projekten ofta i existerande nätverk av aktörer med stora resurser. Detta leder till att etablerade aktörer på energimarknaden i hög utsträckning får stor makt över experimentens design och inriktning, vilket per automatik leder till att andra aktörer och alternativa systemkonfigurationer får litet utrymme, vilket begränsar lärandet. I ett par av de studerade fallen utvecklades dock en bredare syn på experimentets roll över tid (Envall 2021). Vi observerade samma konflikt mellan etablerade aktörer och nya entreprenörer i experiment i USA (New York) och Australien (Freemantle) (Hojckova 2020a). Störst framgång hade de nya entreprenörerna i Australien där de fann ett utrymme att bygga upp en egen styrka i en skyddad nisch samtidigt som de kunde hämta resurser från och samverka lokalt och globalt med aktörer i andra branscher som byggindustrin och finanssektorn. Australien kan samtidigt vara det land i världen där elsektorns gamla aktörer är först med att på allvar känna hotet från den småskaliga soletproduktionen, vilket gör dem mer öppna för nya samarbeten och innovation. Trots detta misslyckades de i experiment med att förstå och möta prosumenternas intressen och önskemål (Hojckova 2020b, Wilkinsson et al 2020). Samtidigt är det uppenbart att det är betydligt lättare att skapa lärande genom experiment kring de småskaliga lösningarna, jämfört med de få, tidskrävande och kapitalintensiva projekt som krävs för att utveckla storskaliga supernät (Hojckova 2020b).

I vissa fall kan aktörer ansvariga för funktionen på en högre nivå se en nytta i större lokal autonomi, som när städer minskar efterfrågan på el från det nationella transmissionsnätet (Heinisch et al 2021), eller när prosumenter installerar lagring och därmed minskar antalet problematiska effektoppar i nätet. Men på alla nivåer finns i grunden en konflikt mellan integration och minimering av total systemkostnad å ena sidan och flexibilitet och egenkontroll å den andra. På den internationella arenan, i diskussionen om ett globalt supernät, finns en spänning mellan den lockande möjligheten att på ett effektivt sätt dela på världens resurser av förnybar energi och fruktan att bli beroende av främmande makt. Just nu framstår integration inom EU och inom Kina som betydligt mer sannolikt än sammankoppling av världsdelarna (Hojckova 2020b). Att överlåta laddningen av din elbil till en systemoperatör i staden kan minska stadens elbehov men också minska din kontroll över din bil (Heinisch et al 2020), och att samverka med grannarna kan kanske både kännas mindre och mer begränsande än att tvingas köpa och sälja elen på en marknad, allt beroende på den sociala kontexten. Elsystemets design är än en gång en öppen fråga, långt ifrån ett tekniskt optimeringsproblem där elektriska strömmar och spänningar skall matchas. Elsystemet är nu även en social arena för möten och matchning mellan kulturella strömningar och politiska spänningar.

Resultatet av detta projekt är inte ett entydigt svar på i vilken riktning elsystemen går i världen, Europa eller Sverige. Vi tror dock att projektet bidrar med empiriska resultat som visar på viktiga drivkrafter och motkrafter för utveckling i olika riktningar. Projekten har även genererat nya modeller för att kvantitativt utvärdera optimering på olika systemnivåer (Heinisch 2021), nya kvalitativa

innovationsmodeller för att analysera framväxten av alternativa teknologiska system (Hojckova 2020a) och ett nytt perspektiv på vilken roll experiment och demonstrationsprojekt egentligen spelar i omställningsprocesser (Envall 2021), vilka alla kan bidra i den fortsatta kunskapsbildningen och samhällsdiskussionen kring elsystemens framtid. Vidare innehåller studierna teoretiska bidrag och generella observationer med tillämpning på omställningsprocesser bortom elsystemet.

Publikationslista

Andersson, J., Hojcková, K., Sandén B. (2020) Clarifying the focus and improving the rigour of sustainability transitions research on emerging technologies. IST 2020 Conference paper.

Duvignau, R., V. Heinisch, L. Göransson, V. Gulisano, and M. Papatriantafilou. "Small-Scale Communities Are Sufficient for Cost- and Data-Efficient Peer-to-Peer Energy Sharing," e-Energy 2020 - Proceedings of the 11th ACM International Conference on Future Energy Systems, 35–46, 2020. <https://doi.org/10.1145/3396851.3397741> .

Envall, F. (2021). "Experimenting for change? The politics of accomplishing environmental governance through smart energy pilot projects". PhD Thesis. Technology and Social Change – Tema T, Linköping University.

Heinisch, Verena, Mikael Odenberger, Lisa Göransson, and Filip Johnsson (2019a). "Prosumers in the Electricity System—Household vs. System Optimization of the Operation of Residential Photovoltaic Battery Systems." *Frontiers in Energy Research* 6. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00145>.

Heinisch, Verena, Mikael Odenberger, Lisa Göransson, and Filip Johnsson (2019b). "Organizing Prosumers into Electricity Trading Communities: Costs to Attain Electricity Transfer Limitations and Self-sufficiency Goals." *International Journal of Energy Research*, July 25, er.4720. <https://doi.org/10.1002/er.4720>.

Heinisch, Verena, Lisa Göransson, Mikael Odenberger, and Filip Johansson (2019c). "Interconnection of the Electricity and Heating Sectors to Support the Energy Transition in Cities." *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management* 24 (October 11, 2019). <https://doi.org/10.5278/ijsepm.3328>.

Heinisch, Verena, Lisa Göransson, Rasmus Erlandsson, Henrik Hodel, Filip Johnsson, Mikael Odenberger (2020). "Smart electric vehicle charging strategies for sectoral coupling in a city energy system", submitted for publication (2020)

Heinisch, Verena, Lisa Göransson, Mikael Odenberger, and Filip Johansson (2021). "The impact of electricity transfer capacity between city and regional scales on energy system decarbonization" (preliminary title), to be submitted for publication.

Heinisch, Verena (2021). Title to be decided. PhD thesis, Energy technology, Space, Earth and the Environment, Chalmers University of Technology. To be published in April 2021.

Hojčková, K., Sandén, B., & Ahlborg, H. (2017). Three electricity futures: Monitoring the emergence of alternative system architectures. *Futures* 98:72-89. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2017.12.004>

Hojčková, K., Ahlborg H., Morrison G., Sandén B. (2020a) Entrepreneurial use of context for technological system creation and expansion: The case of blockchain-based peer-to-peer electricity trading. *Research Policy* 49:104046. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2020.104046>

Hojčková, K., Ahlborg H., Sandén B. (2020b) Building a global Supergrid: A sociotechnical analysis. Manuscript submitted to *Renewable & Sustainable Energy Reviews*.

Hojčková, K. (2020a). Emerging networks of power: Exploring sociotechnical pathways towards future electricity systems based on renewable energy technologies. PhD Thesis, Environmental Systems Analysis, Technology Management and Economics, Chalmers University of Technology. <https://research.chalmers.se/publication/520129>

Hojckova, K. (2020b). The challenge of peer-to-peer electricity trading pilots: Review of innovation systemic problems in the US and Australia. Manuscript submitted to *Energies*' special issue on Smart Local Energy Systems.

Wilkinson, S. J, Hojckova, K., Eon, C., Morrison, G., Sandén B. (2020). Is peer-to-peer electricity trading empowering users? Evidence on motivations and roles in a prosumer business model trial in Australia. *Energy Research and Social Science* 66:101500. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101500>

Bilagor

Administrativ bilaga