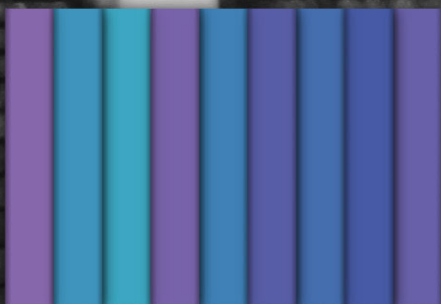


2015



**PERSPEKTIV PÅ
FÖRNYBAR EL**

CHALMERS

PERSPEKTIV PÅ FÖRNYBAR EL

2015

Redaktörer
Björn Sandén & Mikael Odenberger

Göteborg 2015

Version 2.0

E-publicerad på:

http://www.chalmers.se/sv/styrkeomraden/energi/perspektiv_ny_teknik/

Layout: BOID

Publicerad av: Chalmers

ISBN 978-91-88041-02-9

FÖRORD

MÖJLIGHETER OCH UTMANINGAR MED PRODUKTION OCH ANVÄNDNING AV EL FRÅN FÖRNYBARA ENERGIKÄLLOR

El driver en ökande mängd mänskliga aktiviteter och har utvecklats till industrisamhällets livsnerv. Trots energieffektiviserande åtgärder kommer den globala efterfrågan på elkraft sannolikt att fortsätta att växa i årtionden framöver. I sig är el en ren och lättanvänd energibärare, men produktionen av elenergi från icke-förnybara energikällor leder till klimatförändringar och miljöproblem och skapar inte sällan sociala och politiska dilemman. En radikal omställning till förnybar elkraft är därför önskvärd.

Omställningen till förnybar elenergi är dock inte problemfri. Det finns många frågor som kräver svar: Finns det tillräckligt med förnybar energi för att ersätta alla icke-förnybara energikällor? Vilken miljöpåverkan har produktion och användning av nya typer av kraftverk? Hur balanseras tillgång och efterfrågan när solen inte lyser och vinden inte blåser? Vad krävs av beslutsfattare och investerare för att en storskalig expansion av den nya tekniken skall komma till stånd och hur genomförs förändring om etablerade maktstrukturer hotas av det nya som vill in?

Det saknas slutgiltiga svar på dessa och andra viktiga frågor. Men om vi studerar förnybar el från olika perspektiv kan vi berika bilden, döda myter, klargöra konflikter och fördjupa förståelsen.

Perspektiv på förnybar el är en levande e-bok med regelbundna uppdateringar. Du kanske också vill läsa böckerna [Perspektiv på eldrivna fordon](#) och [Perspektiv på förädling av bioråvara](#).

Björn Sandén
Mikael Odenberger
Göteborg

INNEHÅLL

1.	FRAMTIDEN FÖR FÖRNYBAR ELPRODUKTION	6
2.	ÄNDRADE FÖRUTSÄTTNINGAR MED FÖRNYBAR ELKRAFT	8
3.	ÄR DE FÖRNYBARA RESURSERNA STORA NOG?	10
4.	TEKNIKER FÖR FÖRNYBAR ELPRODUKTION.....	12
5.	NÄT OCH ELENERGILAGER	14
6.	MILJÖBEDÖMNING AV FÖRNYBAR ELPRODUKTION ...	16
7.	ENERGIBALANS OCH KLIMATPÅVERKAN – EN LITEN INVESTERING GER STOR EFFEKT.....	18
8.	SKADAR MARIN ELPRODUKTION HAVENS EKOSYSTEM?.....	20
9.	UTMANINGAR MED EN ÖKAD ANDEL EL FRÅN SOL OCH VIND I ELNÄTET.....	22
10.	KAN ELANVÄNDNINGEN ANPASSAS TILL VARIERANDE ELPRODUKTION?.....	24
11.	SAMSPELET MELLAN TRADITIONELL PRODUKTION OCH FÖRNYBAR ELPRODUKTION.....	26
12.	NYTTIGGÖRANDE AV ÖVERSKOTTSEL: ELEKTROBRÄNSLEN	28
13.	HUR MÖTER ELBOLAGEN UTMANINGEN FRÅN FÖRNYBAR EL?.....	30
14.	OM KOSTNADSDISKUSSIONEN – HAR VI "RÅD MED" FÖRNYBAR EL?	32
15.	VARFÖR EN STRATEGI FÖR HAVSBASERAD VINDKRAFT?.....	34
16.	BEHOV AV INVESTERINGAR OCH KOMPETENS – EXEMPLET HAVSBASERAD VIND	36

1

FRAMTIDEN FÖR FÖRNYBAR ELPRODUKTION

Björn Sandén

Institution för Energi och miljö, Chalmers*

*Avdelning för miljösystemanalys

Elektricitet är en mycket viktig, kanske den allra viktigaste, energiformen i dagens samhälle. Elen får industrins motorer att snurra, lyser upp i mörkret och värmer och kyler våra hus och vår mat. Elen driver datorer och kommunikationsutrustning som förändrar näringsliv och relationer över hela världen och snart står även transporterna inför en omfattande elektrifiering.

Elkonsumtionen i världen har under de senaste tjugo åren ökat med ungefär tre procent per år, vilket betyder nästan en fördubbling över samma period. Det är troligt att den globala elkonsumtionen fortsätter att öka de närmsta årtiondena till följd av ökad befolkningsmängd, ekonomisk tillväxt och att el ersätter andra energibärare.

Användning av el ger i sig inga utsläpp av vare sig giftiga ämnen eller växthusgaser, men elen måste produceras på något sätt. Elproduktionen i världen är idag till 80 procent baserad på fossila bränslen och kärnkraft. Runt dessa tekniker hopar sig en lång rad problem relaterade till miljö och global säkerhet. Detta skapar en stark drivkraft att öka andelen av, eller helt gå över till, el från förnybara energikällor.

Produktion av el från förnybar energi är inte heller den helt problemfri. Olika förnybara resurser har olika stor potential och tillgången varierar både i tiden och mellan olika platser. Utnyttjandet av olika resurser kan påverka naturen och konkurrera med andra intressen. Produktionen av de kraftverk som behövs skulle kunna leda till nya miljö- och resursproblem. Till detta kan läggas problem som har med omställningen att göra. Sol- och vindkraft ställer nya krav på elsystemet. Etablerade aktörer försvarar sina positioner och gamla tankestrukturer tar lång tid att

förändra. En central fråga är hur olika aktörer, inklusive det politiska systemet, kan stödja en omställning till förnybar elproduktion som både är snabb och långsiktigt hållbar.

Den här boken, som bygger på en längre [engelsk version](#), är tänkt som en populärvetenskaplig orientering kring vad en övergång till ett elsystem baserat på förnybar el skulle kunna innebära. Boken spänner över områden som resurstillgång (kapitel 3), teknik för elproduktion och lagring (kapitel 4 och 5) och miljöeffekter (kapitel 6–8). Vidare diskuteras frågor kring hur energibalansen kan gå ihop på olika tidskalor (kapitel 9–12), hur etablerade aktörer i energibranschen och det politiska systemet har hanterat och skulle kunna hantera en omställning (kapitel 13–15), och slutligen vilka krav som ställs på kompetensförsörjning och finansiella investeringar när förnybar elproduktion skall byggas ut på stor skala (kapitel 16).

2

ÄNDRADE FÖRUTSÄTTNINGAR MED FÖRNYBAR ELKRAFT

Tomas Kåberger

Institution för Energi och miljö, Chalmers*

*Avdelning för fysisk resursteori

Under slutet på 1900-talet var vi många som argumenterade för att förnybar energi i framtiden skulle ge den billigaste elen. För sol- och vindenergi är bränslekostnaden noll, och driften borde också vara billigare eftersom solceller inte har några rörliga, mekaniska anordningar och vindkraftverk bara hade turbin och generator, i kontrast till de system för bränslehantering och vattenkokning som fossileldade anläggningar eller kärnreaktorer har.

Det som då saknades var den industriella erfarenhet som successivt sänker kostnader i de flesta branscher.

Danmark, och senare USA, Tyskland, Spanien och Kina har betalat uppbyggnaden av vindkraftsindustrin. Japan, Tyskland och sedan Kina har stått för kostnaderna för solcellsindustrins erfarenhetsuppbyggnad och kostnadssänkningar. Dessa länders satsningar har gjort att sol och vind nu nått konkurrenskraft.

Utvecklingen kan fördröjas, olika lagstiftningar kommer att avgöra vilka länder som effektivast och snabbast utnyttjar den nya tekniken. Men förnybar energi kommer att ta över stora delar av världens energiförsörjning under de närmaste decennierna. Då kommer vi att uppleva perioder när överskott på el utan marginalkostnader ger tillgång till gratis el. Men när det är mörkt och vindstilla blir det istället högt värde på el. Då kommer vattenkraftverk, biobränsleverk eller fossileldade verk kunna tjäna pengar.

Men det finns andra sätt att hantera variationer i tillgången på billig förnybar el:

- Att använda informationsteknik för att styra användningen av el till de stunder då det är god tillgång med lågt pris (till exempel smart styrning av varmvattenberedning eller luftkonditionering lagrad som is) och att undvika att använda dyr el.
- Att lagra el från när den är billig till de timmar när den är som dyrast med batteriteknik eller andra ellager.
- Att överföra el från platser där tillgången på förnybar el för tillfället är god och priset lågt, till platser där priset är högre.

Informationsteknikens utveckling de senaste decennierna har underlättat utvecklingen. Det har också den utveckling av elkablar för överföring vid höga spänningar som utvecklats i Sverige och Kina för att minska förlusterna. Slutligen har de allra senaste årens utveckling av elbilar drivit fram billigare batterier. Billiga batterier kan göra lokala elsystem med batterilagring till konkurrenskraftiga alternativ till att köpa el från nationella elnät.

När de största kraftverken gav billigast el blev världens elsystem i allmänhet monopol under statlig reglering. Små elverk med förnybar energi kan nu konkurrera ut stora kol- och kärnkraftverk. Det har gjort det möjligt att öppna elnäten för handel med el i konkurrens.

När förnybar energi blivit tillgänglig med en marginalkostnad som är nästan noll har gamla principer för uppbyggnaden av elproduktionssystem också blivit irrelevanta. Tidigare byggdes "baskraftverk" med de billigaste bränslena, som kol och uran, för att producera året om och knappt täcka den minsta förväntade konsumtionen (typiskt det elbehov som finns under nätterna den varmare delen av året). Dessutom byggdes "topplastverk", för att producera den extra el som behövdes för att i varje stund balansera den varierande konsumtionen med produktionen. Topplastverken var förhållandevis billiga att bygga men på grund av exempelvis dyrt bränsle dyra att köra.

Nu kan konsumtionen styras av vad elen kostar. Gamla baskraftverk konkurreras ut av förnybar el. Tillsammans kommer utvecklingen av teknik och marknad att ge världen ett effektivare elsystem vars låga kostnader ger möjlighet för hela världen att få en god levnadsstandard utan att förstöra för kommande generationer. De följande kapitlen handlar om hur man kan förverkliga dessa möjligheter.

3

ÄR DE FÖRNYBARA RESURSERNA STORA NOG?

Björn Sandén
Linus Hammar
Fredrik Hedenus

Institution för Energi och miljö, Chalmers*

*Avdelning för miljösystemanalys (B. Sandén, L.Hammar), Avdelning för fysisk resursteori (F. Hedenus)

Är det förnybara energiflödena stora nog för att ersätta all fossil energi och kärnkraft, och till och med öppna för ökad energianvändning? Finns det verkligen tillräckligt med sol, vindar och vattenkraft i världen för att förse tio miljarder människor med lika mycket energi som en genomsnittlig svensk använder idag? Vårt korta svar på den frågan är ja.

Att ha en känsla för potentialer, det vill säga inneboende möjligheter, är nödvändigt om man vill förstå vilken framtida utveckling som är möjlig, trolig och önskvärd. Men diskussioner om framtiden blir ofta förvirrade därför att man blandar ihop potentialer som utgår från olika sorters begränsningar. Vissa potentialer begränsas av naturlagar och fysiska flöden, andra av tekniska möjligheter, ekonomiska antaganden om kostnader och betalningsvilja eller uppskattningar av miljöpåverkan och funderingar kring social acceptans. Det är uppenbart att en del begränsningar, som naturlagar och fysiska flöden, är fasta och står sig över tid (om de är rätt uppskattade), medan andra, som ekonomiska förutsättningar, snabbt kan ändras. När potentialer diskuteras bör man därför alltid fråga sig vad som egentligen avses.

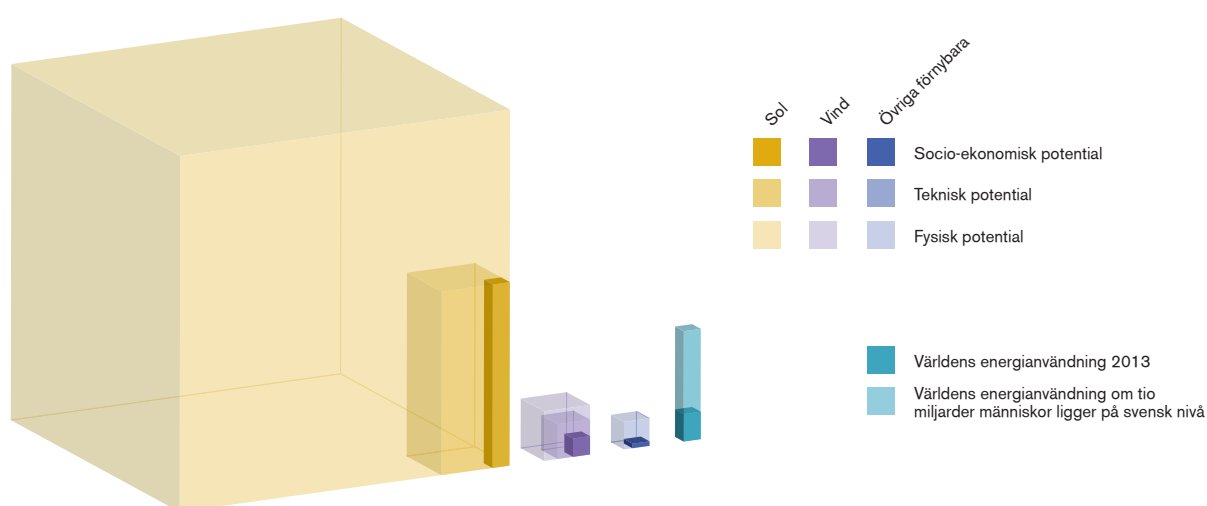
Här har vi gjort ett försök att gå igenom befintlig vetenskaplig litteratur och uppskatta vad vi valt att kalla "fysiska", "tekniska" och "socio-ekonomiska" resurspotentialer för flödande förnybara energikällor. I den fysiska potentialen ingår hela det energiflöde som i teorin skulle kunna konverteras till el vid jordens yta. I den tekniska potentialen avgränsar vi oss till den typ av områden där resursen idag utnyttjas och till dagens verkningsgrader. I den socio-ekonomiska potentialen gör vi en rimlighetsbedömning av hur stora områden som skulle kunna tänkas tas i bruk med hänsyn till konkurrerande intressen. Energiflödena härrör ursprungligen från solinstrålning, värmeflöden från jordens inre och gravitationskrafter (tidvatten).

En liten del av solenergin lagras tillfälligt i växter. Potentialen för denna så kallade bioenergi tas upp i boken [Perspektiv på förädling av bioråvara](#).

Figur 3.1 illustrerar storleken på dessa potentialer i förhållande till världens samlade efterfrågan på energi. 2013 var världens totala energianvändning 150 000 terawattimmar (TWh), vilket illustreras av den lilla turkosa kub. Elkonsumtionen var 23 000 TWh. Om världsbefolkningen växte till tio miljarder och om dessa använde lika mycket energi (all energi, inte bara el) som en svensk gör idag skulle energianvändningen fyrdubblas till 600 000 TWh.

Den fysiska solelpotentialen (den stora gula kuben) är 720 000 000 TWh per år, eller nästan 5000 gånger större än dagens energianvändning. Vår bedömning av en rimlig socio-ekonomisk solelpotential (den smala gula stapeln) är 1 000 000 TWh per år vilken därmed överskrider världens energianvändning även om den skulle fyrdubblas. Vi uppskattar att en övre gräns för vindkraftens socio-ekonomiska potential ligger runt 100 000 TWh per år. Den samlade socio-ekonomiska potentialen för el från övriga förnybara energiflöden, det vill säga vatten-, våg-, ström- och tidvattenkraft, geotermisk kraft och el från salt- och temperaturskillnader, uppskattar vi till 10 000 TWh per år. Merparten av detta utgörs av vattenkraft varav ungefär hälften redan utnyttjas.

Solenergin är relativt jämnt fördelad över jordklotets yta och kan utvinnas överallt. Även vindresursen är ganska utspridd, medan övriga energikällor är koncentrerade till vissa områden. Koncentrationen gör att de kan ha stor lokal betydelse, som vattenkraften i Sverige och den geotermiska energin på Island, även om de i ett globalt perspektiv är små i förhållande till sol och vind. Ett problem med sol- och vindresurserna är att de varierar över dygnet och året. Eftersom de andra förnybara energiflödena varierar på ett annat sätt, ibland mer förutsägbart och ibland, som i vattenkraftens fall, även reglerbart, kan de utgöra viktiga komplement i elsystemet.



Figur 3.1 Hur stora är resurserna? Tre typer av potentialuppskattningar för el från solenergi, vindenergi och övriga förnybara energiflöden jämförda med världens energianvändning 2013 och om tio miljarder människor skulle använda lika mycket som en svensk gör idag.

4

TEKNIKER FÖR FÖRNYBAR ELPRODUKTION

Ola Carlson
Linus Hammar
Zack Norwood
Emil Nyholm

Institution Energi och miljö, Chalmers*

* Avdelningen för elteknik (O. Carlsson), Avdelningen för miljösystemanalys (L. Hammar), Avdelningen för energiteknik (Z. Norwood, E. Nyholm)

Nästan alla förnybara energikällor har solen som sitt ursprung. Omvandlingen från solljus till elektrisk energi kan vara direkt eller ha flera steg innan vi människor kan använda elen.

Direkt sol-till-el-omvandling sker i solceller. Solceller kan vara av flera olika typer och kan placeras nära användaren, till exempel på hustak eller fasader. Solceller producerar likström. Om strömmen ska matas ut på elnätet måste den först omvandlas till växelström. Det är den vanligaste formen av användning. Solceller används även på avlägsna platser som inte har något stort elnät i sin omgivning. Då är det lokala elsystemet ofta ett likströmsnät.

Solceller kan också placeras i stora grupper om flera solcellspaneler. Då blir den sammanlagda effekten stor, i storleksordningen megawatt (MW) till terawatt (TW), vilket är jämförbart med stora kraftverk.

Solens strålar kan också fångas upp av solfångare som tillvaratar värmen i strålarna. Det kan vara mindre anläggningar som värmer vatten till ett bostadshus eller större anläggningar på många megawatt som med hjälp av solvärmes skapar vattenånga som driver en turbin som i sin tur driver en generator som producerar el.

Summerat över hela världen är den totala elproduktionen från solen över 150 terawattimmar (TWh), vilket är jämförbart med Sveriges totala elproduktion på ett år.

När solen värmer jordens yta skapas vindar. De kan fångas upp av vindkraftverk som omvandlar rörelseenergi i vinden till elenergi. Vindkraftverk placeras lämpligen där det blåser mycket. I Europa är den nordvästra delen blåsigast.

De flesta moderna vindkraftverk har en turbin med tre blad och en generator som är ansluten till elnätet med kraftelektronisk utrustning. Sedan 1980-talet har ett typiskt vindkraftverk vuxit från att leverera en effekt på ett tiotal kilowatt (kW) till flera megawatt idag. År 2014 var det största vindkraftverket i drift på 8 MW, men på ritbordet finns vindkraftverk på upp till 20 MW. Bladen är upp till 80 meter långa och tornen över 100 meter höga. De flesta vindkraftverk är idag placerade på land. Potentialen från havsbaserad vindkraft är emellertid enorm och placering till havs blir allt vanligare.

År 2013 var världens samlade elproduktion från vind 500 TWh. Den största andelen kommer från vindkraftsparker med hundratals vindkraftverk.

Solens värmning av jordytan gör också att vatten avdunstar och blir till regn. När regnet faller på höga landområden skapas sjöar, floder och forsar. Vattnet på hög höjd kan ledas till vattenkraftverk som omvandlar vattnets lägesenergi till elenergi.

Vattenkraften i Europa och Nordamerika är redan utbyggd så mycket som är ekonomiskt och naturmässigt försvarbart. På andra håll i världen finns potential att bygga fler vattenkraftverk. Världens totala elproduktion från vattenkraft ligger på 3 700 TWh, vilket motsvarar 16 % av världens elbehov.

Att utvinna elkraft från tidvatten är idag en begränsad företeelse. Det finns ett fåtal fasta kraftverk som använder tidvattnets nivåskillnader för elproduktion. Det pågår också försök att utvinna elkraft ur strömmande vatten, såväl tidvattenströmmar som havsströmmar. Exempel på kraftverk för strömmande vatten är ett vindkraftsliknande kraftverk som står under vattnet, eller en turbinförsedd undervattensdrake som är förankrad i havsbotten, se Figur 8.1 i kapitel 8.

Vinden som blåser över en vattenyta skapar vågor – stora vid stormar och mindre vid låga vindhastigheter. Det finns hundratals olika förslag på maskiner som omvandlar vågornas energi till elkraft, men inget typiskt vågkraftverk har utkristalliserat sig i dagsläget. Det finns några prototyper som provas i kontinuerlig drift.

Sammantaget kan det konstateras att det finns bra teknik som pålitligt omvandlar naturens förnybara energikällor till elkraft. Potentialen för förnybar energiproduktion är enorm, men det krävs mycket investeringar och utvecklingsarbete innan all el kan produceras från förnybara energikällor.

5

NÄT OCH ELENERGILAGER

Jimmy Ehnberg

Yujing Liu

Maria Grahn

Institutionen för Energi och miljö, Chalmers*

* Avdelningen för elteknik (J. Ehnberg, Y.Liu), Avdelningen för fysisk resursteori (M. Grahn)

Jämfört med andra konsumtionsvaror är el speciellt. Vid varje tidpunkt måste tillgången på el och elen som används vara i balans, så kallad effektbalans. Elproduktion där naturen bestämmer produktionsmönstret ställer nya krav på elnätet att balansera fluktuerande energikällor som exempelvis vind och sol. Idag är elnät ofta uppbyggda för att hantera ett fåtal stora produktionskällor, exempelvis kärnkraftverk, men i framtiden kommer de att behöva hantera många små, geografiskt spridda produktionskällor som exempelvis vindkraftturbiner. För att hantera många små källor behöver man antingen kraftigt bygga ut dagens elnät eller använda det befintliga nätet mer effektivt.

Ett sätt att minska behovet av att bygga ut elnätet är att installera elenergilager. I framtiden kommer det att behövas en bred blandning av lagringstekniker för att möta kraven för ett fungerande elnät, till exempel att tillgången på el ska vara jämn och säker. Kostnaderna för de olika lagringsteknikerna varierar kraftigt men också deras användningsområde. I Figur 5.1 beskrivs teknikernas kapacitet och lagringstid med hänsyn till tekniska begränsningar, ekonomi och krav på rätt geografiska förutsättningar. Det kommer att behövas lagring som gör det möjligt att producera el vid ett tillfälle och konsumera den vid ett senare tillfälle, och för att minska hård belastningen på elledningar under vissa timmar på året. Det vill säga för att hantera effektbalansen. Det kommer också att finnas behov av lagring på lokal nivå, till exempel i ett bostadsområde, och av att lagra energi under kortare tid som en sekund eller mindre. Nedan följer exempel på lagringstekniker för längre och kortare behov som idag är möjliga att använda.

För längre lagringsbehov används pumpvattenkraftverk, turbiner drivna av komprimerad luft och vätgas. Dessa kan leverera mycket effekt under lång tid men är mycket stora och kostsamma att bygga. Pumpkraftverk lagrar energi i form av lägesenergi genom att pumpa upp vatten exempelvis från en sjö i en dalgång till en högre belägen fjällsjö. El får man sedan tillbaka då vattnet faller ner genom en turbin. Tekniken är lämpligast för stora installationer med stora vattendammar som har stor nivåskillnad. Av den el man måste använda för att pumpa upp vattnet till den högre höjden kan man vid senare tillfälle få tillbaka el med en total effektivitet på cirka 60–75 %.

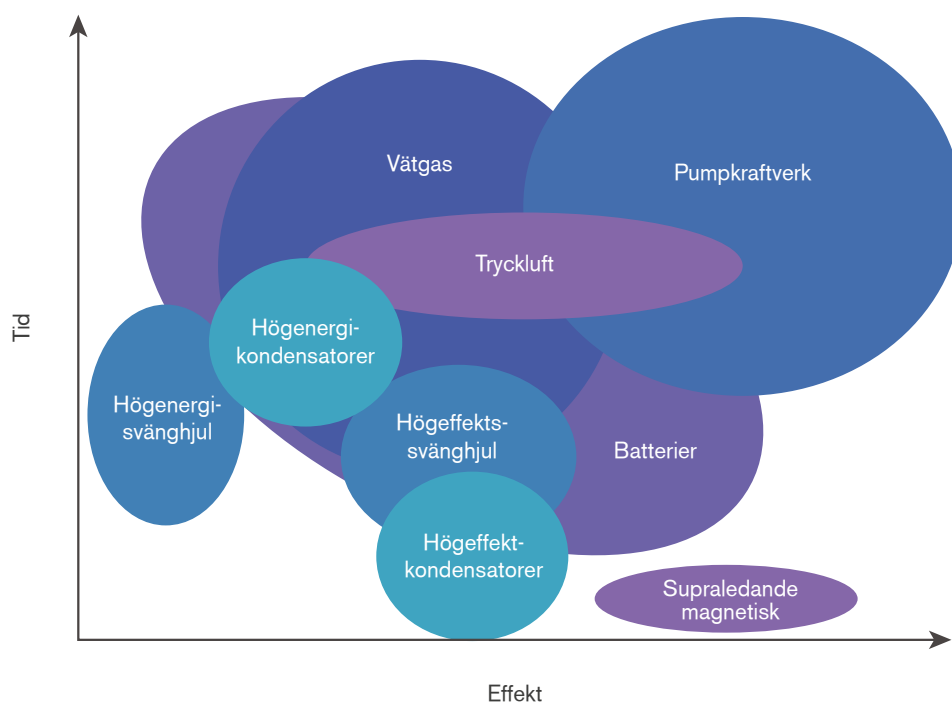
Vid tryckluftslagring används överskottsel för att komprimera luft. När behovet av el ökar används den komprimerade luften att driva en turbin. Teknikens effektivitet är cirka 60–75 %. Teknikens nackdel är att det kräver stora behållare. Man diskuterar om det är möjligt att exempelvis använda nedlagda gruvor som lagringsplats.

Lagring av energi med hjälp av vätgasteknik innebär att energin lagras kemiskt. Överskottsel används för att spjälka vatten till vätgas och syrgas genom elektrolys. Vätgasen används sedan som bränsle i bränsleceller eller gasturbiner när man vill ha tillbaka elen. Teknikens effektivitet är mellan 60 och 70 %.

För kortare lagringsperioder används till exempel batterier och svänghjul. Batterier lagrar kemisk energi och avger el (laddar ur) vid behov. Det finns många olika typer av batterier för olika ändamål, bland annat för elbilar. Den totala effektiviteten varierar mellan 50 och 92 % och det är stor spridning på priset för olika batterityper. I svänghjul lagras energi som rotationsenergi (rörelseenergi) genom att accelerera det tunga svänghjulet med hjälp av en elmotor. Hjulet driver vid ett senare tillfälle en generator som producerar el när elen behövs. Teknikens effektivitet är 80–85 %.

Två tekniker som kan spela roll i framtiden är supraledande magnetisk energilagring och lagring i superkondensatorer. I ett supraledande magnetiskt lager lagras energin i magnetfältet som skapas när ström flyter genom en supraledande spole. Genom att ladda ur spolen får man tillbaka elen. Den totala effektivitet är upp till 95 % men tekniken, som fortfarande är under utveckling, är tekniskt komplicerad och än så länge mycket dyr.

Superkondensatorer kan lagra energi i form av ett starkt elektriskt fält, som snabbt kan laddas ur vid behov av el. Total effektivitet är mellan 70 och 80 %, men även denna teknik är under utveckling.



Figur 5.1 Praktisk urladdningstid och kapacitet för olika lagringstekniker. Figuren är endast indicativ. Tidskalan är logaritmiskt från sekunder till månader medan effektskalan är logaritmisk från kilowatt till gigawatt.

6

MILJÖBEDÖMNING AV FÖRNYBAR ELPRODUKTION

Sverker Molander
Rickard Arvidsson

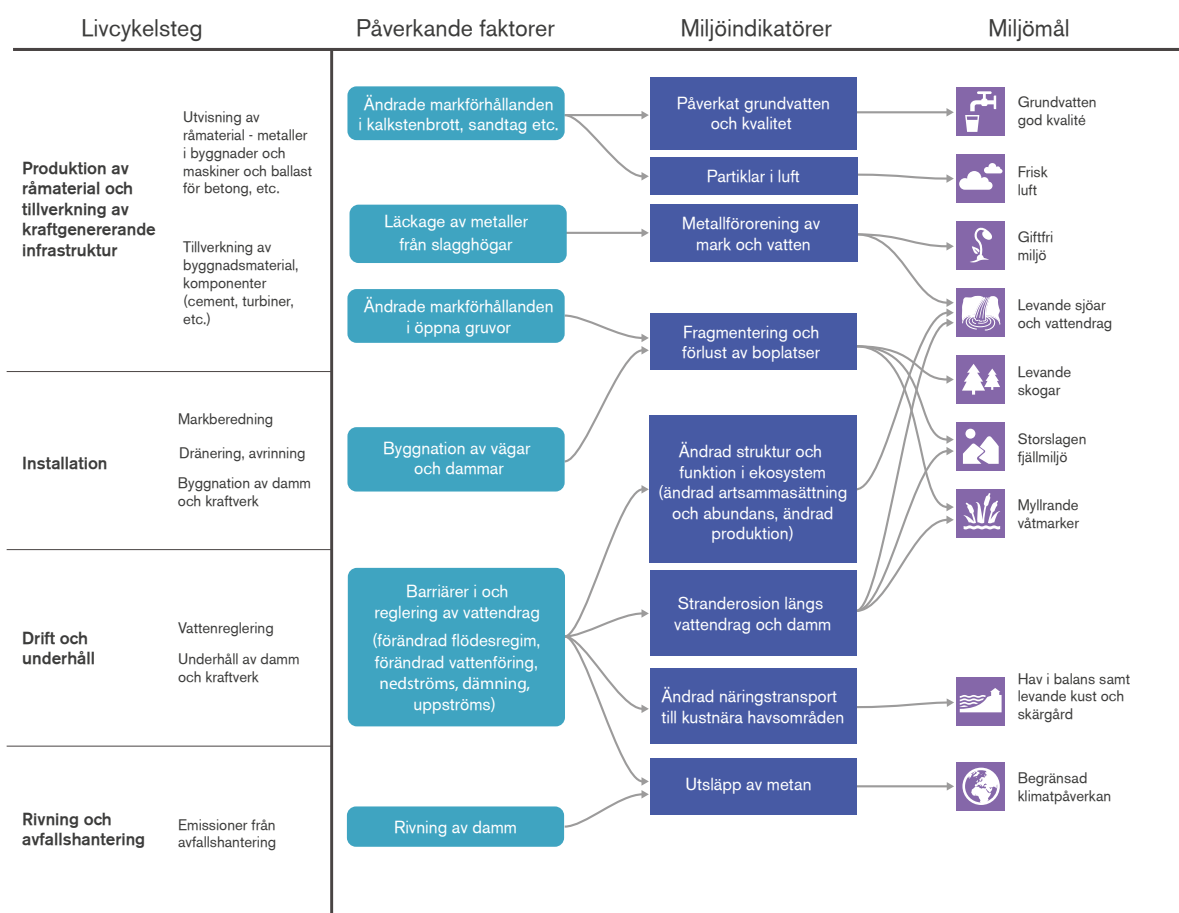
Institutionen för Energi och miljö, Chalmers*

* Avdelningen för miljösystemanalys

Rent intuitivt kan man tycka att förnybar energi alltid är bra för miljön. Men det finns ingen elproduktion som är helt utan miljöpåverkan. Däremot skiljer sig olika förnybara elenergikällor åt på flera sätt när det gäller deras miljöpåverkan – vattenkraft kan innebära att stora arealer däms upp, vindkraft att körvägar tar skogsmark i anspråk. Men de förnybara energikällorna har alla den stora gemensamma skillnaden gentemot fossilbaserade energikällor att de inte alls eller mycket lite bidrar till växthuseffekten och klimatförändringen.

Att göra rättvisande jämförelser mellan olika förnybara energikällor blir på grund av olikheterna en ganska svår metodfråga och det är omöjligt att hitta ett enda mått som kan fånga in de olika energikällornas skillnader. En viktig orsak till det är att de förnybara elenergikällorna ofta utnyttjar en platsspecifik naturresurs – ett specifikt vattenfall i ett enskilt vattendrag, en speciell lokalisering av ett vindkraftverk – och att den inverkan som energiutvinningen orsakar ger så olika effekter i ekosystemen. Vattenkraftsdammar kan vara vandringshinder för fiskar medan vindkraftverk kan utgöra kollisionsrisker för fåglar och fladdermöss. Det är dessutom svårt att jämföra påverkan på en fiskpopulation med den yta skogsmark som tagits i anspråk för en körväg till ett vindkraftverk. Försök att göra jämförelser med hjälp av enkla indikatorer tar inte hänsyn till den komplexitet som finns i de ekosystem som utnyttjas.

För att försöka beskriva de skillnader som finns mellan olika energisystem behövs ett flexibelt och rymligt ramverk. Ett sådant kan man konstruera genom att kombinera livscykelräkningar med miljörisikanalysens förenklade orsak-verkan-kedjor. I Figur 6.1 har vi exemplifierat hur det kan se ut för storskalig vattenkraft, den energikälla som levererar 40–45 % av Sveriges elkraft.



Figur 6.1 Tillämpning av ett ramverk för analys av miljöpåverkan där exemplet utgörs av vattenkraftverk med damm. Det använda ramverket är baserat på livscykeltänkande och miljöriskanalys, där påverkan på de svenska miljömålen utgör ändpunkterna för de miljömässiga orsak-verkan-kedjor som påbörjas av åtgärder och verksamheter under olika livscykelsteg i vatten. Längs orsak-verkan-kedjorna kan olika mätbara miljöeffekter identifieras som i sin tur har bäring på de svenska miljömålen.

7

ENERGIBALANS OCH KLIMATPÅVERKAN – EN LITEN INVESTERING GER STOR EFFEKT

Björn Sandén

Institution för Energi och miljö, Chalmers*

Anders Arvesen

Norwegian University of Science and Technology

**Avdelning för miljösystemanalys*

Ett syfte med att öka elproduktionen från förnybara energikällor är att undvika utsläpp av växthusgaser, men hur stora utsläpp sker vid tillverkning av de kraftverk som behövs för att omvandla energiflödena till el? En relaterad fråga är hur mycket energi som krävs vid tillverkning i jämförelse med hur mycket energi man får tillbaka under anläggningarnas livstid.

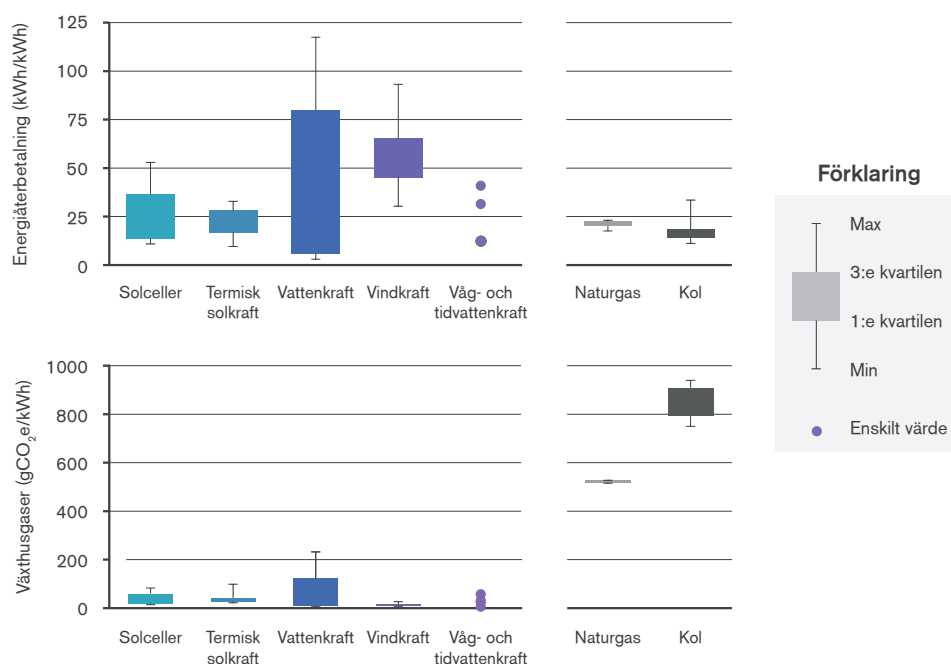
En nyligen genomförd översikt utförd på uppdrag av UNEP (FN:s miljöavdelning) visar att en energiinvestering i förnybar elproduktion ger en minst lika stor återbetalning av energi som en investering i kol eller naturgas. Figur 7.1 visar att produktionen av förnybar el under kraftverkens livstid typiskt är 15–60 gånger större än den energiinvestering som krävs för produktion och avfallshantering av kraftverken. Det innebär att även om man använder fossila bränslen för att producera kraftverken så blir utsläppen under hela kraftverkets livscykel – det vill säga under tillverkning, användning och skrotning – betydligt lägre för solceller, termisk solkraft, vattenkraft, vindkraft, och våg- och tidvattenkraft än för kol och naturgas (Figur 7.1).

Hur stora utsläppen av växthusgaser kan antas bli i tillverkningen beror på det omgivande industrisystemet och i synnerhet på vilken sorts energi som används. Om producenten av ett vindkraftverk köper el från kolkraft och stål från ineffektiva stålverk blir utsläppen högre. Vid en övergång till mer förnybar energi skulle utsläppen vid tillverkningen av kraftverken minska. Ett vindkraftverk som tillverkas med el från vindkraft skulle ge upphov till mindre än hälften så mycket utsläpp som ett vindkraftverk som tillverkas med el från kolkraft. Om utsläppen vid transporter och utvinning och bearbetning av metaller och andra material också skulle minska, reduceras vindkraftverkets klimatpåverkan ytterligare.

Även om energiåterbetalningen i dagsläget inte är något större problem har det inte alltid varit så. I början av 1970-talet gav solceller inget eller mycket litet överskott, medan de idag ger en elproduktion som under livstiden är cirka 15–30 gånger större än investeringen. Det beror på att större produktionsvolymerna gett möjlighet till effektivare processer och att man över tid har lärt sig hur man kan effektivisera produktionen och höja verkningsgraden.

Medan teknik- och processutveckling leder till ökad energiåterbetalning, kan resursbegränsningar verka i motsatt riktning. Om man tvingas söka sig till mindre lämpliga platser kan energibalansen försämrast. För sol är detta inte av stor betydelse eftersom solenergin finns överallt och skillnaden från plats till plats är relativt liten. För geografiskt mer begränsade energislager kan det ha större betydelse. Den stora spridningen för vattenkraftens värden på energiåterbetalning i Figur 7.1 illustrerar skillnaden mellan vattenkraftdammar i gynnsamma och ogynnsamma lägen. Om man i högre utsträckning tvingas söka sig till ogynnsamma lägen på grund av att de bästa platserna redan är exploaterade försämrast energiutbytet. För vindkraft till havs är trenden tvetydig. Elproduktionen ökar tack vare starkare vindar än på land, men samtidigt krävs större investeringar i kraftverk, kablar och underhåll på grund av den besvärligare miljön och de längre avstånden till platser där elen används.

Vår slutsats är att i alla normala tillämpningar är koldioxidutsläppen från förnybar elproduktion mycket lägre än för fossila bränslen och energiutbytet är idag inte ett större problem för förnybar energi än det är för fossilbaserad elproduktion. I utformningen av enskilda anläggningar kan det vara en faktor att ta hänsyn till men det har ingen avgörande betydelse för möjligheten att kraftigt öka tillförseln av förnybar el i världen. En liten energiinvestering ger mångfalt tillbaka.



Figur 7.1 Energiåterbetalning, det vill säga elproduktion dividerat med energiinvestering vid tillverkning, underhåll och skrotning av anläggningen (övre), och utsläpp av växthusgaser under livscykeln (nedre).

8

SKADAR MARIN ELPRODUKTION HAVENS EKOSYSTEM?

Linus Hammar

Institutionen för energi och miljö, Chalmers*

* Avdelningen för miljösystemanalys

Havet är fullt av energi. Rörelseenergin i vågor, tidvattenströmmar och havsströmmar liksom temperaturskillnader mellan varmt ytvatten och kallt djupvatten erbjuder lockande möjligheter att producera förnybar el (se Figur 8.1). Många utvecklingsprojekt pågår, men teknikerna är omogna och inga kommersiella kraftverk har ännu tagits i drift. Frågan är om marin elproduktion är en säker väg mot hållbar elförsörjning, eller om det belastar de redan utsatta ekosystemen.

Alla installationer till havs innebär att fundament av stål eller betong placeras på havsbotten. Generellt har de hårda fundamenten en positiv inverkan genom att erbjuda skydd och fäste för djur och växter. Buller från havskraftverk är svagare än från lastfartyg, men skulle enligt laboratoriestudier kunna orsaka stress och störning hos havslevande djur under vissa förhållanden.

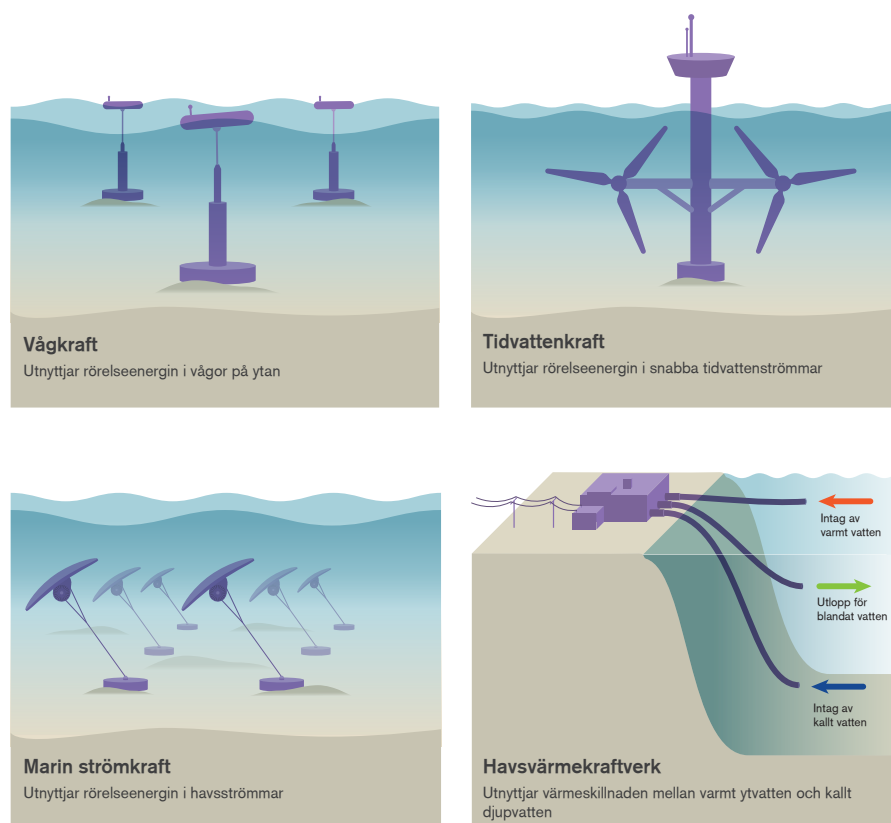
Vågkraftverk anses ha lindrig miljöpåverkan. Stora samlingar av vågkraftverk skulle emellertid kunna påverka framkomsten hos stora djur som valar. En annan möjlig effekt är att vågkraftverk, genom att dämpa vågorna, påverkar hur vattnet blandas och sediment förflyttas. Vad gäller tidvattenturbiner finns risk att djur kolliderar med de snabbt roterande turbinbladen. Mer forskning kring djurens beteende nära turbiner behövs för att kunna bedöma hur stora riskerna är. Stora tidvattenkraftverk kan dessutom påverka hydrodynamiken och därmed sedimenten i området, vilket kan ge påtagliga effekter på ekosystemet. Därför bör tidvattenkraftverk aldrig ta ut mer än tio procent av det naturliga vattenflödet.

Marin strömkraft har typiskt en större modell av tidvattenkraftverkens turbiner, men de långsamma strömmarna gör att de flesta djur har god chans att simma undan från rotorbladen. En variant av marint strömkraftverk är en undervattensdrake med en turbin som rör sig i en bana i havsströmmen. Draken och vajern rör sig mycket snabbt och det har ännu inte undersökts hur djur reagerar på och kan undvika denna typ av kraftverk, vilket borde göras.

Havsvärmekraftverk använder temperaturskillnaden mellan kallt djupvatten och varmt ytvatten för att producera el. De tar in stora mängder vatten, 300–400 m³ per sekund. Genom att placera barriärer runt inloppsrören kan större djur skyddas, men det är svårare att hindra planktonägg och larver från att dras in, vilket kan ge stora förluster i återväxten. Genom att havskraftverk blandar vatten från olika djup påverkar de också temperaturer och näringshalt. Det kan ge allvarliga effekter på kustnära ekosystem om inte utloppsvattnet släpps ut på tillräckligt stort djup.

Sammanfattningsvis har vågkraftverk och mindre tidvattenkraftverk sannolikt ingen negativ miljöpåverkan medan miljöpåverkan av storskalig tidvattenkraft, marin strömkraft och havsvärmekraft beror mycket på kraftverkens design och lokala förhållanden. Det finns fortfarande många okända faktorer vad gäller havskraftverkens direkta miljöpåverkan. Det ligger ofta på dem som utvecklar kraftverken att bevisa att de är ofarliga för ekosystemen, vilket kan vara ett stort hinder att ta sig över i början av utvecklingsprocessen. Därför är det viktigt att ta fram bra metoder för att bedöma miljöpåverkan även om den tillgängliga informationen är ofullständig.

Många gånger kan havskraftverkens påfrestningar på ekosystemen mildras genom förebyggande åtgärder. I jämförelse med påfrestningarna från andra mänskliga aktiviteter är belastningen på ekosystemen från marin elproduktion ofta liten. Det är till och med möjligt att marin elproduktion kan inverka positivt på de marina ekosystemen då kraftverken skyddar mot destruktiva fiskemetoder och fundamenten ger en bra levnadsmiljö för många djur och växter.



Figur 8.1 Konceptuella illustrationer av olika tekniker för marin elproduktion. Pilar indikerar vattnets flödesriktning. De illustrerade teknikerna är ej skalenliga exempel av ett stort antal prototyper under utveckling.

9

UTMANINGAR MED EN ÖKAD ANDEL EL FRÅN SOL OCH VIND I ELNÄTET

David Steen

Joel Goop

Lisa Göransson

Shemsedin Nursebo

Institutionen för Energi och miljö, Chalmers*

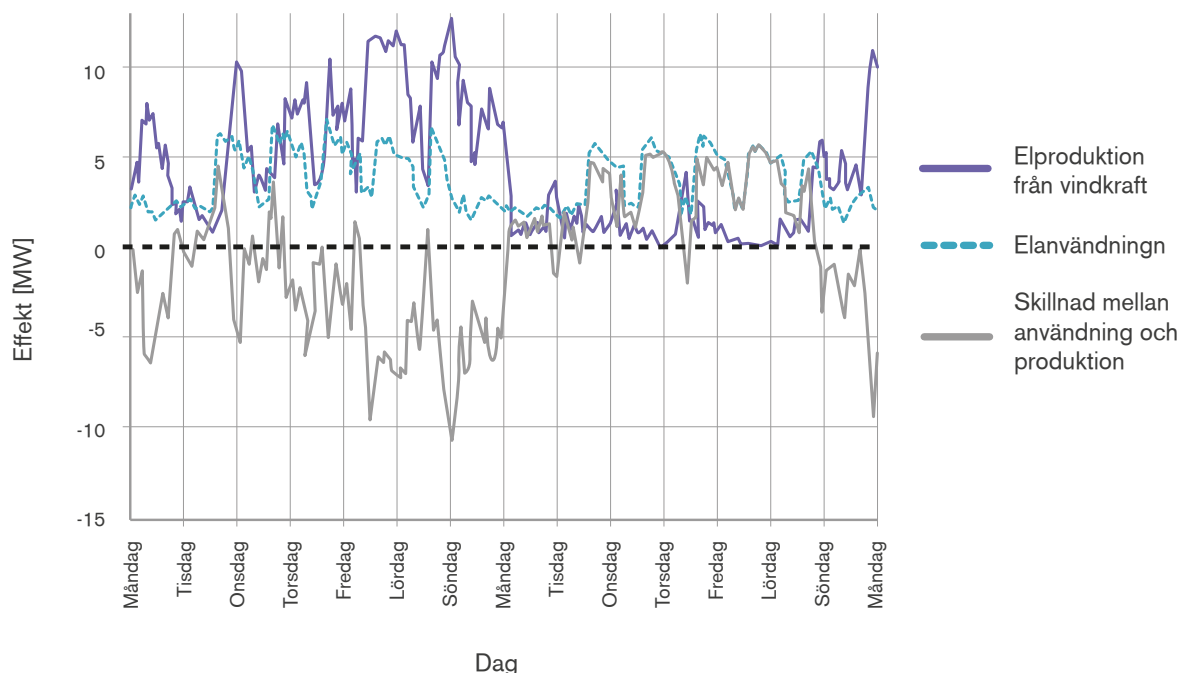
Magnus Brolin

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

*Avdelningen för elteknik (D. Steen, S. Nursebo), Avdelningen för energiteknik (J. Goop, L. Göransson)

Elproduktionen från vind- och solkraft har ökat kraftigt under de senaste tio åren och utvecklingen förväntas fortsätta. Utbyggnaden av dessa förnybara kraftslag innebär stora utmaningar för vårt elnät, som till stor del byggdes under en tid då elförsörjningen såg helt annorlunda ut. De största utmaningarna ligger i att produktionen av el från sol och vind varierar med vädret samt att produktionsanläggningarnas placering skiljer sig från placeringen av traditionella kraftverk. Tekniskt sett finns det inga begränsningar för hur mycket vind- och solex som kan integreras. En storskalig utbyggnad kommer dock leda till nya förhållanden som elnätet måste anpassas till.

Elnätet kan förenklat delas in i transmissionsnät och distributionsnät, där transmissionsnätet ansvarar för att förflytta stora mängder el över långa avstånd, till exempel från vattenkraftverken i norra Sverige till konsumenterna i söder. Distributionsnätets uppgift är att fördela ut elen till varje enskild konsument inom ett mindre område, till exempel en stad. Att integrera sol och vindkraft i lokala distributionsnät är, vid små nivåer, oftast positivt för elnätet då elen produceras närmare konsumenterna. Då behöver man inte överföra lika mycket el till området, vilket leder till minskade förluster. När mer sol och vindkraft installeras kan det finnas tillfällen då mer el produceras än vad som används inom området, vilket kan ses i Figur 9.1. Man får då överföra elen ut från området och det finns då en risk att komponenter i elnätet överbelastas. Det kan dock lösas med hjälp av olika tekniker eller genom att förstärka distributionsnätet.



Figur 9.1 Elanvändning, elproduktion och skillnaden mellan dessa för ett distributionsnät i södra Sverige. Här ses att under vissa tider, när den grå kurvan är negativ, överstiger elproduktionen elanvändningen vilket leder till att el måste transporteras ut från området.

För transmissionsnätet består utmaningarna till stor del i att de bästa platserna att installera sol- och vindkraftverk skiljer sig från de platser där kraftverk tidigare byggts. Det kan till och med vara en fördel att sprida ut sol- och vindkraftverk för att få en jämnare produktion och minska risken för att alla kraftverk har låg produktion samtidigt. Det innebär att nätet kan behöva byggas ut för att elen från alla utspridda kraftverk ska kunna nå konsumenterna. Redan idag finns också så kallade flaskhalsar i nätet där nätets kapacitet inte alltid räcker till och där nätet kan behöva förstärkas. Med mer sol- och vindkraft kan flaskhalsarna uppstå i andra delar av nätet och vid andra tidpunkter än tidigare. Utbyggnaden av sol- och vindkraft kan alltså vara avgörande för planeringen av hur transmissionsnätet ska byggas ut i framtiden.

De största utmaningarna för att öka mängden el från sol och vind är dock kanske inte tekniska utan ekonomiska. För att nya kraftverk ska byggas och för att den nödvändiga utbyggnaden av näten ska bli av, behöver investeringarna vara lönsamma. Här spelar elmarknaden en viktig roll, dels för att skapa incitament för investeringar i förnybar elproduktion och dels för att säkerställa att det finns tillräcklig produktionskapacitet i övriga kraftverk och överföringskapacitet i näten. Förändringar av hur elmarknaden fungerar idag kan bli nödvändiga när mängden sol- och vindkraft ökar.

10

KAN ELANVÄNDNINGEN ANPASSAS TILL VARIERANDE ELPRODUKTION?

Emil Nyholm
David Steen

Institutionen för energi och miljö, Chalmers*

* Avdelningen för energiteknik (E. Nyholm), Avdelningen för elteknik (D. Steen)

I traditionella elsystem har elproduktionen anpassats efter efterfrågan. Baslastkraftverk genererar en konstant mängd el och mer flexibla kraftverk följer fluktuationerna i efterfrågan. Ökad elanvändning skapar emellertid behov av mer produktion och större kapacitet i elnätet. För att undvika eller skjuta upp sådana kostsamma investeringar kan man istället ge kunderna incitament att minska sin elanvändning under timmarna med högst belastning. Med variabelt elpris under dygnet, så kallad realtidsprissättning, kan man till exempel få hushållen att köra sina tvättmaskiner vid andra tidpunkter. Konceptet kallas efterfrågefleksibilitet.

Förnybar elproduktion kan variera mycket – vindkraftverken producerar mer el under blåsiga dagar och solceller ger mer el soliga timmar. Med mycket förnybar el i näten kan det ge upphov till problem, till exempel ökat antal flaskhalsar då elnätets kapacitet inte räcker till eller att växelströmmens frekvens blir instabil. Men med efterfrågefleksibilitet kan efterfrågan på el styras till att följa variationerna i den förnybara elproduktionen, se Figur 10.1. Därigenom kan problemen lindras.

Det finns styrbara laster, alltså elförbrukning som går att påverka, både i hushåll, verksamheter och industri. I hushåll går det ofta bra att förskjuta körningen av disk-, tvättmaskiner och torktumlare flera timmar. Men när de väl har startats kan det vara olämpligt att stoppa dem mitt i programmet. Däremot kan kylskåp och frysar utan problem stoppas några sekunder eller minuter lite när som helst. Sådana korta avbrott kan användas för att stabilisera frekvensen i elnätet. I eluppvärmda eller

-kylda lokaler kan elförbrukningen också styras kraftigt om inomhustemperaturen tillåts variera med någon grad.

I verksamheter som skolor eller kontor är de styrbara lasterna ganska lika de i hemmen. Däremot används vissa apparater, t.ex. datorer, mer eller mindre kontinuerligt och möjligheten att styra deras elförbrukning kan därför vara begränsad.

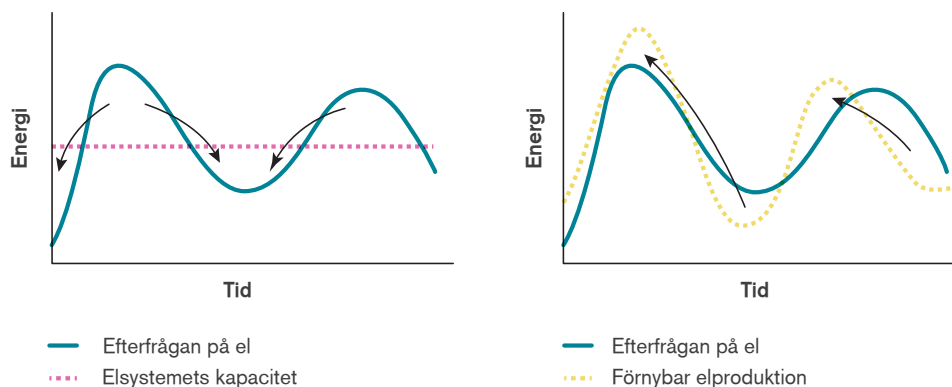
I industrin kan efterfrågefleksibilitet innebära att lägga om eller sprida ut elförbrukningen. Redan idag har en del industrier åtagit sig att bidra till att balansera elförbrukningen – blir belastningen på elnätet för hög stänger de av vissa processer. Men stoppad produktion innebär förlorad inkomst. För att det ändå ska vara attraktivt måste summan industrierna sparar på att inte använda el vid vissa tidpunkter vara större än den förlorade inkomsten.

Det finns olika efterfrågefleksibilitets-metoder för att stödja varierande elproduktion. För att stabilisera frekvensen i elnätet behöver elförbrukningen styras på korta tidsskalor (sekunder). Det kräver automatisk direktstyrning. Från elnätsoperatören skickas en signal till kundernas apparater om att minska eller stänga av sin elförbrukning. Metoder och utrustning finns redan. En studie har visat att med ett stort antal direktstyrda apparater finns stora möjligheter att väsentligt förbättra frekvensstabiliteten i elnätet, både om efterfrågan plötsligt ökar eller vid fluktuerande elproduktion.

För att undvika en ökning av antalet flaskhalsar i elnätet kan realtidsprissättning användas. Kunderna förväntas reagera på prisfluktuationerna och anpassa sin elförbrukning därefter. En viktig aspekt är hur långt i förväg priset annonseras. Ett kortare tidsintervall skulle ge bättre balansering mellan tillgång och efterfrågan, men gör det också svårare för kunderna att planera sin elförbrukning.

Studier från Chalmers har visat att med efterfrågefleksibilitet kan en högre andel solceller integreras i det befintliga elnätet utan att elnätet behöver förstärkas – 45 % istället för 30 %. Studier har också visat att efterfrågefleksibilitet kan minska antalet flaskhalsar i systemet.

Sammanfattningsvis kan efterfrågefleksibilitet användas för att hantera variationer i elproduktionen på tidsskalor från millisekunder upp till timmar eller dagar.



Figur 10.2 Skillnaden mellan strategi för efterfrågefleksibilitet i ett traditionellt elsystem (vänster) och ett elsystem med en stor mängd varierande elproduktion (höger).

11

SAMSPELET MELLAN TRADITIONELL OCH FÖRNYBAR ELPRODUKTION

[Lisa Göransson](#)
[Liv Lundberg](#)

Institutionen för Energi och miljö, Chalmers*

* Avdelningen för energiteknik (L. Göransson), Avdelningen för fysisk resursteori (L. Lundberg)

Runt 80 % av världens elproduktion sker i termiska produktionsanläggningar, så som fossileldade kraftverk och kärnkraftverk. Termiska produktionsanläggningar är mest effektiva och ofta konstruerade för att producera el på en jämn, hög nivå. För att reducera koldioxidutsläppen från elproduktionssystemet integreras allt mer vindkraft och solkraft. Vind- och solkraftproduktionen varierar med omgivande förhållanden, den är intermittent. Det här avsnittet diskuterar hur sol- och vindvariationer påverkar de termiska produktionsanläggningarna.

Efterfrågan på el (konsumenternas behov) varierar över tid, mest uttalat mellan natt och dag och mellan sommar och vinter. Elproduktionssystemet har alltid anpassats till variationerna genom förhållandet mellan baslastproduktion och topplastproduktion. Termiska anläggningar designade för baslastproduktion, till exempel kolkraftverk, har låga rörliga kostnader så länge de håller en jämn, hög produktionsnivå. Men en avstängning av anläggningen följt av en uppstart medför typiskt höga kostnader. Termiska anläggningar designade för topplastproduktion, till exempel gasturbiner, har relativt höga rörliga kostnader, men kan i gengäld startas och stoppas utan stora kostnadspåslag.

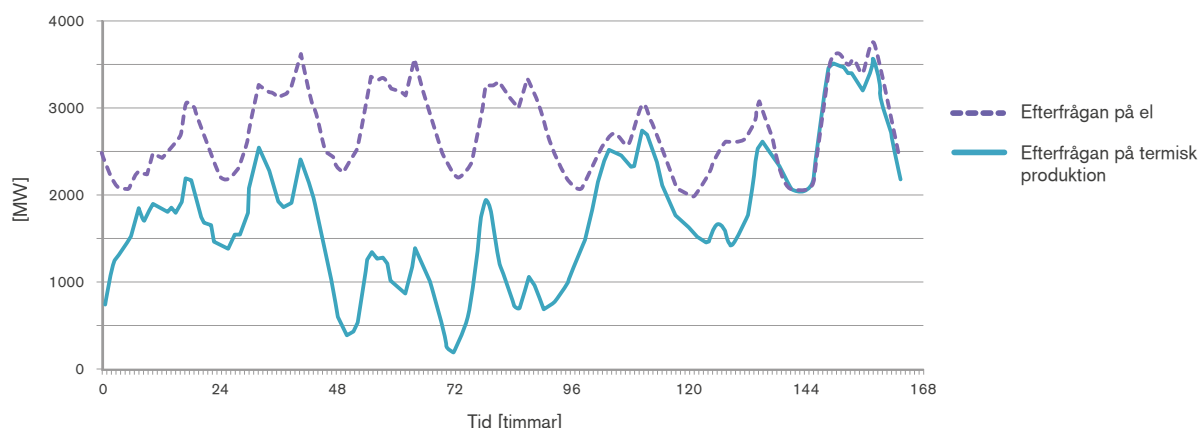
Vind- och solproduktionen varierar på alla tidsskalor, från sekund till sekund och från år till år. Variationer över kort tid speglar lokala förhållanden och jämnas ut i ett system med välutbyggt elnät och geografiskt utspridd sol- och vindproduktion. Det är framförallt variationerna från timme till timme och från säsong till säsong som påverkar produktionsmönstret hos de termiska anläggningarna. Mellanårsvariationerna påverkar investeringsbesluten.

Ett elproduktionssystem med termisk produktion och sol- och vindproduktion kan möta variationer på tre olika sätt; genom att starta/stoppa termiska anläggningar, genom att köra termiska anläggningar under sin maximala nivå (vilket ger en ökad kostnad per producerad kilowattimme el) eller genom att vid tidpunkter med mycket el från sol och vind låta bli att använda en del av den elen. Variationens storlek och varaktighet, liksom föregående och efterföljande variationer avgör vilken kombination av de tre strategierna som används.

Till skillnad från variationer i efterfrågan är variationerna i vindproduktion oregelbundna. Det innebär att i ett system med mycket vindkraft ändras valet av strategier för att möta variationerna hela tiden. Ibland samverkar vindvariationerna med variationerna i efterfrågan, ibland motverkar de varandra. Forskning visar att när vindkraft integreras i ett elproduktionssystem minskas termisk baslastproduktion, medan termisk topplastproduktion är mindre påverkad. Som synes i Figur 1 finns helt enkelt färre långa perioder av hög och jämn efterfrågan på termisk produktion när en del av efterfrågan försörjs av vindkraft.

Solkraftproduktionen i solceller varierar regelbundet och motverkar typiskt variationerna i efterfrågan över dygnet. Solkraftproduktion ersätter därmed i första hand topplastproduktion som annars skulle använts för att möta topparna i efterfrågan på el mitt på dagen.

När andelen sol- och vindkraft ökar i elproduktionssystemet minskar produktionstimmarna för de termiska anläggningarna. Samtidigt sjunker produktionskostnaden för el under timmar med sol- och vindproduktion till följd av de låga rörliga kostnaderna hos sol- och vindkraft. Det innebär att det blir allt svårare att räkna hem investeringen i termiska anläggningar. Dock kvarstår ett behov av produktionskapacitet som kan möta efterfrågan vid låga produktionsnivåer av sol- och vindkraft. Kanske kommer vi se kraftiga fluktuationer i elpriserna för att de termiska anläggningarna ska kunna räkna hem sina investeringar på det begränsade antalet timmar då de är prissättande.



Figur 11.1 Efterfrågan på el och efterfrågan på termisk produktion (elefterfrågan reducerad med vindproduktion) i västra Danmark första veckan i januari 2013. Källa: www.energinet.dk

12

NYTTIGGÖRANDE AV ÖVERSKOTTSEL: ELEKTROBRÄNSLEN

[Maria Grahn](#)
[Maria Taljegård](#)
[Jimmy Ehnberg](#)
[Sten Karlsson](#)

Institutionen för Energi och miljö, Chalmers*

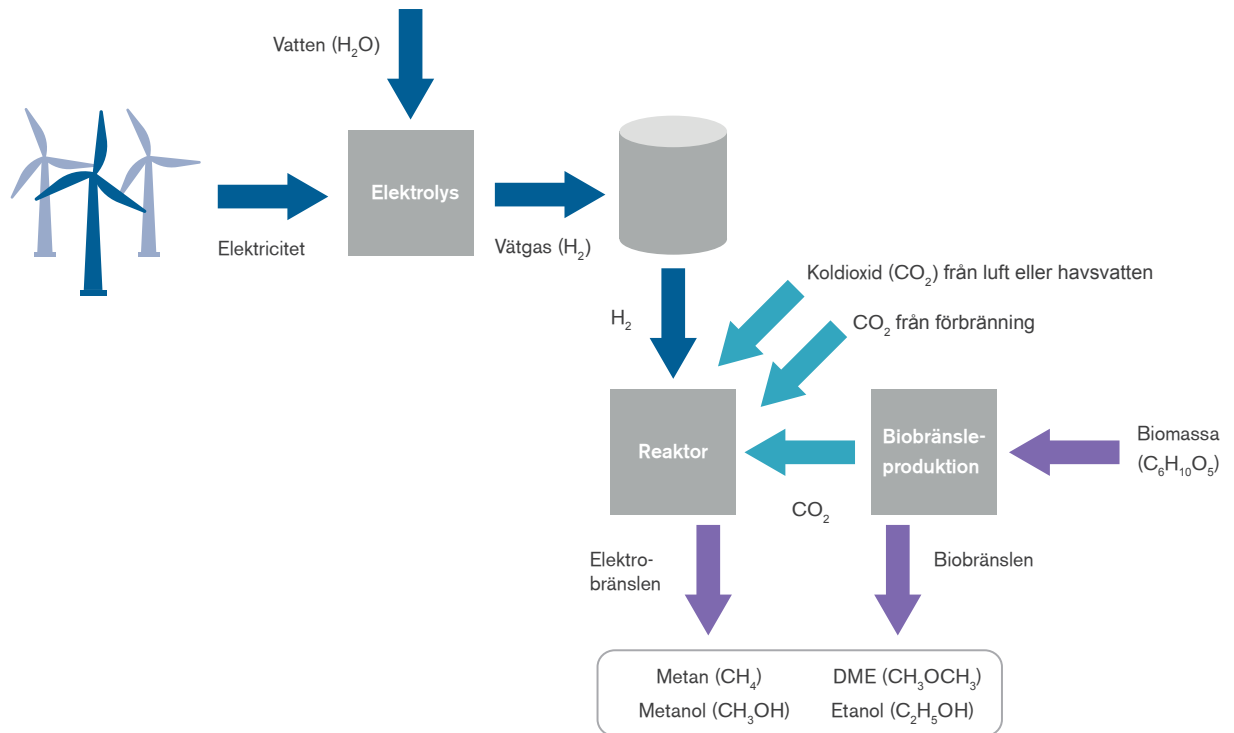
* Avdelningen för fysisk resursteori (M. Grahn, M. Taljegård, S. Karlsson), Avdelningen för elteknik (J. Ehnberg)

I ett framtida energisystem med en större andel förnybara energikällor, såsom vind och sol, kan det bli nödvändigt att lagra överskottsel vid tidpunkter då produktionen av el är större än efterfrågan. Det finns flera alternativ till lagring av el, till exempel pumpa upp vatten i dammar, producera vätgas eller komprimera luft. Alla har sina för- och nackdelar. Ett annat alternativ är att använda överskottsel för att producera bränslen som metan, metanol eller etanol. Dessa så kallade elektrobränslen (i andra sammanhang även kallade "power-to-gas" eller "koldioxid-återvinning") kan ersätta olja för olika ändamål, till exempel som transportbränsle eller inom den kemiska industrin för framställning av plaster, textilier och gödsel. Elektrobränslen skulle alltså kunna bidra till att både ersätta olja och minska mängden överskottsel.

Hur gör man elektrobränslen? Elektrobränslen produceras i tre delsteg: (1) elektricitet används för att splittra vatten till vätgas och syrgas i en process som kallas elektrolys, (2) koldioxid fångas in från olika källor och (3) vätgas och koldioxid blandas i en reaktor där de bildar olika bränslen (se Figur 12.1). Koldioxiden kan exempelvis komma från anläggningar som producerar biodrivmedel (som vid jäsningsning av vete till etanol, förgasning av skogsråvara till metan eller rötning av matavfall till biogas). I framtiden kan koldioxid från luften vara ett alternativ även om den tekniken idag är för dyr. Produktion av elektrobränslen testas nu med framgång av bland andra Audi, Eon Tyskland och Carbon Recycling International.

Kan kostnaden för elektrobränslen konkurrera med bensin? För att elektrobränslen ska vara ett intressant alternativ krävs att produktionskostnaderna är jämförbara med dagens alternativ. En jämförelse av produktionskostnaderna visar att med dagens oljepris kan elektroproducerad metanol framställas till ungefär samma

kostnad som bensen, under förutsättning att kostnaden för infångning av koldioxid är låg (som då koldioxid tas från rötning eller förgasning) samt med relativt optima kostnader för vätegasproduktionen. Billigare teknik för vätegasproduktion beräknas finnas på marknaden om 5–10 år. Beroende på elpris och oljepris visar också studien att produktionen bara behöver köras delar av året för att konkurrera med bensenproduktionskostnaden.



Figur 12.1 De olika processtegen vid produktion av elektrobränslen. Den huvudsakliga reaktionen sker i reaktorn där vätegas blandas med koldioxid (CO_2) och bildar bränslen (t.ex. metan, metanol eller etanol). Koldioxiden kan komma från olika källor.

Vad mer avgör om en elektrobränsleindustri utvecklas? Förutom produktionskostnaden kan utvecklingen av en elektrobränsleindustri också bestämmas av faktorer som (1) kostnader och förutsättningar för andra storskaliga lagringsalternativ av överskottsel, (2) andra alternativa transportbränslen med låga utsläpp och låga produktionskostnader och (3) en storskalig användning av koldioxidinfångning med efterföljande lagring.

Är elektrobränslen en bra idé? fördelarna med elektrobränslen är att det är ett bränsle som inte förknippas med samma resursbegränsning som biodrivmedel, inte har några stora koldioxidutsläpp (om koldioxidkällan och elkällan är förnybara), och som kan användas i dagens infrastruktur och av alla transportslag (även flyg och sjöfart som kan få problem med användning av el i batterier och vätegas). Ett argument mot elektrobränslen är att infångad koldioxid bidrar än mer till minskade utsläpp om den lagras under jorden istället för att bilda bränsle där koldioxiden släpps ut igen efter användning. I korthet skulle elektrobränslen kunna hjälpa till att nyttiggöra ett eventuellt överskott om framtidens energisystem i betydligt högre grad än idag baseras på väderberoende energikällor.

13

HUR MÖTER ELBOLAGEN UTMANINGEN FRÅN FÖRNYBAR EL?

Volkmar Lauber

Institutionen för politiska vetenskaper och sociologi, Salzburg universitet

Steven Sarasini

Institutionen för energi och miljö, Chalmers*

* Avdelningen för miljösystemanalys

Att producera el från förnybara energikällor som biomassa, vind och sol är ganska nytt. Tills nyligen dominerade fossila bränslen (kol, gas och olja), vatten- och kärnkraft i stora, centraliserade kraftverk. Förnybar elproduktion byggs däremot oftast i mindre enheter och kan därmed attrahera investerare utanför den traditionella kretsen.

Förnybar elproduktion får offentligt stöd för vidareutveckling och användning och är på väg att bli allt mer konkurrenskraftig i förhållande till traditionell elproduktion. Det hotar den traditionella elproduktionens lönsamhet, till och med dess överlevnad. Hur bemöter de stora elbolagen i Sverige och Tyskland utmaningen från förnybar el?

Vår analys visar att elbolagen reagerat på mycket olika sätt i Sverige och Tyskland – motståndet i Tyskland har varit mycket större. Skillnaden kan delvis tillskrivas ländernas naturresurser. Tyskland har inhemsk produktion av kol, men betydligt mindre biomassa och vattenkraft än vad Sverige har. Det finns lite lagring för sol- och vindkraft vilket förvärrar problemen med oregelbunden elproduktion. Sverige har däremot stor potential för vindkraft och biomassa och en stor andel av Sveriges el kommer från vattenkraft. Både biomassa och vattenkraft är regelbundna och kan, till skillnad från sol och vind, användas när behovet uppstår. Sammansättningen av elsystemet i form av installerad teknik och bränslen är alltså en viktig faktor för de stora elbolagens reaktion på förnybara energikällor.

En annan faktor som skiljer det svenska och tyska fallen åt är de politiska systemen. Vi karakteriserar det svenska politiska systemet som ett relativt slutet korporativt system som domineras av storindustrin, fackföreningar och myndigheter. Det tyska systemet är däremot, trots att det också är i stort sett korporativt, är mer öppet och mottagligt för påverkan från starka samhällsrörelser, vilket ledde till införandet av en så kallad "feed-in-tariff", alltså ett garanterat elpris till producenter av förnybar el, och en efterföljande utbyggnad av förnybar energi där en övervägande majoritet av investerarna inte var stora elbolag.

I Sverige har de stora elbolagen proaktivt påverkat den förnybara energipolitiken. Resultatet har blivit ett kvotssystem som är ekonomiskt fördelaktigt för dem. De mindre elproducenterna i Sverige har emellertid känt sig exkluderade och antagit en reaktiv strategi, om än med liten framgång. De tyska stora elbolagen lyckades inte få igenom sin linje. De motsatte sig feed-in-tariffen rakt igenom och missade i princip båten vad gäller utbyggnaden av förnybar el. Först försökte de skapa praktiska hinder för privata investerare och senare försökte de ändra de politiska, legala och sociala förutsättningarna samt marknadsförutsättningarna för förnybar elproduktion för att förhindra en snabb utbyggnad. När utbyggnaden ändå fick fart ändrade elbolagen sig till att försöka sakta ner den genom missgynnsam reglering. Inte förrän mycket långt in i matchen började de själva överväga att ge sig in i förnybar elproduktion.

Sammantaget tyder våra fall på att de stora elbolagen reagerade enligt sina upplevda ekonomiska intressen, och deras svar på den förnybara utmaningen varierar beroende på hur de tror att de kan behålla sina marknadspositioner, inklusive sina vinstförväntningar. På det hela taget var deras vinstorientering för kortsiktig för att de skulle kunna föreställa sig ett aktivt deltagande i den tidiga utvecklingsfasen, då de små förnybara anläggningarna verkade anti-moderna och sammankopplades med kärnkraftsmotståndare. Dessutom var de måna om att skydda sin befintliga elproduktion då elanvändningen växte mycket långsamt vid den tiden.

I Sverige använde de stora elbolagen sin goda tillgång till politiken för att säkra ett kvot- och certifikatsystem som valde ut teknologier som var lönsamma och enkelt kunde integreras. I Tyskland avfärdade elbolagen en kraftfull efterfrågan på förnybar el vilket gjorde att de så småningom kringgicks. Den nuvarande tyska regeringen tycks nu fast besluten att hjälpa de stora elbolagen på bekostnad av en långsammare omställning till ett hållbart energisystem.

14

OM KOSTNADS- DISKUSSIONEN – HAR VI RÅD MED FÖRNYBAR EL?

Staffan Jacobsson

Institutionen för energi och miljö, Chalmers*

Volkmär Lauber

Institutionen för politiska vetenskaper och sociologi, Salzburg universitet

* Avdelningen för miljösystemanalys

Tysklands lag om förnybara energikällor (Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG) från år 2000 har spelat en avgörande roll för den anmärkningsvärda utvecklingen och spridningen av förnybar energiteknik i Tyskland. På senare år har emellertid den sittande regeringen börjat vända sig mot EEG. Deras främsta argument är att omställningen av energisystemet har blivit för dyr, så dyr att den hotar att underminera Tysklands ekonomi. Omställningen måste därför saktas ned för att bli överkomlig i pris.

Den tyska kostnadsdebatten kring förnybar el har även spridit sig till andra länder inom EU och till EU-kommissionen som bekymrar sig över hur hushållen ska ha råd med el och hur affärsverksamheter ska kunna vara konkurrenskraftiga.

Stämmer det att vi inte har råd att ställa om till ett förnybart energisystem? Det visar sig att kostnadsberäkningar är högst politiska i frågan om vad som inkluderas respektive utelämnas i beräkningen. Vi visar på tre olika sätt som detta sker.

I och med EEG fick elkunderna i Tyskland ett tillägg på elpriset för att finansiera investeringar i förnybar energi. Pristillägget var från början lågt men har gradvis stigit, och år 2013 låg det på 5,3 eurocent per kilowattimme. Det vore därför enkelt att dra slutsatsen att energiomställningen är en växande börda för kunderna. EEG-tillägget är dock bara en komponent i elpriset, och ser vi på procentandelen av det totala elpriset har EEG-tillägget inte ökat särskilt mycket. År 2013 stod det för 18 % av konsumentpriset. Dessutom är många industrier i stor utsträckning

undantagna från EEG-tillägget. Hade det istället fördelats lika på alla elkunder hade man kommit ner i 2,3 eurocents, vilket är en mindre andel av del av ett elpris på 28 eurocent.

Från att fokus tidigare har legat på totala kostnader för elproduktionen har debatten allt mer kommit att handla om konsumentpriser. Därmed utelämnas kostnader för de konsekvenser som fossil elproduktion medför: människor drabbas av luftvägssjukdomar, klimatrelaterade stormar och torka orsakar stora skador, och anpassningar måste göras till ett förändrat klimat – till exempel för att säkra kuststäder mot översvämningar. Vissa anser att EU:s handel med utsläppsrätter är en tillräcklig åtgärd, men med nuvarande prisnivåer täcker den långt ifrån alla kostnader.

Det är svårt att beräkna dessa, så kallade, externa kostnader för elproduktion, men tyska miljömyndigheten UBA har uppskattat dem till ungefär 10 eurocent per kilowattimme för kol-el. Lägg dessutom till subventioner via statsbudgeten kommer kol-el upp i samma totala kostnad som förnybar el – det är således ingen extra "börda" förknippad med den installerade förnybara energitekniken. Med den kostnadssänkning som har skett för sol- och vindel under senare år är det idag kol-el som är kostnadsineffektivt vid nya installationer.

Dessutom är förnybar energi inte bara ett alternativ bland många andra – det är en nödvändighet för att kommande generationer ska få ett bra liv här på jorden. Vi måste därför säkerställa produktionen av de stora volymer av koldioxidfri el, till rimliga konsumentpriser, som behövs för att kunna fasa ut fossila energikällor under de kommande decennierna. För att det ska bli verklighet måste dagens kortsiktiga kostnadsfokus ersättas med ett långsiktigt synsätt som ger utrymme för nya industrier, som utvecklar och sprider nya tekniker, att växa fram. Nyttan för framtida generationer bör alltså också läggas in i kostnadskalkylen.

15

VARFÖR EN STRATEGI FÖR HAVSBASERAD VINDKRAFT?

Staffan Jacobsson

Kersti Karltorp

Institutionen för energi och miljö, Chalmers*

Fredrik Dolff

Miljöbyrån Ecoplan AB, Göteborg

* Avdelningen för miljösystemanalys

Vindkraft på land är numera en etablerad teknik för förnybar elproduktion, medan havsbaserad vindkraft fortfarande är under utveckling. Flera europeiska länder planerar emellertid en utbyggnad och EU har pekat ut havsbaserad vindkraft som en strategisk teknik i ansträngningarna att minska koldioxidutsläppen från europeisk elproduktion. Sveriges inställning till havsbaserad vindkraft är hittills passiv. Vi menar att Sverige bör ta en aktiv roll och initiera en strategi för storskalig utbyggnad i svenska vatten.

I debatten framförs ofta två argument mot investeringar i förnybar energi: För det första producerar Sverige redan mer el än vad vi behöver och för det andra har Sverige redan uppnått EU-målen om andelen förnybar energi för 2020. Tekniskt sett är argumenten korrekta, men de har för kort tidsperspektiv och fokuserar enbart på Sverige.

Det finns en betydande risk för ett rejält produktionsgap när landets åldrande kärnkraftverk når slutet av sin livslängd i början av 2030-talet. Det kan tyckas vara långt fram i tiden, men de storskaliga elproduktionsanläggningar som behövs för att ersätta dem tar lång tid att projektera och bygga. För Europa som helhet förväntas produktionsgapet bli enormt – mängder av förnybar elproduktion måste införas för att vi ska lyckas minska koldioxidutsläppen enligt uppställda mål under de kommande decennierna. Sverige är del av EU och potentialen för havsbaserad vindkraft är stor nog för att Sverige ska kunna exportera el och därmed väsentligt bidra till att EU-målen nås.

Genom att initiera en omfattande utbyggnad av havsbaserad vindkraft redan nu

kommer Sverige ha tillräckligt med el när kärnkraften fasas ut och kan dessutom hjälpa resten av EU att bli mer klimatvänligt genom export av förnybar el. En utbyggnad av havsbaserad vindkraft ger även nya affärsmöjligheter. Tillgängliga uppgifter tyder på att det är billigare att generera vindel i Östersjön än i Nordsjön (bland annat eftersom påfrestningarna i form av vågor och salthalt är lägre). Sverige har därför möjlighet att utvecklas till en kostnadseffektiv leverantör av havsvindel. En tidig hemmamarknad skulle även ge svensk industri ett försprång. Det finns alltså många anledningar till att inleda en omfattande utbyggnad av havsbaserad vindkraft. Varför behövs då en strategi för utbyggnaden?

Jo, det är många långsiktiga processer som måste startas. För att skapa en marknad behövs ett regelverk som premierar investeringar i havsbaserad vindkraft. Det nuvarande svenska elcertifikatsystemet premierar de billigaste förnybara teknikerna, för närvarande vindkraft på land och kraftvärmeverk eldade med biomassa, och hjälper alltså inte havsbaserad vindkraft nämnvärt. Vi föreslår istället en långsiktig så kallad feed-in-policy med en garanterad och kostnadstäckande betalning för den genererade elen under ett antal år och med en viss riskkompensation inbyggd för tidiga investerare. Det skulle skapa en mer attraktiv balans mellan risker och intäkter.

Den existerande forskningen och utvecklingen i Europa fokuserar på de svåra förhållandena i Nordsjön. Sverige skulle behöva ett forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprogram som är anpassat till de fysiska förhållandena i Östersjön.

För närvarande är det en mycket komplex och långdragen process att söka tillstånd för att bygga vindkraftparker till havs. Processen behöver förenklas. Dessutom behöver investeringar i elnätet på land koordineras med en planerad utbyggnad. Hamnar är också en viktig infrastruktur som kan behöva investera i nya faciliteter. En omfattande utbyggnad kräver också människor med rätt kompetens, såväl drift- och underhållspersonal som elnätsexperten. Här behövs i god tid koordinering med utbildningsväsendet för att undvika flaskhalsar.

Marknad	Utforma en feed-in-lag som gör balansen mellan risker, kostnader och intäkter attraktiv för investerare.
Tillstånd	Utforma ansökningsprocessen så att ledtider och kostnader minskas, bland annat genom fysisk planering av svenska vatten.
Överföring	Utforma ett regelverk för utökning av elnätet som garanterar anslutning och förenklar koordinering av investeringar både inom landet och över gränser.
Hamnar	Skapa långsiktiga mål och stabila förhållanden som gör det attraktivt för hamnägare att göra investeringar.
Finansiellt kapital	Säkra tillgång till kapital som krävs för en omfattande utbyggnad till rimliga kostnader.
Humankapital	Säkra tillgången till specialiserat humankapital.
FoU och innovation	Skapa ett forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprogram med tonvikt på tekniska lösningar lämpliga för Östersjön.

Figur 15.3 Politiska utmaningar för havsbaserad vindkraft i Sverige.

16

BEHOV AV INVESTERINGAR OCH KOMPETENS – EXEMPLET HAVSBASERAD VIND

Kersti Karltorp
Staffan Jacobsson
Björn Sandén

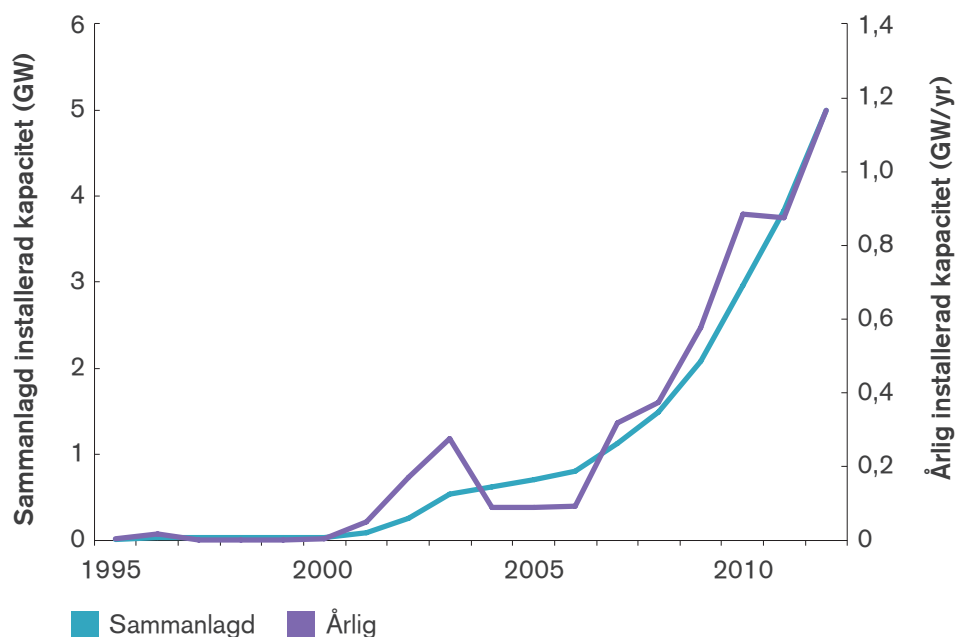
Institution för Energi och miljö, Chalmers*

*Avdelning för miljösystemanalys

En ökning av andelen förnybar energi medför stora tekniska utmaningar, men också utmaningar av icke-teknisk natur. Ett exempel på detta är behovet av investeringar och kompetensförsörjning i växande industrier. I detta kapitel beskrivs dessa utmaningar med hjälp av exemplet havsbaserad vindkraft inom EU.

Under 2013 investerades 5–6 miljarder euro i 13 vindkraftsparker om totalt 418 turbiner. Om EU:s medlemsländer når målen satta för 2020 skulle den sammanlagda produktionen från havsbaserad vindkraft kunna uppgå till 140 terawatttimmar (TWh) per år, vilket idag skulle detta motsvara 4 % av elproduktionen i EU. Detta motsvarar investeringar på 130–150 miljarder euro.

Hittills har huvuddelen av investeringarna kommit från kraftbolag. Europeiska investeringsbanken och olika exportråd har också spelat en viktig roll. Men nu framträder en rad investeringsutmaningar. För det första krävs det mer externt kapital om kraftbolagen ska utveckla fler parker parallellt, det vill säga kraftbolagen kan inte äga alla parker som de bygger. Men tekniken är fortfarande förknippad med höga risker och höga kostnader vilket får potentiella investerare att tveka. Dessutom har finanskrisen medfört förändringar på finansmarknaden, vilket lett till att fler partner måste gå samman för att ge lån till stora projekt som havsbaserad vindkraft. Detta leder i sin tur till ökade kostnader för själva finansieringen.



Figur 16.1 Sammanlagt och årlig installation av havsbaserad vindkraft i Europa. Källa: (EWEA [2013](#))

I de länder där utbyggnad av havsbaserad vindkraft nu pågår, till exempel Storbritannien, stöds den av ekonomiska subventioner vilket reducerar marknadsrisken men ökar den politiska risken. På sikt kan detta leda till ökad erfarenhet, sänkta kostnader och minskad risk. Ett alternativ är att styra investeringar mot förnybar energi genom att utfärda obligationer och fonder som enbart får investeras i förnybar energi.

En annan utmaning för havsbaserad vindkraft är att tillgodose behovet av kompetens för utveckling och utbyggnad. Den europeiska vindkraftsbranschens organisation (EWEA) har beräknat att de 30 000 personer som arbetar med havsbaserad vindkraft kommer att behöva öka till 300 000 år 2030. Redan idag finns brist på vissa områden, till exempel ingenjörer som kan arbeta med drift och underhåll. Just ingenjörer utgör en nyckelresurs inom området och till år 2020 beräknas ytterligare 10 000 ingenjörer behövas, huvudsakligen hos turbintillverkare och kraftbolag. Den stora flaskhalsen är elkraftingenjörer, men även flera andra ingenjörskompetenser behövs. Det kommer att finnas behov av nya kombinationer, både kombinationer av olika typer av ingenjörskompetenser och ingenjörskompetenser kombinerade med andra kunskapsområden exempelvis meteorologi och projektledning. Redan idag finns utbildningar riktade mot vindkraft på flera håll i Europa. Ingenjörer med efterfrågad kompetens kan också rekryteras från andra industrier. Trots detta behöver fler utbildningsprogram och kurser utvecklas och anpassas till det behov som förutspås.

Sammanfattningsvis kräver en storskalig introduktion av förnybar energi inte bara utveckling av teknik utan även en anpassning av olika delar av samhället, inte minst finanssektorn och utbildningssystemet.

EN PLATTFORM FÖR LÄRANDE OM HÅLLBARA TEKNIKSYS-TEM

Energi- och klimatutmaningen är enorm och jordens befolkning är på väg mot en osäker framtid. Teknikens roll i samhällsutvecklingen är tveeggad. Å ena sidan är tekniken definitivt en del av problemet men på samma gång kan vi inte ställa om samhället mot en hållbar utveckling utan ny teknik. Vi behöver därför lära oss mer om vilken teknik som är önskvärd och hur teknikutvecklingen kan styras.

Chalmers Styrkeområde Energi har initierat satsningen "Perspektiv på ny teknik". Satsningen har en tvärvetenskaplig utgångspunkt och den har hittills samlat ett sjuttiofem forskare för att bedöma ny teknik med avseende på potential och risker och vilka tekniska, ekonomiska och politiska förutsättningar som krävs för att ny teknik skall slå igenom och nå storskalig spridning i samhället. Satsningens ambition är att skapa en plattform för lärande om teknikområden med stor betydelse för framtiden. Resultatet är en serie "levande" e-böcker som vi i ljuset av ny kunskap uppdaterar regelbundet. Vi avser inte att ge ett slutgiltigt svar, men vi vill ge underlag till en fördjupad och breddad diskussion. Serien består nu av tre böcker:

Perspektiv på förnybar el - möjligheter och utmaningar med produktion och användning av el från förnybara energikällor

Perspektiv på eldrivna fordon – möjligheter och utmaningar med eldrivna transporter av gods och människor

Perspektiv på förädling av bioråvara – möjligheter och utmaningar med produktion av kemikalier, material och bränslen från skog och jordbruk

Om de mångfasetterade resultaten skall sammanfattas i en mening kan vi konstatera att det vimlar av hinder att ta sig över och fallgropar att undvika men också av framkomliga vägar, så det finns all anledning att samtidigt vara mycket orolig och mycket hoppfull.

Björn Sandén, huvudredaktör

