

north  
european  
power  
perspectives



Översiktlig bedömning av teknikutveckling och tillämpning inom nyckelområden som ställer nya krav på att elnäten utvecklas

- elfordon, vindkraft, solceller och energilagring

Slutrapport



NEPP report

December 2013

Rapport till Samordningsrådet för smarta elnät

Översiktlig bedömning av teknikutveckling och tillämpning inom nyckelområden som ställer nya krav på att elnäten utvecklas

– **elfordon, vindkraft, solceller och energilagring**

Slutrapport, december 2013

Stefan Montin, Elforsk

Anders Björck, Elforsk

Monika Adsten, Elforsk

Harald Haegermark, Elforsk

Delrapport till Samordningsrådet för smarta elnät

## Elfordon – Teknik- och marknadsutveckling

### Sammanfattning

Begreppet elfordon rymmer ett flertal olika typer av elektrifierade fordon. Här ingår t.ex. tvåhjuliga elfordon, ultralätta elbilar, personbilar av typen rena elbilar och laddhybrider, elektrifierade bussar och lastbilar, med mera.

Det faktiska antalet elbilar i världen är mycket begränsat, långt mindre än en procent av den totala fordonsflottan. Marknadsutvecklingen för elbilar bestäms av ett flertal faktorer, där kostnadsläget och fordonens prestanda kommer att vara helt avgörande.

Kostnaden för inköp av elbilar är idag väsentligt högre än för motsvarande konventionella fordon med förbränningsmotorer. Det beror i första hand på höga kostnader för elbilens batterier. Mycket talar dock för att kostnaden för batterierna kommer att sjunka under de närmaste åren vilket innebär att kostnaderna för elbilarna på sikt kan antas bli väsentligt lägre än idag.

Helt avgörande för marknadsutvecklingen för elfordon i Sverige, Europa och resten av världen är – förutom pris/prestanda för fordonen – i vilken utsträckning energi- och klimatpolitiken inriktas mot att minska koldioxidutsläppen från transportsektorn och transportsektorns beroende av olja. I praktiken kommer det att krävas kraftfulla styrmedel som på olika sätt gynnar fordon med små eller inga koldioxidutsläpp om elfordonen ska kunna bli ett betydande inslag i fordonsparken.

År 2011 publicerade EU en färdplan för transportpolitiken i Europa med målet att bl.a. minska utsläppen av växthusgaser från transportsektorn med 60 procent fram till 2050. I Sverige har riksdagen angivit den långsiktiga prioriteringen att Sverige år 2030 bör ha en fordonsflotta som är oberoende av fossila bränslen. Dessa visioner/mål bidrar till att driva på en omställning av transportsektorn i riktning mot ökad elektrifiering. Den Europeiska bilindustrin intresseorganisation ACEA gör bedömningen att försäljningen av elfordon kommer att ligga mellan 2-8 procent av nybilsförsäljningen i Europa under 2020-talet givet dagens förutsättningar.

Om hälften alla personbilar i Sverige (ca 4,5 miljoner) på sikt ersattes med rena elbilar och laddhybrider så skulle elbehovet uppgå till ca 7 TWh el. (Hela den årliga svenska elanvändningen uppgår till närmare 150 TWh/år). Om samtliga dessa fordon laddades på ett icke styrt sätt i samband med att de är parkerade uppskattas effektbehovet öka med upp mot 2000 MW. Om däremot laddningen sker på ett mer kontrollerat och styrt sätt uppskattades effektökningen hamna kring 1000 MW. Dessa nivåer kan jämföras med den totalt installerade elproduktionskapaciteten i Sverige på 36 000 MW och det maximala uppmätta timeffektbehovet på 26 500 MW (år 2011).

## **Inledning**

Fordonstillverkarna världen över har under de senaste åren fokuserat stora delar av sina forsknings- och utvecklingsresurser mot att effektivisera fordonens bränsleförbrukning. Skälet är dels önskemålet om att minska transportsektorns oljeberoende, dels allt strängare miljökrav bl.a. vad gäller utsläppen av växthusgaser från trafiken. En låg bränsleförbrukning är dessutom ett viktigt försäljningsargument i takt med allt högre oljepriser

Ett viktigt led i denna utveckling handlar om satsningar på elbilar och hybridfordon, dvs. fordon som drivs via en kombination av en el- och förbränningsmotor. Genom elektrifiering och hybridiseringen minskar fordonens energianvändning högst väsentligt, framför allt genom elmotorernas höga verkningsgrad, men också genom att fordonen kan återanvända en del av rörelseenergin vid inbromsning. Även miljö- och klimatskäl bidrar till att göra eldrift attraktiv. Utsläppen försvinner helt i närmiljön och utsläppen kopplade till elproduktionen kommer att minska i takt med att den europeiska elproduktionen ställs om mot förnybara energikällor.

## **Begreppet elfordon**

Begreppet elfordon rymmer ett flertal olika typer av elektrifierade fordon. Här ingår bl.a. tvåhjuliga elfordon (elmopeder, elcyklar, elmotorcyklar), ultralätta elbilar, personbilar av typen batterielbilar och laddhybrider, elektrifierade bussar (hybrider, ren eldrift med batteri eller trådbussar), eldrivna lastbilar (med t.ex. strömmatning via luftledningar, induktiv matning eller strömskena i marken) samt elektrifierade arbetsfordon och vissa typer av arbetsmaskiner. Även bränslecellsdrivna fordon brukar nämnas i kategorin elfordon.

I denna rapport till Samordningsrådet för smarta elnät behandlas i första hand eldrivna personbilar av typen batterielbilar och laddhybrider.

## **Marknadsutvecklingen för elbilar**

### ***Fåtal elbilar idag***

Även om det i pressen nu skrivs ganska mycket om elbilar så är det faktiska antalet elbilar i världen trots allt mycket begränsat, långt mindre än en procent av världens fordonsflotta. Norge, som anses som ett föregångsland för elbilar, hade hösten 2013 ca 15 000 elbilar. I t.ex. Holland fanns i början av 2013 ca 5000 elbilar. Bedömningen är att antalet elbilar där kommer att öka till ca 15 000 vid årets slut. I USA uppgick försäljningen av elbilar till 0.38 procent av nybilsförsäljningen. Många länder har dock mycket ambitiösa planer och samtidigt betydande subventioner för att stödja marknadsintroduktionen av elfordon. Holland har t.ex. som uttalat politiskt mål att det år 2020ska finnas 200 000 elbilar i landet.

Den framtida marknadsutvecklingen för elbilar bestäms av ett flertal faktorer, där kostnadsläget och fordonens prestanda kommer att vara helt avgörande. Men det handlar också om mjuka faktorer som kundernas inställning till elbilen och om man är beredd att acceptera ett tekniskifte som för batterielbilen i viss mån innebär ett ändrat körbeteende.

Kostnaden för inköp av elbilar är idag väsentligt högre än för motsvarande konventionella fordon med förbränningsmotorer. Det beror i första hand på höga kostnader för elbilens batterier, men också på att elbilen i sig är en ny konstruktion med relativt små serier. För laddhybrider är dessutom drivlinan mer komplex jämfört med konventionella fordon, vilket bidrar till att öka kostnaderna.

Marknadsutvecklingen påverkas också av att det råder viss osäkerhet om batteriernas åldringsegenskaper. Batterikapaciteten försämras bl.a. av antalet laddcykler. Höga kostnader, osäkerhet om batteriprestanda och osäkerhet om elbilens andrahandsvärde leder sammantaget till att introduktionen av elfordon både i Sverige och i världen i övrigt sannolikt kommer att vara relativt måttlig under de närmaste åren. Den europeiska bilindustrins intresseorganisation ACEA<sup>1</sup> gör t.ex. bedömningen att försäljningen av elfordon kommer att ligga mellan 2-8 procent av nybilsförsäljningen i Europa under 2020-talet givet dagens förutsättningar.

Mycket betydande forsknings- och utvecklingsinsatser bedrivs nu världen över för att vidareutveckla elbilarnas batterier. Det talar för att batterikostnaderna kommer att sjunka samtidigt som batteriernas prestanda ökar både vad gäller laddningskapacitet och livslängd. Dessutom blir teknologin för elbilarna i sig alltmer etablerad. Det innebär sammantaget att kostnaderna för elbilarna på sikt kan antas bli väsentligt lägre än idag.

Parallellt med utvecklingen av elbilar pågår även en betydande utveckling av konventionella fordon med sikte på att minska bränsleförbrukningen. Framför allt blir förbränningsmotorerna mer bränslesnåla. Det gör att konventionella fordon även framöver kommer att konkurrera med nya alternativa fordon.

Avgörande för marknadsutvecklingen för elfordon i Sverige, Europa och resten av världen är – förutom pris/prestanda för elfordonen – i vilken utsträckning energi- och klimatpolitiken inriktas mot att minska koldioxidutsläppen från transportsektorn och transportsektorns beroende av olja. I praktiken kommer det att krävas kraftfulla styrmedel som på olika sätt gynnar fordon med små eller inga koldioxidutsläpp om elfordonen ska kunna bli ett betydande inslag i fordonsparken.

### ***EU anger målen för Europas transportpolitik***

År 2011 publicerade EU en färdplan för transportpolitiken i Europa fram till 2050 (1). Syftet med färdplanen är att öka mobiliteten och fortsätta integrationsarbetet inom EU:s transportnätverk samt att samtidigt reducera utsläpp av växthusgaser och minska EU:s beroende av importerad olja.

---

<sup>1</sup> European Automobile Manufacturers' Association

I färdplanen presenter Kommissionen en lång rad åtgärder som sammantaget siktar mot att minska utsläppen av växthusgaser från transportsektorn med 60 procent fram till 2050 (jämfört med 1990 års nivå). Som delmål anges att utsläppen av växthusgaser 2030 ska minska med 20 procent (jämfört med 2008 års nivå).

Ett centralt förslag i färdplanen är att användningen av konventionella fordon i städerna ska halveras till 2030 och att konventionella fordon ska vara helt utfasade till 2050 och ersatta av andra typer av fordon, bl.a. elfordon.

I en kommunikation till EU-parlamentet 2013 om Clean Power for Transport framhåller Kommissionen att teknologin för elfordon nu håller på att mogna och att fordonen börjar komma ut på marknaden (2). Enligt Kommissionens bedömning kommer det att finnas mellan 8-9 miljoner elfordon i EU:s medlemsländer år 2020.

Nyligen godkände EU-parlamentets utskott för Miljö, folkhälsa och livsmedelssäkerhet ett lagutkast för koldioxidutsläpp för personbilar. Förslaget ställer krav på högst 95 g CO<sub>2</sub>/km för nybilsförsäljning i EU år 2020. Utskottets förslag innehåller också vägledande mål till 2025 där målet är 68-78 g CO<sub>2</sub>/km. Översatt innebär målet att bränsleförbrukningen år 2020 (beräknat på medelvärdet för nybilsförsäljningen) får vara högst ca 3,9 liter bensin/100km och 2025 högst ca 3 liter/100 km. (Medelvärdet nu i Europa är ca 5,5 liter/100 km). Dessa krav bidrar till att göra elfordon mer intressanta för fordonsindustrin, men driver också på utvecklingen av mer bränslesnåla bensin- och dieselmotorer.

### ***Sverige och målet om en fossiloberoende fordonsflotta***

Sverige hade i november 2013 ca 4,5 miljoner personbilar i trafik<sup>2</sup>. Antalet elbilar är dock begränsat och uppgick i slutet av år 2013 till 3060, enligt statistik från Power Circle<sup>3</sup>

I regeringens proposition En sammanhållen svensk klimat- och energipolitik redogörs för den långsiktiga prioriteringen att Sverige år 2030 bör ha en fordonsflotta som är oberoende av fossila bränslen samt för visionen att Sverige 2050 ska ha en hållbar och resurseffektiv energiförsörjning utan nettoutsläpp av växthusgaser i atmosfären (3). I propositionen redovisas också olika delåtgärder för att nå denna vision. Bland annat anges en satsning på förnybara drivmedel och energieffektivare fordonstekniker, elhybridbilar och elbilar.

<b>Elbilen i Sverige (ELIS) december 2013</b>	
<b>Totalt laddbara elbilar</b>	3 060
<b>Personbilar</b>	2 464
BEV	924
PHEV	1 540
<b>Lätta Lastbilar BEV</b>	523
<b>Fyrhjulingar MC BEV</b>	73
Andel av samtliga bilar	0,05 %
<b>Sedan föregående månad</b>	166
i procent	6 %
<b>Sedan årsskiftet</b>	1 464
i procent	92 %
<b>CPEV (brutto)</b>	0,16
<b>Samlad energilagring</b>	~ 42,4 MWh

Antalet elfordon i Sverige december 2013,  
Källa: Statistik från Power Circle

<sup>2</sup> Fordonsstatistik från Transportstyrelsen,  
<http://www.transportstyrelsen.se/sv/Press/Statistik/Vag/Fordonsstatistik/Fordonsstatistik-november-2013/>

<sup>3</sup> <http://www.powercircle.org/>

Regeringen tillsatte i juli 2012 en särskild utredare<sup>4</sup> med uppgift att kartlägga möjliga handlingsalternativ samt identifiera åtgärder för att reducera transportsektorns utsläpp och beroende av fossila bränslen i linje med visionen för 2050. Den 16 december 2013 lämnade utredningen sitt betänkande<sup>5</sup> "Fossilfrihet på väg" SOU 2013:84 (4).

Utredningen har definierat en fossiloberoende fordonsflotta som ett "vägtransportssystem vars fordon i huvudsak drivs med biodrivmedel eller elektricitet". Utredningen räknar med att en omställning till fossiloberoende fordonsflotta kräver betydande insatser inom följande fem områden:

- Planera och utveckla attraktiva och tillgängliga städer som minskar efterfrågan på transporter och ger ökad transporteffektivitet
- Infrastrukturåtgärder och byte av trafikslag
- Effektivare fordon och ett energieffektivare framförande av fordon
- Biodrivmedel
- Eldrivna vägtransporter

### ***En kraftfull omställning av transportsektorn i Sverige***

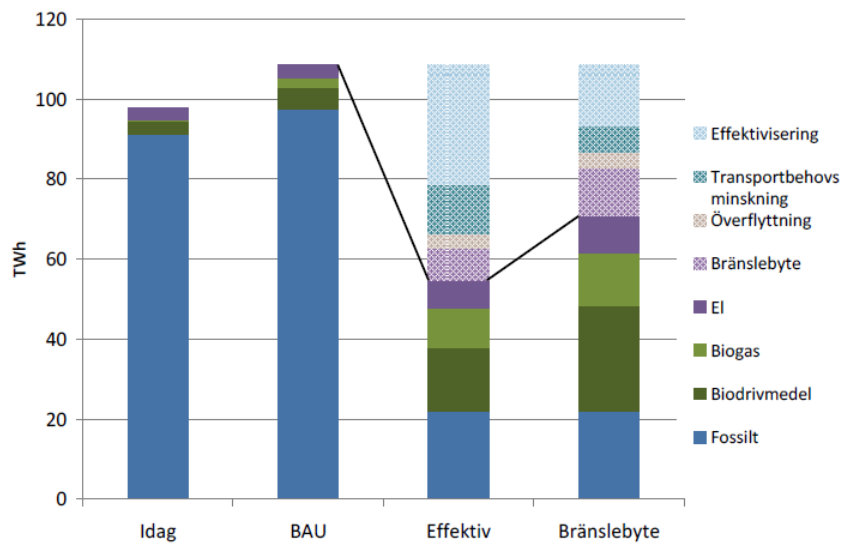
Analysföretaget Profu AB har på uppdrag av Elforsk och Svensk Energi genomfört omfattande utredningar av förutsättningarna att nå målet om en fossiloberoende fordonsflotta till 2030 (5), (6), (7). Analyserna visar att det i princip är möjligt att nå målet, men att det samtidigt förutsätter mycket kraftfulla politiska åtgärder som berör både den enskildes resande och näringslivets transporter. En grundläggande förutsättning för att nå målet är en tydlig politik som långsiktigt lägger fast villkoren för marknadens aktörer och som stakar ut hur fossila bränslen ska fasas ut ur transportsektorn. Det måste dessutom ske i nära samordning med EU:s politik inom transportområdet. Sverige styr t.ex. inte över utsläppskraven för nya personbilar.

Huvudscenariot i de analyser som genomförs av Profu bygger på en kraftfull effektivisering av fordonen och mycket betydande ansträngningar att minska själva transportbehoven. Dessutom sker stora minskningar av användningen av fossila drivmedel genom övergång till eldrift och byte till biodrivmedel samt genom byte av trafikslag.

---

<sup>4</sup>Direktiv 2012:78

<sup>5</sup><http://www.regeringen.se/sb/d/17075/a/230739>



**Figur 1.** *Energianvändning inom det svenska transportsystemet i visionsscenarioet Bränslebyte, med "idag", referensscenarioet "business as usual" (BAU) och scenario Effektiv som jämförelse [TWh/år.]*

Ett av scenarierna i analyserna uppvisar en faktisk energianvändning för transportsystemet på 59 TWh år 2030. Detta kan jämföras med 131 TWh för framskrivningsscenarioet (med samma drivmedelsmix och fordonseffektivitet som idag) för samma år. Det är alltså mer än en halvering av energibehovet. Användningen av fossila bränslen minskar med 85 %.

### ***Elens roll i målet om en fossiloberoende fordonsflotta år 2030***

El får en kraftigt ökad roll för fordonsdrift i analyserna om en fossiloberoende fordonsflotta. Utöver den el som används för järnväg/bantrafik, (som ökar med 50 % jämfört med idag), så sker en övergång till eldrift både inom personbilssektorn och bland tunga vägfordon och arbetsmaskiner. Eldrift införs så att den motsvarar ca 20 % av den återstående mängden energibehov i personbilar, efter effektivisering m.m. Detta måste betraktas som en mycket kraftig introduktion, men till följd av elens mycket höga energieffektivitet så blir det ändå jämförelsevis små mängder el, + 2,4 TWh. Tillsammans med den tunga trafikens elanvändning, som också ökar kraftigt (+ 2,1 TWh) så ökar elanvändningen från 3 till 9 TWh enligt figur 1.

Totalt leder analyserna till att det år 2030 skulle kunna finnas omkring 1 miljoner rena elbilar och laddhybrider om målet om en fossiloberoende fordonsflotta genomförs fullt ut.

### ***Styrmedel***

En av slutsatserna i analyserna om en fossiloberoende fordonsflotta är att en omställning är möjlig men att den inte kommer att ske spontant. Kraftiga styrmedel kommer att behövas. I grunden handlar det om att göra fossildrift dyrare och andra bränslealternativ billigare. Exempel på styrmedel är:



- Höjda drivmedelsskatter
- EU:s regelverk, t.ex. utsläppskrav för nya bilar
- Inför fordonsskatt av fransk bonus/malusmodell
- Inför fler bilfria zoner i städer och tätorter eller förbud mot vissa typer av fordon
- Lokala styrmedel som på olika sätt gynnar fossiloberoende fordon, t.ex. som underlättar parkering och laddning

## **Elfordon**

### ***Personbilar***

Eldrivna personbilarna kan delas in i kategorierna rena elbilar (även kallat batterielbilar och på engelska Battery Electric Vehicle – BEV) och laddhybrider (Plugin Hybrid Electric Vehicle – PHEV). När det gäller den senare brukar man också skilja mellan kategorierna parallell- och seriehybrider beroende på hur elmotorn och förbränningsmotorn samverkar.

I en parallellhybrid kan fordonet drivas både av en elmotor och en förbränningsmotor, tillsammans eller var och en för sig. Förbränningsmotorn driver drivhjulena via en växellåda och elmotorn ger extra kraft vid behov. Vid ren eldrift kopplas förbränningsmotorn bort så att enbart elmotorn driver.

I en seriehybrid drivs fordonet av en elmotor (eller flera) som är kopplad till drivhjulena. Förbränningsmotorn driver en generator som alstrar den ström som driver elmotorn och som laddar bilens batterier under körning. En seriehybrid har ingen mekanisk koppling mellan förbränningsmotorn och drivhjulena. I ren eldrift drivs elmotorn via batterierna.

De eldrivna personbilar som nu börjar komma ut på marknaden har goda köregenskaper. Framförallt märks elmotorns låga energiförluster och goda acceleration. Elbilarna har också fördelen att de är tystare och vissa modeller får även bättre vägegenskaper genom lägre tyngdpunkt på grund av batteriernas placering och betydande vikt. Det som är den rena elbilens stora nackdel är dess korta räckvidd per laddning, vilket för många, åtminstone initialt, upplevs som ett praktiskt hinder. För laddhybriderna är begränsningen i körsträcka på el inte något egentligt hinder. När batterierna är urladdade drivs fordonet via förbränningsmotorn. Elbilarna – både rena elbilar och laddhybrider - är också väsentligt dyrare än sina motsvarigheter med konventionella förbränningsmotorer.

### ***Lätta transportfordon***

Denna kategori elfordon omfattar exempelvis fordon som distribuerar varor i stadsmiljöer eller används som hantverksbilar. Lätta transportbilar är en kategori fordon som lämpar sig väl för elektrifiering då de normalt har relativt begränsade körsträckor och oftast bara används under dagtid. Det ger tid för laddning när bilen står stilla under kvällar och nätter.

### ***Eldrivna bussar***

Kategorin eldrivna bussar omfattar trådbussar, laddhybridbussar, rena batteribussar och bränslecellsbusar. Trådbussar är en beprövad teknologi med runt 350 befintliga system och mer än 40 000 bussar över hela världen. Enbart i Peking rullar närmare 10 000 av dessa. Världens längsta trådbusslinje går mellan Simferopol och Jalta i Ukraina. Rom fick ett modernt trådbussystem 2005 och totalt i Västeuropa finns det idag 48 trådbussystem och i Östeuropa 64 system. Sedan 2003 finns också ett 3 km långt trådbussystem i Landskrona.

Batteribussar och laddhybridbussar demonstreras just runt omkring i världen. I Kina har exempelvis flera hundra batteribussar demonstrerats de senaste åren. I Umeå provas ett antal batteribussar. Vidare pågår försök i Göteborg med laddhybridbussar.

Bränslecellsbusar är i prototypstadiet. De flesta bränslecellsbusar som utvecklats för stadstrafik har varit 12 metersbusar där bränslecellerna varit primärkraftkälla. Bränslecellssystemet har effekter på mellan 125 och 150 kW.

### ***Lastbilar***

Lastbilar utvecklas också mot allt effektivare drivlinor. Hybridisering pågår och ett antal lättare lastbilstyper finns nu också att tillgå med eldrift. Konsultföretaget Navigant Research<sup>6</sup> har uppskattat att det om fem år globalt kommer att säljas ca 100 000 hybrid/eldriftslastbilar. Den största marknaden bedöms då vara Sydostasien följt av Nordamerika.

Under senare tid har elektrifierade vägar diskuterats dvs. där vägsystemet skulle förse tunga fordon (3,5-40 ton) med elmatning, antingen från något trådsystem i luften, kontaktskenor i vägen eller induktivt överfört från spolar i vägbanan. Siemens har exempelvis utformat ett intelligent strömavtagarsystem och demonstrerat ett s.k. trådtradarkoncept. Induktiva transportsystem demonstreras bl.a. i Frankrike där en del spårvagnsystem drivs induktivt.

### ***Nya fordonstyper***

Vissa tillverkare av elbilar har siktat in sig på utveckling av små lätta stadsfordon, s.k. Light Urban Vehicles (LUV). Dessa fordon transporterar 1-3 personer och är tre- eller fyrhjuliga konstruktioner. En bil som sålt ganska mycket under senare år, i framförallt Norge är den lilla "Buddyn". Renault släppte för något år sedan sin "Twizy". Fördelarna med de små eldrivna stadsfordonen är att de tar mindre plats, kan parkera på "tvären" och har förhållandevis långa körsträckor (10-15 mil), så att de i regel inte behöver ladda under dagtid.

---

<sup>6</sup> <http://www.navigantresearch.com/research/smart-transportation>

### ***Elcyklar och elmopeder***

Eldrivna cyklar och mopeder börjar bli allt vanligare både i Sverige och utomlands. Batterierna ger flera mils körning och kan dessutom hos flertalet cykelmodeller lätt tas bort för att laddas t.ex. i hemmet.

Särskilt i Kina har utvecklingen varit mycket kraftfull vad gäller eldrivna cyklar och mopeder. Idag finns enligt uppgift 120 miljoner eldrivna tvåhjulingar i landet<sup>7</sup>. Den kraftiga ökningen av dessa fordon kan delvis hänföras till myndigheternas restriktioner beträffande fossilt drivna tvåhjulingar. Samtidigt finns en oro för att regelverken för eldrivna tvåhjulingar inte hänger med.

### ***Elanvändning och räckvidd för eldrivna personbilar***

Hur mycket el en elbil drar beror på många faktorer, bl.a. bilens vikt, hastighet och trafikförhållanden (antal start & stopp). Dessutom spelar utomhustemperaturen in om bilen ska värmas eller kylas med eldrivna system. Ofta anges elanvändningen till i genomsnitt 2 kWh/mil, men förbrukningen kan vara väsentligt högre t.ex. vid blandad körning en kall vinterdag. Skälet är framför allt att mycket energi går åt till att värma bilen. Även varma somrardagar när kupén ska kylas via luftkonditioneringen ökar elanvändningen. Man kan dock anta att energiåtgången för att värma och kyla fordon samt för fordonens elektronik kommer att minska rejält framöver i takt med utvecklingen av effektivare system. Volvos elbil C30 har t.ex. en extern värmare som drivs med etanol.

Hur långt en elbil kan köra på en laddning bestäms således både av batteriets storlek/lagringskapacitet och av körförhållandena. De batterielbilar som finns idag går vanligen mellan 10-20 mil på en laddning. Den dagliga körsträckan för svenska personbilar är ofta ganska kort. Man brukar säga att körsträckan är kortare än 5 mil 70-80 procent av den tid vi använder bilen. Det betyder att elbilens begränsade körsträcka troligen mer än väl räcker till i de flesta situationer.

Laddhybriden är försedd med ett batteripaket som även kan laddas via ett eluttag. Laddhybriden kan köra en kortare sträcka på enbart el, vanligen 2-5 mil. Förbränningsmotorn användas då bara vid långfärder, dvs. när batterikapaciteten inte längre räcker till eller laddningsmöjlighet saknas.

### ***Exempel på olika bilmodeller***

Den kommersiella lanseringen av elbilar startade omkring år 2010. Under 2012 lanserades sju nya elbilmodeller på den svenska marknaden och under 2013 förväntas tolv nya modeller lanseras och 2014 uppskattningsvis uppemot 20 till.

En tydlig trend är också att de allra flesta fordonstillverkarna i världen har rena elbilar och laddhybrider på programmet och årligen visar upp nya konceptbilar på motormässor.

---

<sup>7</sup> Omvärldsanalys av energieffektiva vägfordon. Nyhetsbrev 2013-12-12, Magnus Karlström CTH

Nedan beskrivs några av de mest sålda elbilarna och några av de som tilldrar sig särskilt intresse för tillfället. Antalet modeller växer dock snabbt.

#### *Mitsubishi iMieV*

Mitsubishi iMiEV var en av de första elbilarna att komma ut på marknaden och som samtidigt i allt väsentligt i övrigt har kvaliteter som dagens konventionella personbilar.

#### *Nissan Leaf*

Efter två år på marknaden och 50 000 sålda exemplar världen över uppdateras nu Nissan Leaf. Utvändigt är förändringen diskret men bilens räckvidd med eldrift har ökats upp från 175 till 200 kilometer. Dessutom har elsystemets komponenter – batteriet undantaget – samlats under motorhuv. Det innebär att plats frigjorts i bagageutrymmet. Bland nyheterna finns även en snabbbladdare som tillval. Ansluten till ett uttag på 32 ampere laddas batteriet fullt på fyra timmar, hälften av den normala laddtiden.

#### *Renault Fluence Z.E.*

Fluence Z.E. är en elbil baserad på Renaults Fluence-modell, där Z.E. står för Zero Emission. Förbränningsmotorn är utbytt mot en elmotor. Bilens batterier är placerade ovanför bakaxeln, mellan passagerarutrymmet och bagagerummet och karossen är förlängd för att bibehålla bagagevolymen.

Bilens batterier leasas ut av Renault eller som i vissa länder av företaget Better Place (som även bygger stationer där urladdade batteripackar kan bytas mot fulladdade). Litiumjonbatteriet på 22 kWh laddas på 8 timmar i enfasuttag med 230 V. De kan även snabbladdas på en halvtimme, men då endast via ett 400 V trefasuttag. Bilens räckvidd anges till 16 mil. Försäljningen planeras starta under 2013 i Sverige.

#### *Toyota Prius Laddhybrid*

Toyota, som haft stor framgång med sin hybridmodell av Toyota Prius, var också tidigt ute på marknaden med en laddbar elhybrid. Toyotas laddbara hybrid kan köra ca 2 mil på enbart el. Modellen är framtagen för att kunna erbjuda miljövänlig körning i t.ex. stadskärnor.

#### *Volvo V60 Laddhybrid*

Volvos erbjuder sedan 2012 en laddhybrid i modellserien V60. Den drivs med hjälp av en elmotor och en dieselmotor. Nu är även ett bensinalternativ på väg att tas fram. Bilen är framtagen i ett samarbete mellan Volvo och Vattenfall. Bilen uppges kunna köra 5 mil i ren eldrift och dra 0,19 liter per mil vid blandad körning. El- och förbränningsmotorn ger tillsammans 285 hästkrafter och har drivning på alla fyra hjulen.

Bilen kostar över en halv miljon kronor, men har enligt uppgift<sup>8</sup> trots det sålt så bra att årsmodellen 2013 är slutsåld och över hälften av kommande årsmodell 2014 sålts redan innan de har börjat tillverkas.

---

<sup>8</sup> Teknikens Värld 2013-03-08

### *Mitsubishi Outlander Laddhybrid*

Mitsubishi Outlander har uppdaterats under 2012 och nu är laddhybridversionen officiell med tilläggsnamnet PHEV. Den fyrhjulsdrivna bilen är försedd med en bensinmotor och två elmotorer. Bensinmotorn driver framhjulen. En av elmotorerna driver också framhjulen medan den återstående elmotorns uppgift är att driva på bakhjulen.

Batteriet kan snabbladdas på 30 minuter till 80 procent av sin kapacitet och full laddning kräver 4,5 timmar i vanligt eluttag. Bränsleförbrukning uppges till 0,16 liter per mil och bilen ska kunna köras på enbart el i 5,5 mil. Med hjälp av bensinmotorn tar den sig ca 80 mil enligt Mitsubishi. Utsläppsnivån ligger på 49 gram koldioxid per kilometer.

### *Chevrolet Volt och Opel Ampera*

General Motors har utvecklat elbilmodellerna Chevrolet Volt och Opel Ampera. Tekniken består av två sammankopplade elmotorer som tillsammans ger 111 kW. De får ström av ett batteri med 288 litiumjonceller. Med fulladdat batteri kan bilarna köra upp till 8 mil eldrift.

### *Tesla Model S*

Tesla Model S är en eldriven sportbil med motoreffekt på 320 kW, eller 422 hk, vilket ger en acceleration från 0-100 km/h på strax över fyra sekunder. Batteriet ger en räckvidd på upp till ca 40 mil.

### *Porsche Panamera S E-hybrid*

Porsche har nyligen presenterade en laddhybrid i modellprogrammet Panamera. Kraftkällan är en treliters V6-motor på 333 hästkrafter och en elmotor på 95 hk. Bränsleförbrukning uppges ha minskats till 3,2 liter per 100 km, vilket motsvarar 71 g CO<sub>2</sub> per km. Räckvidden med enbart eldrift ligger mellan 18 och 36 kilometer, beroende på körstil och användning av elektronisk utrustning. Toppfarten med enbart elmotorn är 135 km/h och bilen kan laddas på 2 eller 4 timmar.

### ***Kostnader och affärsmodeller***

Priset på en elbil varierar i försäljningsledet och beror bl.a. på fordonstyp och batteristorlek samt av vilka subventioner som ges. I Sverige kostar en liten elbil strax under 300 000 kronor, före avdrag av den statliga supermiljöbilspremien på 40 000 kronor. En affärsmodell som prövas av bl.a. Renaults är att sälja bilen utan batteri och sedan leasa ut batteriet till en fast månadskostnad.

## **Batterier**

### ***Litiumjonbatterier***

Elbilarnas batterier är numera nästan uteslutande av litiumjontyp. Batterierna är uppbyggda av tunna skikt som vanligtvis rullats till

cylinderform. Även prismatiska batterier förekommer och dessa är föremål för en stark utveckling. Huvudkomponenterna i cellerna är:

- En negativ elektrod (katoden) som hittills ofta varit gjord av litium-koboltoxid. Som alternativ till Kobolt (Co) används Nickel (Ni) eller Mangan (Mn).
- En positiv elektrod (anoden) som är gjord av kristallin grafit, vanligen lagd på en tunn kopparfolie.
- En organisk elektrolyt, som innehåller ett litiumsalt

Typiska elektriska egenskaper för ett litiumjonbatteri är:

- En förhållandevis hög cellspänning. I normalfallet är den 3,6 V,
- Inga minneseffekter vilket innebär att ett batteri kan laddas vid godtyckligt tillfälle.
- Hög laddningsström (0,5 – 1 A) vilket innebär att så korta tider som 2 timmar är möjliga för att uppnå full laddning.
- Vid urladdning hålls spänningen närmast konstant.

### ***Livslängd och säkerhet***

Idag lämnar i regel batteritillverkarna 10 åriga livslängdsgarantier, motsvarande minst några tusen laddningscykler. Forskningsmålen ligger på mer än 15 års livslängd för att inte begränsa den normala livslängden på själva fordonen, som idag uppskattas minst 15 år. Livslängden påverkar också batteriernas andrahandsvärde för eventuellt andra användningsområden.

Frågan om litiumjonbatteriernas säkerhet har återigen kommit i fokus genom den batteribrand som inträffade i samband med att Boeings nya flygplansmodell Dreamliner landade i Boston den 7 januari 2013 och en tidigare incident med rökutveckling under en flygning i Japan.

De incidenter (huvudsakligen bränder) som inträffat med elfordon under senare år har dock ofta felaktigt refererats som säkerhetsproblem med själva battericellerna och risken för överhettning och termisk rusning. Batteristyrsystemen, kylsystem etc. har dock i de flesta fall fungerat medan exempelvis högspänningssystem, laddningsutrustning och andra externa funktioner felfungerat.

Stora insatser läggs på att försöka hitta inherent skyddssystem på cellnivå som kan begränsa eventuella batteribränder. Toshiba har exempelvis ett inbyggt skydd för kortslutningar där ledningsförmågan sjunker med flera tiopotenser. NEC anger att noggrann kvalitetskontroll av exempelvis elektroderna är den viktigaste faktorn i tillverkningsprocessen för att garantera batterisäkerhet. I fallet med Boeings nya flygplansserie har litiumjonbatterierna nu designats om och placerats i en säkrare inneslutning som isolerar både elektriskt och termiskt. Även batteriets laddningsprocedur har modifierats.

### ***Marknaden för litiumjonbatterier***

Marknaden för fordonsbatterier uppskattas idag till ca 1 miljard USD per år. Det finns gott om uppskattningar om hur marknaden kommer att växa framöver, t.ex. att marknaden år 2020 kommer att uppgå till minst 25 miljarder USD för att under 2030 överstiga 80 miljarder USD. Allt hänger dock nära samman med den globala försäljningen av elfordon.

### ***Utvecklingen av litiumjontekniken***

Forskningen och produktutvecklingen kring nästa generation litiumjonbatterier pågår för fullt. New Energy Development Organization (NEDO) i Japan har exempelvis avsatt 200 miljoner USD till ett 7 årigt program, vars syfte är att ta fram billigare och bättre batterier för fordonstillämpningar.

Den japanska FoU verksamheten kring litiumjontekniken är imponerande i sin långsiktighet och strukturerade ansats. Redan 1992 påbörjade NEDO sitt första batteriprogram. Här sattes tydliga mål för exempelvis energitäthet (150 Wh/kg). Under 2002 startades ett program med fokus på batterier till bränslecellsfordon med ett tydligt mål på livslängd (> 15 år). Det tredje programmet, som startades 2007 lads fokus på kostnaden (<40 000 Yen/kWh, dvs. 400 USD/kWh) till år 2015. Under 2009 etablerades programmet RISING (R&D Initiative for Scientific Innovation on Next-Generation Batteries). Här är målet en energitäthet på 500 Wh/kg med delmål att till 2015 verifiera minst 300 Wh/kg samtidigt som tillförlitlighet och livslängd ska förbättras.

I Tyskland satsar industrin tillsammans med Tyska staten över 360 miljoner euro i en ny litiumjonbatterifabrik. Exempelvis uppger Bosch<sup>9</sup> att man ska utveckla egna litiumjonbatterier med målet att minska kostnaden för batterier med två tredjedelar. När målet uppnås planerar de att bygga en europeisk batterianläggning i Europa. Om allt går bra kan en ny fabrik öppna före 2020.

I Frankrike bygger Johnson-Control Saft en ny litiumjonbatterifabrik. På motsvarande sätt satsas mycket stora resurser i USA, Kina och Sydkorea på forskning och utveckling av litiumjonbatterier.

Kostnadsbesparingar och kontinuerlig processförbättring, övergång till automationsprocesser etc. kommer att innebära en stegvis utveckling av nuvarande batteriteknik.

### ***Bipolära batterier nästa stora steg***

Dr Akira Yoshino från Asahi Kasei Corp, Japan, uppfinnaren av litiumjonbatteriet, beskrev under ett symposium på IVA<sup>10</sup> att stora förhoppningar ställs på att kunna bygga kompakta s.k. bipolära batterier. Det är batteristackar som byggs på cellnivå med många celler seriekopplade. En sådan battericell skulle då kunna tillverkas för spänningsnivåer upp mot

---

<sup>9</sup> Bosch will eigene Li-Ion-Technologie bis 2018 entwickeln. 9 jan 2013. Automobilwoche.

<sup>10</sup> IVA seminarium mars 3013

400 V. Det man vinner är att kompakteringsgraden blir så mycket bättre och därmed ökar energitätheten hos batteriet avsevärt. Svårigheten är att man måste bygga cellerna med interna självregleringsmekanismer, som utjämnar eventuella olikheter mellan cellerna, dvs. det man idag gör med elektronik i batteripackarna.

### ***Litium-svavel och litium-luft batterier***

Toyota har beskrivit sin långsiktiga vision att utveckla litiumluftbatterier med en energitäthet som är tio gånger högre än dagens litiumjonbatterier. Dit är det dock mycket långt. En viktig beståndsdel av dessa nya batterier är fasta elektrolyter. Någon gång efter 2020 siktar Toyota<sup>11</sup> på att ha batterier med fast i stället för flytande elektrolyt.

### ***Kostnadsutveckling för batterier***

När man diskuterar kostnader och prisnivåer för batterier är det viktigt att skilja på om man avser på cellnivå eller på packnivå. Vidare måste man skilja på kategorierna energibatterier och effektbatterier. Effektbatterierna är dyrare än energibatterier. (Det gör t.ex. att batterierna till en laddhybrid är dyrare än batterierna till en ren elbil).

Medelpriset för ett batteri till en elbil var enligt Bloomberg New Energy Finance<sup>12</sup> år 2012 på packnivå 689 USD/kWh, vilken kan jämföras med priset 2009 och 2011 då det låg på 1 000 respektive 800 USD/kWh. Detta motsvarar ett 20 procentigt prisfall mellan 2009 och 2010 och 14 procent under 2011. Prisfallet är enligt Bloomberg New Energy Finance främst en effekt av att utbudet för tillfället överstiger efterfrågan.

Batteriexperten Menahem Anderman<sup>13</sup> påpekade vid ett symposium i Göteborg i mars 2012 att ett mer rimligt antagande om batteriprisutvecklingen skulle ge ett pris på packnivå kring 350 USD/kWh år 2020. Detta är vad fordonsindustrin i nuläget tycks ställa in sig på.

I van Essens och Kampmans<sup>14</sup> batterirapport från Delft University, i April 2011 anges att varje generation litiumjonbatteri åtminstone måste finnas i produktion under fyra till fem år för att kunna återbetala kapitalkostnader och utvecklingen. Detta skulle därmed innebära att nästa generation batterier kommersialiseras runt 2016/2017 och den tredje generationen runt 2020/2021.

Baserat på en undersökning kring batteriutvecklingen anger van Essen och Kampman följande utvecklingspotential relativt batterier under 2010:

---

<sup>11</sup> Enligt Automotive News 11 mars 2013 (Intervju med Shigeki vid Toyotas avdelning för materialutveckling)

<sup>12</sup> <http://about.bnef.com/>

<sup>13</sup> <http://www.totalbatteryconsulting.com/qualifications.html>

<sup>14</sup> ICF International, Eco logic Institute; Huib van Essen, Bettina Kampman; Impacts of electric vehicles – Summary Report, April 2011



- Specifikt energiinnehåll ökar med 20-25 procent fram till 2016 (med motsvarande kostnadsreduktion) på grund av bättre konstruktion och förbättringar kring själva cellpackningen
- Förbättringar på upp mot 70-75 procent i specifik energi och 50 procent kostnadsreduktion per kWh fram till 2020/2022 genom bl.a. införandet av avancerade material för anoder och katoder, t.ex. kiselanoder.
- Potential för att tredubbla specifika energiinnehållet och kostnadsreducera med 70 procent per kWh år 2030 genom introduktion av litiumsvavelkemi.
- Med dessa antaganden skulle 2012 år batteri med ett specifikt energiinnehåll om 105 Wh/kg kunna nå 160 Wh/kg runt 2020, 190 Wh/kg runt 2025 samt 300 Wh/kg år 2030.

Med kostnadsbesparingar även på andra elkomponenter, styrsystem, laddningsomvandlare etc. talar detta för en kraftig prissänkning av elfordon under de närmaste 10 till 15 åren. Det som delvis kan motverka denna utveckling är att fordonstillverkarna väljer att prioritera ökade energilagrar och därmed mer batterier, för att i möjligaste mån öka aktionsradien.

## **Påverkan på elsystemet**

### ***Räcker elen?***

Om hälften alla personbilar i Sverige (ca 4,4 miljoner) ersattes med elbilar så skulle det krävas ca 7 TWh el om vi antar energiåtgången till omkring 2 kWh/mil. Om förbrukningen i stället antas ligga kring 3 kWh/mil blir den totala elanvändningen 10 TWh. I båda fallen en avsevärd energieffektivisering. I räkneexemplen beräknas bilarna ha en årlig körsträcka på 1500 mil. Hela den årliga svenska elanvändningen uppgår till närmare 150 TWh/år.

### ***Effektbehov***

Analyser i forskningsprogrammet Nordic Energy Perspectives visar att en introduktion av 1,3 miljoner elfordon i Norden, vara 600,000 i Sverige kan leda till ett ökat effektbehov i det nordiska elsystemet på 1000-1500 MW, om elbilarna i stor utsträckning laddas – på ett "icke styrt sätt" - under höglasttider (8). Om man däremot kan styra om laddningen till låglasttider, behöver inte ökningen av eleffektbehovet bli större än 300-400 MW.

Pia Grahn, KTH har i sitt licentiatarbete gjort simuleringar av hur laddningen av elfordon påverkar belastningen på elsystemet (9). Simuleringarna visar att om 50 procent av den svenska fordonsparken är eldriven och fordonen laddades på ett icke styrt sätt i samband med att de är parkerade skulle detta leda till en effektökning med ca 1300 MW. Om däremot laddningen sker på ett mer kontrollerat och styrt sätt uppskattades effektökningen hamna kring 1000 MW. Dessa nivåer kan jämföras med den totalt installerade elproduktionskapaciteten i Sverige på 36 000 MW och det maximala

uppmätta timeeffektbehovet på 26 500 MW (år 2011).

Simuleringar har också gjorts av laddning vid lite högre strömstyrkor i samband med pendlingsresor. Detta resulterar i en större toppbelastning när fordonen laddas på ett icke styrt sätt på morgonen i samband med att de parkeras vid arbetsplatserna och på kvällen vid parkering hemma. Om 50 procent av hela den svenska fordonsparken är eldriven vid dessa resor beräknades effektbehovet öka med 2200 MW. Genom att styra laddningen skulle effekttoppen kunna reduceras till ca 1800 MW, enligt Pia Grahns studier.

Studier gjorda vid Chalmers av David Steen visar att en icke styrd laddning av elfordon kan orsaka problem för distributionssystemet i vissa områden (10). Genom att kontrollera laddningen, kan effekterna minskas, men valet av kontrollmetoder måste väljas noggrant. Dessutom indikerar resultaten att en välutvecklad offentlig laddinfrastruktur kan minska belastningen på de lokala distributionssystemen eftersom en del av laddningen då kan ske i kommersiella områden.

## **Laddning**

### ***Laddningsinfrastruktur***

Det finns grovt sett tre typer av miljöer där merparten av laddningen av elfordon bedöms bli aktuellt. Det är vid hemmet, arbetsplatsen och offentliga eller privata parkeringsplatser. För boende i villa och radhus kan laddning vid hemmet ofta ske relativt enkelt, där installationskostnaden för ett ladduttag eller laddbox bedöms uppgå från ett par tusen kronor upp till tio tusen kronor beroende på elsystemets skick typ av ladduttag.

För boende i flerfamiljshus betyder laddning vid bostaden i praktiken att fordonet måste laddas på gatan, vid tillhörande parkeringsplats eller garage. Kostnadsbilden för att bygga ut laddmöjligheter på dessa platser är högst varierande och beroende av de lokala förutsättningarna. Till investeringskostnaden ska också läggas kostnader för underhåll och eventuellt mätning och debitering av elanvändningen.

Kostnaden för att bygga ut laddmöjligheter i gatumiljö, på olika typer tomtmarker eller i garage riskerar i vissa fall att blir så hög det påtagligt påverkar elpriset för laddning och därmed gör det mindre intressant med elfordon i dessa områden. Elforsk har i en studie uppskatta kostnadsbilder för laddning vid några olika miljöer (11). Analysen antyder att elpriset vid laddplatsen hamnar mellan ca 2-5 kr/kWh (vid ett elpris på 1,50 kr/kWh) för att laddplatsoperatörens investering ska vara återbetald inom fem år.

Beräkningarna är mycket grova men de visar ändå tydligt på vikten av att bygga ut laddningsinfrastrukturen kostnadseffektivt. Om inte detta görs finns det risk för att elbilarnas milökostnad i vissa lägen kan bli ungefär lika stor som bensinbilarnas, om investeringar i laddstolpar ska räknas hem på kort

tid. Vem/vilka som kommer att bygga ut laddningsinfrastrukturen i offentliga miljöer och affärsmodellerna för detta här delvis ett frågetecken

### ***EU:s förslag till direktiv om infrastruktur för alternativa drivmedel***

I januari 2013 presenterade EU-kommissionen en strategi för rena drivmedel, däribland el (12). Nyligen ställde sig också Transportutskottet i EU-parlamentet bakom direktivförslaget med vissa justeringar. Förslaget i sin nuvarande form innebär bl.a. att medlemsländer ska bygga upp nätverk av bl.a. offentliga laddningsstationer. För Sveriges del skulle detta innebära att vi ska ha 8 000 publika laddplatser år 2020.

I förslag framhålls att elbilar kan bidra till stabiliteten i elsystemet genom att fordonen laddas på kvällar och nätter när efterfrågan på el är låg. Vidare pekas på möjligheten att använda elbilarnas batterier för återmatning till elnäten vid höglast. Mot den bakgrunden föreslår Kommissionen att laddplatserna bör vara försedda med intelligenta mätare och att priset på el vid laddplatsen bör vara marknadsbaserat, så att flexibel konsumtion (och lagring) av el främjas genom dynamisk prissättning.

För att komma till rätta med osäkerheten på marknaden när det gäller utformningen av eluttagen presenterade Kommissionen samtidigt ett förslag till standard för hela Europa som innebär användningen av s.k. Typ 2-uttaget vid normalladdning och s.k. Typ Combo 2 vid snabbaddning. Även bilindustrin i Europa har kommit överens om användningen av Typ-2 uttag och Combo

I parlamentets förslag anges att de nationella planerna ska innehålla förslag på hur "grön" el ska erbjudas till elfordonen samt också innehålla mål för mer elfordon i kollektivtrafiken.

Förslaget om ett direktiv om infrastruktur för alternativa drivmedel är föremål för fortsatta förhandlingar i bl.a. ministerrådet.

### ***Normalladdning***

Laddningstiden bestäms framför allt av två faktorer. Lite förenklat – vilken säkring man har och om man laddar med 1-fas eller 3-fas. Sedan avgör batteriets storlek hur mycket energi som kan lagras. Vanliga vägguttag i hemmet är normalt 1-fas och säkrade med 10 ampere. Det tar ca 10 timmar att ladda för ca 10 mils körning från ett vanligt vägguttag med 10 A säkring (20 kWh om elbilen antas dra 2 kWh/mil). Bilfabrikanterna ser dock helst att det är möjligt att ladda med högre strömstyrkor upp mot 16 ampere.

I tabellen 1 anges hur många mil som kan köras efter 1 timmes laddning beroende på säkring och om det är 1- eller 3-fas. Laddning med höga amperetal (över 16 A) är knappast aktuellt vid laddning hemma och det finns få elfordon på marknaden som är anpassade för trefasladdning.

Laddningssystem

mil/timmes laddning		1-fas 230 V	3-fas 400 V
Säkring	10 A	1	3
	16 A	1,6	4,8
	20 A	2	6
	32 A	3,2	9,6
	63 A	6,3	18

Tabell 1. Amn: Antagen energianvändning 2 kWh/mil

### **Styrning av laddningen - smart laddning**

Med ett stort antal elfordon i den svenska fordonsparken aktualiseras frågan om att kunna styra laddningen till tidpunkter då elsystemet inte är så hårt belastat. Det kan handla om att undvika laddning vid effekttoppar och att styra laddningen till tidpunkter med överskott i elproduktionen. Det kan också handla om att t.ex. begränsa belastningen i elnäten regionalt eller lokalt. Detta gäller även på fastighetsnivå exempelvis i garage och på parkeringsplatser när säkringar och ledningar inte klarar att ett flertal elfordon laddar samtidigt.

Styrningen kan ske på olika sätt. En modell som ofta förs fram är att styra efter ett timpris på el. I EU-kommissionens förslag till direktiv om infrastruktur för alternativa bränslen anges t.ex (12).:

*“Electric vehicles could contribute to the stability of the electricity system by recharging their batteries from the grid at times of low general electricity demand and feeding power from the batteries back into the grid at times of high general electricity demand. Therefore recharging points should use intelligent metering systems, and the price for electricity at a recharging point should be market based, so that flexible consumption (and storage) of electricity is promoted through dynamic pricing.”*

En viktig fråga i detta sammanhang är hur prissignaler förutom tillgången på el vid en given tidpunkt också kan ta hänsyn till kapaciteten och belastningen på själva elnäten. Det är inte självklart att kapaciteten i elnäten på t.ex. lokal nivå i alla lägen samvarierar med elpriset. D.v.s. ett lågt elpris som speglar ett läge med elöverskott behöver inte betyda att det finns tillräcklig kapacitet i de lokala elnäten att klara ladda ett stort antal elfordon samtidigt.

Ytterligare en aspekt i sammanhanget är styrningen av laddningen baserat på elpriset eventuellt skulle kunna leda till instabiliteter genom att laddningen kollektivt flyttas till andra tidpunkter och då skapar nya effekttoppar. Detta

komplieras dessutom av att det kan finnas även annan utrusning som ska styras, t.ex. värmepumpar för uppvärmning. För att styra laddningen krävs också någon form av kommunikation mellan elbilen och elsystemet.

Bilden är relativt komplex när det gäller hur framtida system för smart laddning ska utformas och styras för att fungera väl för alla inblandade aktörer. Detta är frågeställning som kräver särskild uppmärksamhet framöver.

### ***Hitta, boka, ladda och betala***

I takt med allt fler elfordon och allt fler laddplatser i publik miljö så ökar också behovet av gemensamma lösningar för hur man t.ex. via bilens navigator eller den egna smarta telefonen hittar lediga laddplatser, eventuellt kan förhandsboka dess, följer laddningen samt betala. Det är dock inte självklart att kommersiella aktörer, enskilt eller tillsammans, kommer att förse Sverige med en heltäckande kommunikationsinfrastruktur dedicerat till laddning och betalning av elfordon.

I dag görs försök med olika system och det finns leverantörer som erbjuder specifika betallosningar, t.ex. Fortum med sitt system Charge & Drive<sup>15</sup>. Det finns däremot ännu inte någon kommersiell tillämpning av en gemensam plattform som möjliggör utbyte av information mellan elfordon och elnät. Hur plattformslösningarna ska se ut tekniskt och framför allt hur de tjänster som möjliggörs kommer att utvecklas och användas är av särskilt intresse. Det pågår för tillfället en kapplöpning i världen om vem som kommer vara först med en fungerande plattform med tjänster som underlättar för en storskalig introduktion av elfordon. Sverige har goda möjligheter att medverka i denna utveckling.

### ***Snabbladdning***

Några fordonstillverkare kan redan nu erbjuda snabbladdningsmöjlighet för vissa bilmodeller, där likström (400 V DC) används för att ladda med effekter upp mot 50 kW. Defactostandarden CHAdeMO är idag väl etablerad även om nya trefas laddningssystem (AC) börjar utvecklas av en del europeiska fordonstillverkare. I EU-kommissionens förslag till direktiv om infrastruktur för alternativa bränslen anges att ladduttagen för snabbladdning ska vara av typen Combo 2 (12).

Snabbladdning via batteribyten är en annan metod som f.n. tillhandahålls av företaget Better Place och då för bilmodeller från Nissan och Renault. Olika system är dock under utveckling.

Snabbladdning kan också ske via induktiv överföring även om dagens system endast medger laddeffekter kring 10-20 kW. Tekniken för att överföra effekter upp mot 1 MW håller som bäst på att utvecklas. Inom några år

---

<sup>15</sup> <http://www.fortum.com/countries/se/privat/charge-drive/pages/default.aspx>

förväntas induktiva snabbladdningssystem på 100 kW eller mer finnas på marknaden.

Under 2012 pågår en offensiv expansion av snabbladdningssystem på flera håll i världen. Flest installationer finns i Japan med över 800 installerade CHAdeMO laddare och den japanska staten subventionerar 300-400 nya laddare årligen med upp till 50 procents kostnadsbidrag. I Estland har nyligen ABB vunnit en upphandling om installation av 400 snabbladdare för att förse kommunala fordonsflottor med snabbladdning i hela landet. I Holland, Portugal, Israel m.fl. länder pågår också en expansion av infrastrukturen för snabbladdning och längs den Norska kusten planeras närmare 100 snabbladdare inom projektet "Ishavsvejen".

I Sverige finns det ännu inte någon allmän tillgång till snabbladdningsstationer. Men på några platser i Stockholm, Göteborg, Malmö och t.ex. i Jämtland har man varit tidigt ute och satt upp snabbladdningsstationer för tester och utvärderingar.

Snabbladdning inrymmer mer än den rent tekniska aspekten kring laddning. I dagsläget finns inga riktigt hållbara affärsmodeller för snabbladdning. I stort sett alla installationer är förknippade med stora subventioner både vad gäller installation, drift och laddning av elfordon.

Laddningsbeteende och kundacceptans är faktorer av vital betydelse för planering och installation av laddplatser där ekonomin också kommer att spela en viktig roll för genomförbarheten.

Eftersom snabbladdning ställer högre krav på batterikvalitet, samtidigt som de första målgrupperna kan förväntas ha relativt goda möjligheter till långsamladdning, kan det finnas anledning att avvakta med en kostsam utbyggnad av infrastruktur för snabbladdning till ett senare skede av introduktionen. Här behövs sammantaget mer kunskap och studier om laddmönster m.m.

### ***Induktiv laddning***

Genom induktiv laddning finns det möjlighet att helt automatisera laddningen av elfordonen. Systemet omfattar två delar. Dels en laddplatta som monteras under bilen, dels en laddenhet i marken. När bilen placeras ovanför laddenheten genereras ett magnetfält genom vilket energin överförs till bilens batteripaket. Det finns i dag 6-7 industriella konstellationer som satsar på att utveckla tekniken med induktiv laddning för elfordon.

### ***V2G***

Begreppet V2G (Vehicle to Grid) är ett samlingsbegrepp för system där elbilar samverkar med elnätet/elsystemet för att t.ex.:

- Vid höglast bidra med kraft till elsystemet
- Vid låg efterfrågan på el och hög produktion ta emot och lagra kraft

- Erbjudna systemtjänster för att hålla spänning och frekvens stabil
- Erbjudna störningsreserv vid plötsliga behov av effekt

De flesta fordon står parkerade i genomsnitt 95 procent av tiden, vilket gör att tjänsten V2G kan uppfattas som rationell. Det är dock svårt att uppskatta det verkliga ekonomiska värdet av denna tjänst. Det finns också ett flertal invändningar, inte minst hur detta negativt kan påverka livsländan hos elbilens batterier genom tillkommande laddcykler. Bedömningen nu är nog att V2G inte kommer att vara aktuellt i Sverige under överskådlig tid.

## Referenslista

1. **EU-kommissionen.** *White Paper – A Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system.* 2011.
2. **EU-kommissionen;** *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. - Clean Power for Transport: A European alternative fuels strategy.*
3. **Regeringen.** Klimat prop. 2008/09:162.
4. **SOU 2013:84.** *Fossilfrihet på väg.* 2013.
5. **Profu AB.** *Ett fossilbränsleoberoende transportsystem år 2030, Elforsks Rapport 10:55.*
6. **Profu AB .** *Tio Konkreta åtgärder och tio lågt hängande frukter, Elforsks Rapport 12:33.* 2012.
7. **Profu AB.** *Roadmap för ett fossilbränsleoberoende transportsystem år 2030, Elforsks Rapport 12:68.*
8. *Towards a Sustainable Nordic energy System.* u.o. : Nordic Energy Perspectives, 2010.
9. **Grahn, Pia.** *Electric Vehicle Charging Impact on Load Profile.* u.o. : KTH, 2013.
10. **David, Steen.** *Studier gjorda vid Chalmers av David Steen visar att en icke styrd laddning av elfordon kan orsaka problem för distributionssystemet i vissa områden. Genom att kontrollera laddningen, kan effekterna minskas, men valet av kontrollmetoder måste väljas noggr.* u.o. : Chalmers.
11. **Elforsk.** *Styrmedel för introduktion av eldrivna fordon och utbyggnad av laddinfrastruktur. Elforsks Rapport 09:48.*
12. **EU-kommissionen.** *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the deployment of alternative fuels infrastructure.*

Delrapport till samordningsrådet för smarta elnät

## Vindkraft – Teknik- och marknadsutveckling

### Sammanfattning

Vid utgången av 2011 svarade vindkraften för 2 procent av världens elproduktion. Det kan jämföras med ca 16 procent för vattenkraften och ca 12 procent för kärnkraften. Med den förväntade utbyggnaden under 2013 kommer vindkraften i slutet av året att svara för 2,6 % av världens elproduktion. Utbyggnaden fram till år 2022 har av vissa bedömare uppskattats till en samlad kapacitet på 900 GW som då står för 7,4 procent av den globala elproduktionen.

I Sverige har andelen vindkraft i elproduktionen tidigare överensstämt väl med genomsnittet i världen. Dock började tillväxten tillta 2007 och tog ytterligare fart 2010, vilket medförde att produktionen 2012 uppgick till över 7 TWh, motsvarande en andel på närmare 5 procent av elproduktionen. Vindkraft produktionen i Sverige bedöms närma sig 10 TWh under 2013 och passerar 11 TWh under 2014. Vilka nivåer som uppnås i Sverige år 2020 styrs av elcertifikatsystemet och då också av vad som också kommer att byggas i Norge. Utbyggnadstakten för vindkraft på längre sikt bestäms i stor utsträckning av den framtida energi- och klimatpolitiken i Sverige och EU och vad som händer med kärnkraften.

Den mest påtagliga utvecklingen av kommersiell vindkraft sedan 1980 talet är den markanta ökningen av storleken på vindkraftverken. Den genomsnittliga storleken på uppförda verk var 2012 globalt 1,85 MW och i Sverige 2 MW. Utvecklingen sker inte bara mot större verk räknat i effekt, utan även mot vindkraftverk, med för sin effekt, stora diametrar. I dag finns kommersiella verk på 7 MW.

I takt med att vindkraften utgör en allt betydande andel av elproduktionssystemet så ökar också kraven på att vindkraftverken ska kunna tillhandahålla systemdrifttjänster av olika slag för att säkerställa stabil drift under normala förhållanden och stötta systemet vid olika typer av störningar. När vindkraften ersätter reglerbar produktion och konventionella synkrongeneratorer måste balanskraft, spänningshållning och stabilitet i nätet ses över och säkerställas.

Hur stor andel vindkraft man kan ha i ett kraftsystem beror på många faktorer. Begränsningar sätts av möjligheterna att balansera systemet effektmässigt, men också av sådana faktorer som förmåga till spänningshållning, pendlingsdämpning och robusthet mot störningar. Vilka delar i systemet som blir begränsande beror i hög grad på hur systemet är uppbyggt och var man lägger systemgränserna.



## Innehåll

1	Potential, marknad och kostnad .....	3
1.1	Global marknad och potential.....	3
1.2	Marknaden i Sverige.....	4
1.3	Kostnader.....	6
2	Utvecklingen av vindkraftverken.....	7
2.1	Allmän utveckling .....	7
2.2	Utvecklingen på leverantörssidan.....	10
2.3	Sätt att minska lasterna .....	10
2.4	Is fortfarande ett problem .....	11
2.5	Sätt att kunna transportera komponenter .....	11
2.6	Olika koncept för drivlinan.....	11
2.7	Horisontal- eller vertikalaxlat.....	14
3	Utveckling av vindkraftverken som del i kraftsystemet .....	14
3.1	Erfarenheter från kraftsystem med stor andel vindkraft .....	15
3.2	Möjligheter för vindkraftverken att aktivt delta med systemdrifttjänster.....	15
4	Referenser .....	17

# 1 Potential, marknad och kostnad

## 1.1 Global marknad och potential

Under treårsperioden 2008-2011 ökade årsproduktionen från världens vindkraft med i genomsnitt med 73 TWh per år. Motsvarande siffror för vattenkraft var 84 TWh. Kärnkraftens produktion minskade med 29 TWh. Den totala elproduktionen ökade under perioden med i snitt 570 TWh [1]. Marknaden för att leverera och installera vindkraftverk uppgår till omkring 500 miljarder kr per år och har blivit ett betydelsefullt inslag i världsekonomin.

Vid utgången av 2011 svarade vindkraften för 2 procent av världens elproduktion. Det kan jämföras med ca 16 procent för vattenkraft och ca 12 procent för kärnkraft [1]. Med den förväntade utbyggnaden 2013 kommer vindkraften att i slutet av året att svara för 2,6 % av världens elproduktion enligt Navigants World Market Update 2012 [2]<sup>1</sup>.

Den installerade effekten ökade globalt med 18 procent 2012 och uppgick i slutet av året till 282 GW. Europa hade 2012 fortfarande den största andelen installerad vindkraft med totalt 110 GW installerat. När det gäller nyinstallerad effekt har dock Europamarknaden sedan några år tappat sin ledande position. Av nyinstallerad vindkrafteffekt 2012 på globalt 45 GW stod Europa för 13 GW medan Amerika och Asien svarade för ca 15 GW vardera.

Under perioden 2005 till 2009 låg ökningstakten i årlig utbyggnad av vindkraft på mellan 30 och 40 procent. Ökningen i utbyggnadstakt uppskattas, enligt Navigants World Market Update, i genomsnitt ligga på 5 procent för perioden 2013 till 2017. För perioden mellan 2018 till 2022 förutspår Navigant en ökningstakt på drygt 8 procent. Den bedömda utbyggnaden leder år 2022 till en samlad kapacitet på 900 GW som då producerar el motsvarande 7,4 procent av den globala elproduktionen.

GWEC<sup>2</sup> och Greenpeace ger ut Global Wind Energy Outlook (GWEO) med två utbyggnadsscenarier, moderate och advanced scenario. I tabell 1 redovisas utbyggnaden enligt dessa scenarier jämfört med ”New Polices scenario hämtat från IEA World Energy Outlook/Global Wind Energy Outlook 2012 [32].

	År	2011	2015	2020	2030
IEA New Polices Scenario	[GW]	238	398	587	918
	[TWh/år]	583	976	1439	2412
GWEO Moderate scenario	[GW]	238	425	759	1617
	[TWh/år]	583	1043	1863	4251
GWEO Advanced scenario	[GW]	238	531	1150	2641
	[TWh/år]	583	1302	2821	6678

Tabell 1. Installerad effekt och årlig elproduktion enligt tre scenarier, från [32].

Scenarior från GWEC och Greenpeace gjorda för drygt 10 år sedan ansågs vara väldigt optimistiska. Sceneriet i GWEC och Greenpeace ”Wind Force 10” från 1999 utgjorde en prognos på 229 GW år 2011. Verklig utbyggnad blev 237 MW. Historiskt sett har fem- och tioårsprognoser från BTM Consult samt prognoser enligt GWEC och Greenpeace slagit väl ut och utbyggnaden har blivit betydligt starkare än IEA:s referensscenarier. För 2020 ligger prognosen från Navigant [2] tämligen nära ”GWEO Moderate scenario”.

<sup>1</sup>Denna World Market Update kallades förut BTM World Market Update, men BTM Consult nu är del av Navigant Research.

<sup>2</sup> GWEC, Global Wind Energy Council, är vindkraftsbranschens internationella organisation. [www.gewc.net](http://www.gewc.net)

## Vindkraft i havet

Vissa länder, i första hand i Nordvästeuropa, har svårt att finna plats för vindkraftutbyggnad enbart på land med hänsyn till konkurrens med annan markanvändning. Potentialen för vindkraft i havet är stor och vindarna är generellt bra. Med dagens kommersiella teknik är dock utbyggnaden begränsad till vatten med djup ned till ca 40 meter. Trots de högre vindarna är kostnaden per kWh generellt sett högre i havet jämfört med på land. De ekonomiskt sämre förutsättningarna för vindkraft i havet kan hänföras till ökade kostnader för fundament och elnät, att turbinerna ska tåla salt, vågor och höga vindar samt att förhållanden att nå turbinerna gör underhåll dyrare.

Vid utgången av 2012 fanns 5415 MW installerad vindkraft i havet, varav 5020 MW i Västeuropa och 390 MW i Kina. Den totalt installerade effekten i havet utgör effektmässigt drygt 2 procent av all vindkraft [31]. Under 2012 utgjorde vindkraft i havet 3 procent av nyinstallationerna. Enligt Navigant [2] förväntas andelen offshore öka, för att 2017 utgöra 18 procent av den årliga. Navigants prognos för 2017 ger en totalt installerad effekt på 527 GW, varav 183 GW i Europa, 200 GW i Asien och 120 GW i Amerika.

Den Europeiska kommissionen gjorde 2008 bedömningen att det är realistiskt med totalt 150 GW vindkraft i havet, som då skulle bidra med el motsvarande 14 procent av EU:s elanvändning [3]. En sådan utbyggnad kräver dock en kraftig utbyggnad av elnäten. För att skapa förutsättningar för detta lade EU-kommissionen i oktober 2011 fram ett förslag till energiinfrastrukturförordning [4]. Kommissionen föreslår där prioriterade satsningar som t ex ”Norra havens energinät för havsbaserad vindkraft”. Många länder i Västeuropa har stödsystem för att möjliggöra utbyggnaden av vindkraft i havet i kombination med att områden för havsbaserad vindkraft avsätts i den fysiska planeringen.

## 1.2 Marknaden i Sverige

I Sverige har andelen vindkraft i elproduktionen tidigare överensstämmt väl med genomsnittet i världen. Emellertid började tillväxten tillta 2007 och tog ytterligare fart 2010, vilket medförde att produktionen 2012 uppgick till över 7 TWh, motsvarande en andel på närmare 5 procent av elproduktionen. Under 2011 installerades 765 MW [5] och under 2012 dryga 800 MW enligt Svensk Vindenergi [6]. Som framgår av diagram 1 motsvaras den ökade produktionen inte helt av ökning i installerad effekt och särskilt inte i antalet verk. Förklaringar är att verken placeras bättre, blir större, får högre torn och följer senare års trend med allt större turbiner i förhållande till generatoreffekten, vilket ökar energiutbytet.

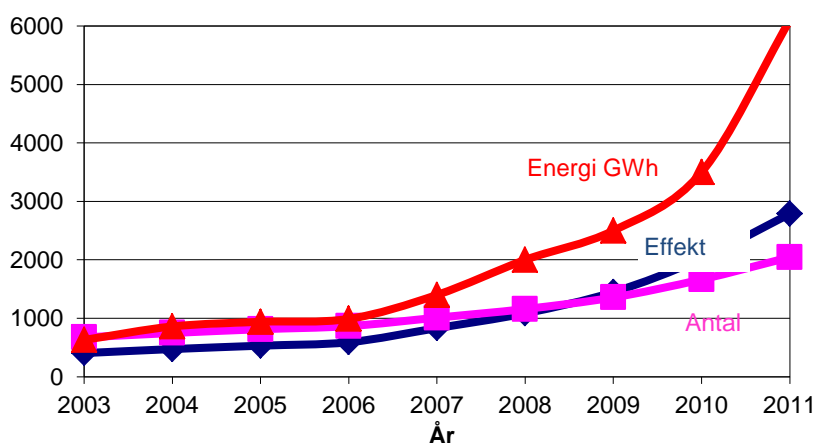


Diagram 1. Vindkraftens utveckling i Sverige 2003 – 2011 [5]

### **Marknaden fram till 2020**

På kort sikt är det elcertifikatsystemet som bestämmer hur mycket vindkraft som kommer att byggas i Sverige och Norge eftersom elpriset inte motsvarar elproduktionskostnaden idag eller inom den närmaste framtiden. Konstruktionen med elcertifikatsystemets frihet att uppfylla utbyggnadsmålen för förnybar energi med fri konkurrens mellan förnybara kraftslag gör det svårt att bedöma vilken typ av ny förnybar produktion, t ex vindkraft, vattenkraft, biobaserad produktion eller torv som kommer att byggas. Ett sammanslaget elcertifikatsystem med Norge gör det även svårare att bedöma i vilket land produktionen byggs.

Svensk Vindenergis bedömning (baserat på redan tagna investeringsbeslut samt på att 20 procent av tillståndsgivna projekt och 10 procent av projekten under miljöprövning genomförs) är att produktionen i Sverige närmar sig 10 TWh under 2013 och passerar 11 TWh under 2014. Det motsvarar den nivå som Energimyndigheten tidigare räknat med skulle uppnås 2020 [7]. Relativt de nivåer som finns i elcertifikatsystemet är alltså utbyggnadstakten just nu relativt hög i Sverige. Vilka nivåer som uppnås 2020 i Sverige beror på vad som byggs i Norge samt vad som kan ske vid avstämning av kvotnivåer vid kommande kontrollstationer senast 2015 och 2019.

### **Marknaden för vindkraft i havet**

Sverige var relativt tidiga med utbyggnad av vindkraft i havet tillsammans med Danmark. Idag finns det 163 MW installerat i parkerna Bockstigen, Utgrunden, Yttre stengrund, Lillgrund och vindpark Vänern. En park på 16 verk om vardera 3 MW är även under uppförande av E.ON i projektet Kårehamn utanför nordöstra Öland. Frånsett Kårehamn har dock utbyggnaden av vindkraft i havet nu avstannat i Sverige.

Det finns idag projekt med en samlad effekt om ca 2000 MW som har tillstånd och ännu fler i tillståndsfas [8]. Kostnaden för att bygga i havet är dock så pass hög att lönsamhet saknas baserat på dagens elpriser och elcertifikat. Ytterligare stöd kommer troligen att behövas. Det kan handla om att elnätsanslutning till parken bekostas utom kostnaderna för vindkraftsparken eller stöd via de så kallade samarbetsmekanismerna inom EU-direktivet för förnybar energi.

Mycket talar för att det kan vara bättre ekonomi att bygga vindkraftsparker i Östersjön och Bottniska viken än i flera av de områden i Nordsjön där utbyggnaden sker på relativt stora djup och långt från land. Så länge stödsystemen är nationella byggs dock vindkraften ut endast i de länder som har tillräckligt gynnsamma stödsystem.

### **Marknaden 2030 och 2050**

Ser man längre fram i tiden är den samlade utbyggnaden i Sverige än mer svårbedömd och beror på antaganden som görs kring framtida elpriser, stödsystem, elnätsutbyggnad och exportmöjligheter från det Nordiska kraftsystemet till övriga Europa. Scenarier om den framtida utbyggnaden finns redovisade i en rapport från forskningsprogrammet NEPP [9] samt i IEA:s Nordic Energy Technology Perspectives [10].

Resultat från scenariet "Green Policy" i NEPP-programmet ger 105 TWh vindkraft i Norden 2030 och 135 TWh 2050. Utbyggnaden i Sverige enligt scenariet är 37 TWh 2030 och 55 TWh 2050. Utbyggnad av de olika kraftslagen drivs i scenariet av politiska instrument mot stor andel förnybart i Norden och EU. I resultaten från scenariet ger den svenska kärnkraften ca 70 TWh 2030 men blir så gott som helt utfasad 2050. I "Climate Market scenario", där utbyggnaden av kraftproduktion huvudsakligen styrs av priset på koldioxidutsläpp, ger vindkraften i Sverige 15 TWh 2030 men 50 TWh 2050 trots att kärnkraften i det scenariet

ligger kvar på ca 70 TWh. Den totala elproduktionen, användning och export skiljer sig dock markant i de två scenarierna.

Även resultat från IEA:s Nordic Energy Technology Perspectives [10] ger stora mängder vindkraft i det Nordiska systemet från drygt 100 upp till 150 TWh i Norden 2050 i olika scenarier.

### 1.3 Kostnader

I Elforsks senaste rapport i serien ”El från nya anläggningar” [11] har kostnader för såväl enstaka kraftverk på ca 1 MW som parker med 5 x 2 och 3 x 20 MW på land tagits fram. Även kostnader för vindkraft i havet med parker på 50 x 3 MW och 74 x 5 MW har tagits fram.

Vindförutsättningar och kostnad representerar på detta sätt några typiska fall. I beräkningen av elproduktionskostnad har en kostnad för investeringen antagits tillsammans med en återbetalningstid samt en kalkylränta. Detta ger en kostnad för återbetalningen på själva investeringen. Denna kostnad slås sedan ut på en antagen årlig produktion, beskriven via en antagen utnyttjandetid. Därutöver tillkommer kostnader för drift och underhåll.

För landbaserad vindkraft har den beräknade elproduktionskostnaden blivit mellan 47 och 51 öre per kWh<sup>3</sup> enligt tabell 2. Priser i [11] representerar kostnadsläget för 2010. Med hänsyn till lägre kurser för Euro och dollar samt att marknaden nu är mer prispressad hade sannolikt lägre kostnader för anläggningarna använts om motsvarande studie gjord för kostnadsläget i början av 2013.

Typ av anläggning	Antagen utnyttjandetid (netto mht till parkverkningsrad och nätförluster i parken)	Antagen investeringskostnad för nyckelfärdig anläggning medräknat kostnad för elnät [kr/kW]	Antagen DoU-kostnad [öre/kWh]	Total elproduktionskostnad [öre/kWh]
1 x 1 MW	2650 timmar	13 500	11	48
5 x 2 MW	2850 timmar	13 500	14	47
20 x 3MW	3050 timmar	15 000	14	51

Tabell 2. Förutsättningar och kostnader för vindkraft enligt ”El från nya anläggningar” 2011

Vindkraftsskribenten David Milborrow har i Windpower Monthly i januari 2013 [12] gjort en sammanställning av kostnader för vindkraftverk från olika källor. Enligt denna sjönk kostnaden med 5 % 2011 till en kostnad på ca 820-1000 €/kW för själva vindkraftverken. För hela anläggningar rapporteras istället ett ökat spann i kostnader från 1500-1600 €/kW till 1300-2000 €/kW. Kostnaden för hela anläggningar ligger således inte så långt från de kostnadsuppskattningar som används i Elforskrapporten från 2011. Milborrow:s sammanställning visar att det är stor skillnad på kostnaden för vindkraftverk jämfört med hela anläggningar samt att kostnaden varierar tämligen mycket mellan billiga och dyra anläggningar. Kostnad för tornhöjd, nya vägar, elnät och transporter varierar exempelvis mellan olika anläggningar.

<sup>3</sup> 6 % kalkylränta och 20 års avskrivningstid.

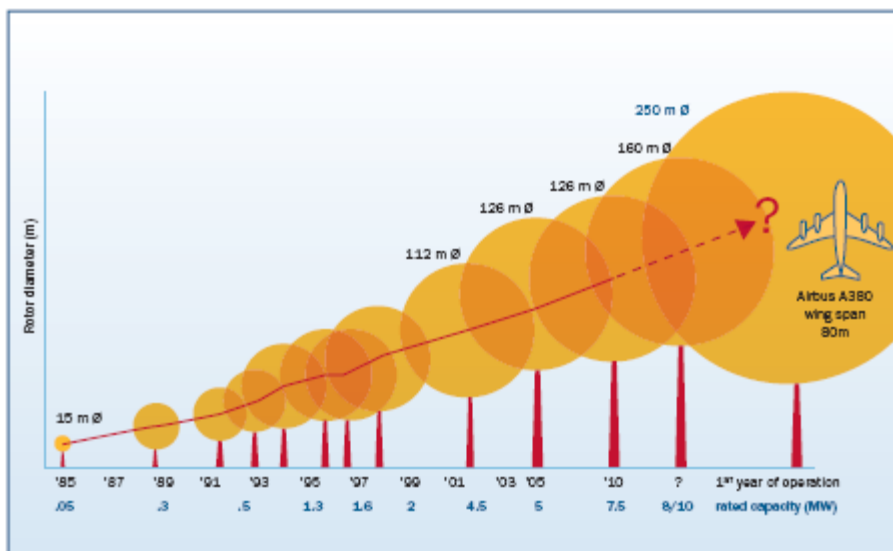
I havet är kostnaden räknat per kW installerad effekt högre än på land. Kostnad för fundament i havet, kostsammare byggnation och dyrare elnätskostnader är några faktorer som gör havsbaserad vindkraft dyrare. Även kostnad för drift och underhåll är generellt högre. I Milborrow:s sammanställning är kostnaden för hela anläggningar till havs nästan dubbelt så hög som för anläggningar på land. För anläggningar i Östersjön finns inte så mycket uppgifter, vilket gör att de kostnader som antagits i Elforsk rapport 2011, ”El från nya anläggningar” [11] får ses som relativt grova antaganden. Med förutsättningar enligt Elforsks rapport [11] blir elproduktionskostnaden 89-101 öre/kWh.

## 2 Utvecklingen av vindkraftverken

### 2.1 Allmän utveckling

#### Utvecklingen går mot större verk

Den mest påtagliga utvecklingen av kommersiell vindkraft sedan 1980 talet är den markanta ökningen av storleken på vindkraftverken. I mitten av 80-talet låg den kommersiella storleken på runt 50 kW. I början på 90-talet byggdes verk på mellan 150 och 225 kW för att öka mot 500 kW i mitten av 90-talet. I mitten av 90-talet drev EU forsknings- och demonstrationsprogram för MW-storlek på turbiner vilket gjorde att kommersiell storlek nådde ca 1 MW i andra halvan av 90-talet. Kring sekelskiftet ökade den kommersiella storleken till ”multi-megawatt”. Enercon uppförde 2002 den tidens största verk om 4,5 MW och 112 meter diameter. Detta verk har nu utvecklats till 7,5 MW och en diameter på 127 meter och är idag, i MW räknat, det största kommersiella vindkraftverket. Enligt Navigant [2] var den genomsnittliga storleken på uppförda verk globalt 1,85 MW 2012 och i Sverige 2 MW enligt Energimyndigheten [5].



Figur 1. Storleksutveckling [13]

Det finns framför allt två bakomliggande motiv till storleksökningen:

1. Vinden ökar väsentligt med höjden. Stora och därmed höga vindkraftverk får därmed bättre ekonomi.
2. Det är lönsamt med färre verk per installerad effekt, speciellt i havet där fundament har en hög styckkostnad.

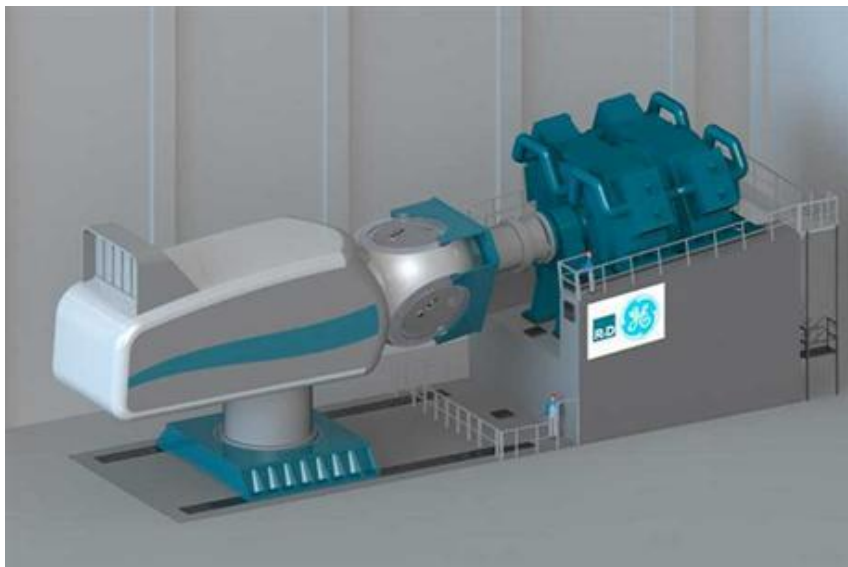
Tabellen 3 visar de idag (januari 2013) största verken.

Tillverkare	Effekt [MW]	Rotordiameter [m]	Typ av drivlina
Enercon	7,5	126	Direktdrift, lindad rotor
Repower	6	126	DFIG
Siemens	6	150	Direktdrift, rotor med permanentmagnet
Sinovel	6	128	DFIG
Alstom	6	150	Direktdrift, rotor med permanentmagnet
Areva	5	135	Enstegs växellåda och mellanvarvig synkrongenerator med permanentmagnet och fulleffektsomriktare.
Bard	5	122	DFIG
XEMC	5	115	Direktdrift, rotor med permanentmagnet
Gamesa, (G10X-4.5 MW plattform)	4,5	128	2-stegs växellåda och mellanvarvig synkrongenerator med permanentmagnet och fulleffektsomriktare.

Tabell 3. Vindkraftverk med effekt på 5 MW eller mer.

Enerconverket på 7,5 MW finns inte för off-shore. Annars drivs utvecklingen av de största verken i hög grad av marknaden till havs. Flera tillverkare har också större verk på gång. Vestas utvecklar ett verk på ca 7 MW med en rotordiameter på 164 meter [14]. Tester av blad till detta verk pågår.

Som exempel på utvecklingen mot större turbiner rapporterades i mars 2013 att GE Power Conversion har skrivit kontrakt med Lindoe Offshore Renewables Centre (LORC) i Danmark att uppföra en testanläggning för att utsätta hela maskinhuset med hela drivlinan för de laster som rotorn utsätts för i verkligheten. Anläggningen är avsedd för verk med en effekt på 10 MW [15].



Figur 2. Test av drivlina enligt visualisering i [15]

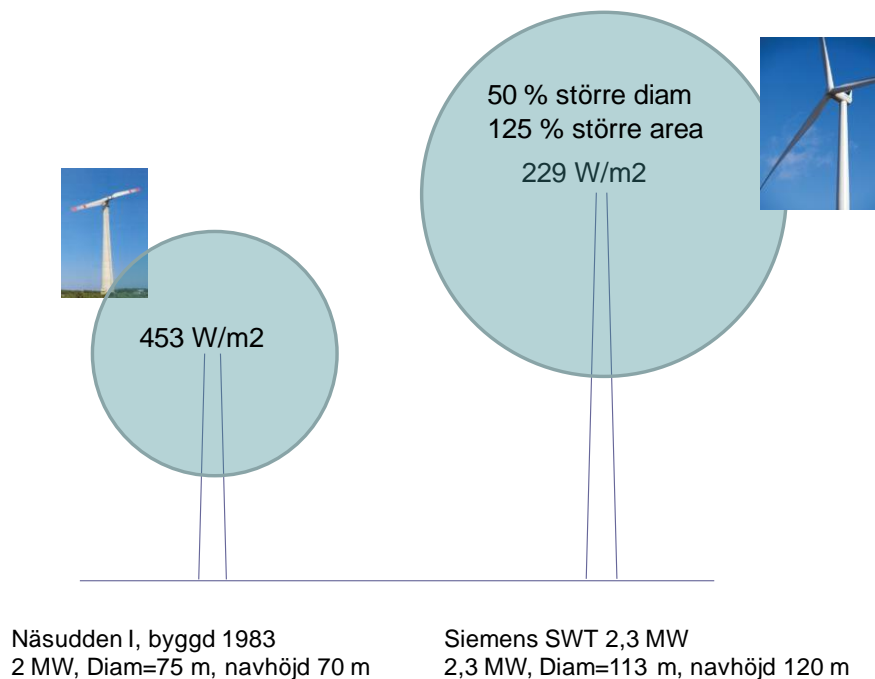
I EU-projektet UpWind [11] har man studerat konstruktionslösningar för vindkraftverk på 20 MW. Vindkraftverk på 10 MW eller mer kan tänkas komma att byggas som prototyper och sedan för marknaden för vindkraftverk i havet inom gissningsvis 5 år.

### Flytande vindkraftverk

För större djup i havet blir fasta fundament för dyrt. En utveckling pågår därför på flera håll i världen för att utveckla flytande vindkraftverk. Försök i demonstrationsskala görs på flera håll. I Japan har Hitachi Zosen corp annonserat att de format ett konsortium med flera företag för att bygga pilotanläggningar till 2016 med målet att inom 10 år uppföra anläggningar på totalt 300 MW. I mars 2013 [16] annonserades att denna grupp ingår samarbetet med projektet Hywind i vilket ett konsortium lett av Statoil utvecklar flytande vindkraft.

### Utveckling av verk för låga medelvindar och utveckling mot högre utnyttjningstid

Utvecklingen sker inte bara mot större verk räknat i effekt, utan även mot vindkraftverk, med för sin effekt, stora diametrar<sup>4</sup>. Detta gör att det även på platser med relativt låg medelvind går att nå hög utnyttjningstid<sup>5</sup> och hög intjäningsförmåga. Genom teknisk utveckling har tillverkarna lyckats öka rotordiametern utan att kostnaden på vindkraftverken stigit i motsvarande grad. Ett exempel på utvecklingen mot stor turbindiameter för given generatoreffekt är de kraftverk från Siemens som Statkraft SCA bygger i Norrland. Dessa har jämfört med det vindkraftverk som byggdes på Gotland 1983 mer än dubbelt så stor svept yta för ungefär samma storlek i effekt. Ett vindkraftverk med ett förhållande mellan generatoreffekt och rotoryta som för Siemensverket i bilden ger en utnyttjningstid på ca 4000 timmar vid en medelvind på 7 m/s i navhöjd<sup>6</sup>



Figur 3: Olika verk med ungefär samma effekt men mycket skilda diametrar.

<sup>4</sup> Med en dubblad "svept rotoryta" får, för en given vind, vindkraftverket en dubblad effekt. Ytan ökar kvadratisk med diametern. Ökas diametern med en faktor 1,5 ökar den "svepta ytan" med 2,25 ggr.

<sup>5</sup> Med utnyttjningstid avses den tid som fås om man tar verkets energiproduktion under ett år och dividerar med verkets nominella (maximala) effekt. Begreppet kallas ofta "fullasttimmar". Ett år har 8760 timmar. Ett verk på en MW som producerar 3504 MWh får en utnyttjningstid på 3504 timmar, motsvarande 40 % av årets timmar.

<sup>6</sup> Baserat på tillverkarens data för effekt som funktion av vinden. För vindkraftverk i park skuggar en del verk varandra och det finns elektriska förluster i transformatorer och interna elnät. En genomsnittlig utnyttjningstid blir därför något lägre i en park som helhet.



### **Höga torn, 200 meter total höjd redan nått**

För att nå upp till bättre medelvindar även i skogslandskap sker speciellt i Tyskland en utveckling mot höga torn. Tillverkaren Kenerys tillsammans med tornstillverkaren Advanced Tower Systems (ATS) sätter för operatören JUWI upp flera 2,3 MW vindkraftverk med en navhöjd på 145 meter. Med en diameter på 120 meter kommer de att nå en totalhöjd på 205 meter över marken.

### **Plattformskoncept för flera storlekar på vindkraftverken**

På samma sätt som fordonsindustrin arbetar vindkraftstillverkarna med samma plattform i maskinhuset för olika vindkraftverk. Ett kraftverk ursprungligen utvecklat för medelstarka medelvindar med en effekt på t ex 2,5 MW och en diameter på 90 meter utvecklas med tiden i flera versioner. Med längre blad men med lägre effekt på generatoren kan de flesta komponenter användas för en nya versioner.

## **2.2 Utvecklingen på leverantörssidan**

Som en följd av västvärldens ekonomiska problem ökade försäljningen av vindkraftverk i världen under 2012 med måttliga 7,8 procent [2]. Tillväxttakten är lägre än den varit under 2000-talets första decennium och flera tillverkare skär nu ned sina organisationer för att anpassa sig till en lägre tillväxttakt.

På leverantörssidan har från början av 2000-talet och fram till 2012 antalet aktörer ökat kraftigt. Europeiska tillverkare har tappat marknadsandelar. Danska Vestas tappade 2012 sin ledande position till GE Wind. Till stor del beroende på starka utbyggnaden i USA 2012. Vestas ökade dock sin andel av den totala marknaden till 14 procent[2]. De tio största tillverkarnas andel av marknaden utgjorde 77,4 procent. Som effekt av den minskade utbyggnaden i Kina sjönk den globala marknadsandelen för de fyra största kinesiska tillverkarna från 26,4 procent år 2011 till 16,6 procent år 2012.

## **2.3 Sätt att minska lasterna**

Bladen på mycket stora vindturbiner sveper över stora vindfält som blir mer heterogena. Det beror på att vindarnas variation är större över en större yta än över en liten. Detta leder i sin tur till att bladen möter en mer varierande vind under ett rotationsvarv. En möjlighet att möta detta är att ha en bladvinkelstyrning, som förutom att justera mot medelvinden eller för att reglera mot uteffekten, justerar bladvinkeln under varvet för att minska lasterna på turbinerna. Sådana styrscheman används idag.

En annan möjlighet att kompensera för vindfältets variationer är att utrusta turbinerna med reglering som är variabel även utmed bladens längd. Detta kan åstadkommas exempelvis med ett antal individuellt styrbara bakkantklaffar utefter bladet och innebär således ett ytterligare utvecklingssteg, utöver den individuella bladvinkelregleringen. Sådana lösningar har blivit ett forskningsområde som bland mycket annat studerats inom det femåriga EU-stödda Upwind-projektet [13].

Andra lösningar på forsknings- och demonstrationsstadiet är att använda t ex laserteknik, så kallad LIDAR, för att mäta vinden flera rotordiametrar uppströms. Denna information kan användas för att reglera varvtal och bladvinkel och på det sättet tidigt anpassa sig mot den nya vinden som kommer.

## 2.4 Is fortfarande ett problem

Is som fastnar på vingarna är ett stort problem i klimat som i norra och till delar även i södra Sverige. Med is på vingarna minskar produktionen från ett vindkraftverk och det innebär dessutom risker för arbetsmiljön vid drift och underhåll samt potentiella risker för tredje man att träffas av is som lossnar.

Även om vindkraft i kallt klimat - och med risk för is på bladen - utgör en tämligen stor marknad har den ägnats relativt lite intresse från leverantörerna. Den har helt enkelt i relation till den totala marknaden varit för liten. Med en ökande marknad i t ex Canada och Sverige de senaste åren har dock utvecklingen tagit något bättre fart. Dock finns mycket att göra på området att utveckla pålitliga och effektiva tekniker och produkter för att förhindra isbildning eller för att avlägsna den. Metoder som finns för flygtillämpningar kan inte användas utan omfattande modifikationer.

## 2.5 Sätt att kunna transportera komponenter

Den vanligaste tornotypen är fortfarande svetsade ståltorn. Med konventionella cylindriska ståltorn överstiger den ekonomiskt optimal torndiametern 4,5 meter (vid tornets rotända) redan vid måttliga tornhöjder och effekter. Detta leder till komplikationer eftersom det finns begränsningar både beträffande längd och höjd på det som får transporteras på land. Till exempel begränsar vägnätet transporthöjden till 4,5 meter.

För att just klara transportbegränsningar utvecklas därför ett flertal koncept för tornen [17]. Koncept av betongtorn har hittills varit det vanligaste sättet. Det finns torn av hybridtyp med en nedre del av betong och en övre av stål. Ståltorn tillverkas normalt som långa rör (20 tal meter) som sammanfogas på plats men det har nyligen utvecklas ståltornskoncept där fabrikssvetsning ersätts av skruvförband för platsmontage. Även för andra komponenter som blad utvecklas metoder för att tillverkning i delar med hopsättning på montageplatsen.

## 2.6 Olika koncept för drivlinan

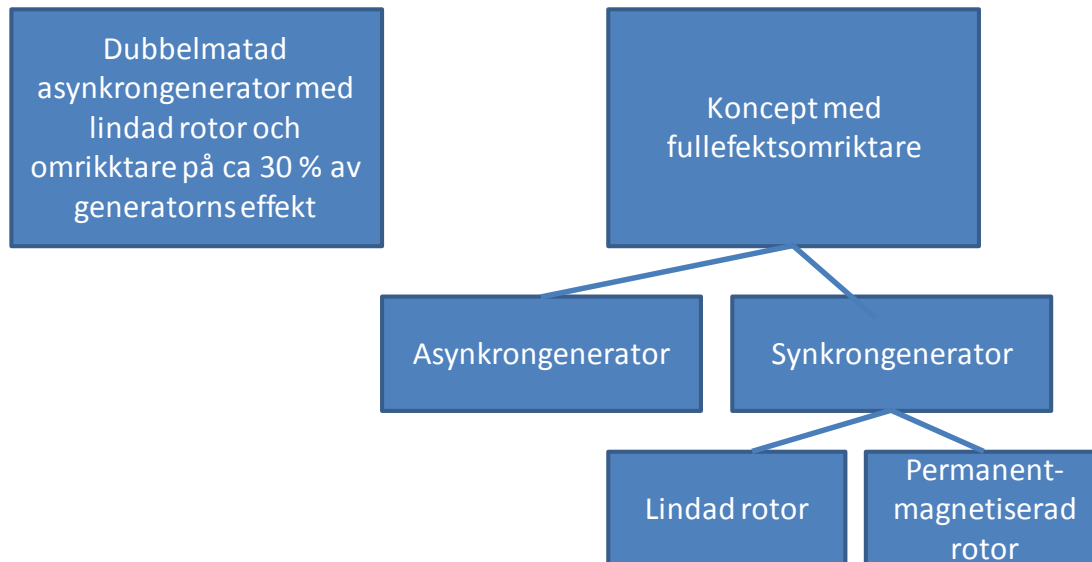
Praktiskt taget alla nya, stora vindkraftverk drivs idag med variabelt varvtal och bladvinkelreglering. Det finns olika sätt att åstadkomma ett variabelt varvtal för turbinen, och normalt sker det genom att generatoren drivs med variabelt varvtal. För detta finns flera koncept på marknaden där de vanligast förekommande alternativen översiktligt redovisas nedan.

### **Fulleffektsumriktare eller dubbelmatad asynkrongenerator med deleffektsumriktare?**

För att ansluta en generator med variabelt varvtal mot nätets konstanta frekvens används en så kallad omriktare som omvandlar ström och spänning med elnätets frekvens till en frekvens som behövs för att styra generatoren mot för vinden önskat varvtal.

Ett koncept är en så kallad fulleffektsumriktare där hela statorströmmen, och därmed hela effekten matas genom omriktaren. Ett system med fulleffektsumriktare kan kombineras såväl med en asynkrongenerator som med en synkrongenerator där den senare antingen har en lindad rotor matad via släpringar eller en rotor med permanentmagneter enligt figur 4.

En omriktare har dock förluster i sin omvandling och tar även plats. Ett koncept som i princip utvecklats just för vindturbiner och idag är det dominerande konceptet<sup>7</sup> är därför en asynkrongenerator med lindad rotor där rotorkretsen matas via en omriktare<sup>8</sup> medan statorn matas med nätets frekvens. Genom denna matning kan generatoren i kombination med en omriktare på endast ca 30 procent av generatorns fulla effekt fås att gå med det synkrona varvtalet  $\pm 30$  procent vilket i allmänhet är tillräckligt.



Figur 4. Olika koncept för variabelt varvtal för vindkraftverk.

### Med eller utan växellåda och vilket varvtal på generatoren?

Rotorn på ett vindkraftverk med 100 meter i diameter roterar med i storleksordningen 15 varv per minut<sup>9</sup>. En konventionell generator kopplad mot nätets frekvens har vanligtvis ett varvtal på 1500 varv per minut och då måste det finnas en växellåda mellan turbinrotorn och generatoren. Det är det idag dominerande konceptet.

Haverier med växellådor har dock resulterat i höga kostnader för reparation och höga stilleståndskostnader. Ett alternativt koncept som utvecklats är därför en så kallad direkt driven generator, dvs. en mångpolig lågvarvig generator som ansluts direkt till rotoraxeln. Man slipper då växellådan men får i stället hantera stora moment i generatoren, vilket leder till en väsentligt tyngre generator och oftast med stor diameter. För direkt drift med en generator med lindad rotor blir totalvikten högre än koncept med växel av motsvarande effekt.

<sup>7</sup> Trenden går dock mot en ökande andel system med fulleffektsomriktare. Ett skäl till denna trend är att ökande krav på turbinerna i nätföreskrifter ökar komplexiteten och kostnaden för "DFIG"-systemet. Ett annat skäl är att de släpningar som behövs för strömmatningen av rotorn i DGIG-systemet kan undvikas i koncept med fulleffektsomriktare [21]. När DFIG började utvecklas var teknik för omriktare med hög effekt inte lika utvecklad. Utvecklingen på kraftelektronikområdet leder totalt till en ökad fördel för fulleffektsomriktarkonceptet.

<sup>8</sup> Generatorn kallas vanligen "DFIG"-generator efter engelskans Double Fed Induction Generator

<sup>9</sup> Det "nominella" varvtalet varierar omvänt med rotordiametern. För en dubbelt så stor turbin fås ett hälften så högt varvtal. Det "nominella" varvtalet varierar vidare för olika turbiner med samma storlek. För turbiner på land är spets hastigheten och därmed varvtalet styrt av önskemål för att minska bullergenerering som beror starkt på bladspetsens hastighet. För offshore-turbiner är spets hastigheten högre vilket gör att bladbredden kan minskas och det högre varvtalet ger ett lägre vridmoment och därmed en billigare drivlina.

Antalet vindkraftverkstyper med direktdrift och andelen av den totala marknaden har ökat de senaste åren. Under perioden 2007 - 2011 ökade de direktdrivna verkens marknadsandel från 15 till 21 procent dominerat av, efter marknadsandel, kinesiska Goldwind (tysk teknik), tyska Enercon och kinesiska XEMC (holländsk teknik) [1]. Tidigare var det bara Enercon som hade någon volym att tala om. Under de senaste två åren har därtill både Siemens och Alstom introducerat direktdrivna verk för havsbasering med 6 MW effekt och 150 meters turbindiameter. Siemens har även direktdrivna verk avsedda för marknaden på land.

I stort sett alla direktdrivna generatorer utom Enercon använder magnetisering med permanentmagneter, eftersom man därigenom kan få en kompaktare maskin samt att verkningsgraden, särskilt vid dellast, blir högre. Kina har genom en mångårig medveten lågprispolitik skaffat sig ett de facto monopol på sällsynta jordartsmetaller<sup>10</sup> som ingår i magneterna. För några år sedan började emellertid Kina att begränsa exporten i avsikt att förbehålla materialen för sin egen industri. Följden blev kraftiga prisökningar, som dock nu verkar ha stabiliserat sig, samt att nya och gamla gruvor i västvärlden började öppnas. Trots namnet är tillgången på sällsynta jordartsmetaller i jordskorpan ingen begränsande faktor. Osäkerheter kring framtida tillgång och kostnader för sällsynta jordartsmetaller har sannolikt hämmat kommersiell utveckling av direktdrivna permanentmagnetkoncept med krav på mycket magnetiskt material.

### **Olika skäl för att välja direktdrift eller koncept med växel**

Siemens, Alstom och XEMC har valt direktdrift för sina koncept medan Areva, Repower, Sinovel och Vestas har valt växlade koncept för sina turbiner. I en artikel i Windpower monthly [15] motiverar Vestas sitt konceptval med att behålla ett växlat koncept med ett en direktdriven generator hade ökat vikten av permanentmagneter, vilket innebär en risk med hänsyn till osäker prisbild för dessa. Vidare hänvisar man till studier som visar att elektriska komponenter har högre felrelaterade kostnader än växellådor och att ett direktdrivet koncept - som skulle innehålla fyra gånger fler elektriska komponenter än en det växlade konceptet - skulle ge högre kostnader för reparationer och stillestånd. De tillverkare som väljer ett direktdrivet koncept gör det valet med argumenten att det är en fördel med färre komponenter och att man genom att undvika växellådan sänker kostnader för reparationer och stillestånd.

Med hänsyn till de många olika valen av drivlinekoncept kan man inte dra någon annan slutsats än att det råder delade åsikter kring vad som är ett vinnande koncept i valet mellan direktdrift och system med växel.

### **Olika varvtal på generatorerna**

För koncepten med växellåda finns vidare två huvudspår. En högvarvig generator (storleksordningen 1500 varv per minut) eller en så kallad mellanvarvig generator som kombineras med en växel med lägre utväxling. En sådan generator har, beroende på storlek av turbinen och antalet steg i växellådan, ett varvtal på i storleksordningen 100 - 500 varv per minut. Koncepten innehåller generellt en hög grad av integrering av rotoraxellagring, växel och infästning av generatorn. Genom integreringen får man färre komponenter än för konventionella koncept med uppdelning mellan rotoraxellagring, växel och generator. Högre varvtal på generatorn jämfört med direktdrift ger lägre massa på generatorn. Konceptet används av Areva med en enstegs växel och ca 100 varv per minut för generatorn. Gamesa använder för sina vindkraftverk på 4,5 MW på land och 5 MW i havet en tvåstegsväxel med

---

<sup>10</sup> Neodymium som ger de goda magnetiska egenskaperna och dysprosium som är nödvändigt för att materialet ska behålla sina egenskaper upp till önskvärda temperaturer.

en generator med varvtal på runt 500 varv per minut Även Vestas arbetar med detta koncept för sitt nya offshore-kraftverk med en diameter på 164 meter [15] men med tre steg i växellådan<sup>11</sup>.

### **Vindkraftverk som levererar likström**

I omriktaren likriktas strömmen från vindturbinen genom en likriktare till likström innan den omriktas till växelström, för nätsanslutning till 50 Hz<sup>12</sup>. För större parker, anslutna via likströmsanslutningar är interna likströmsnät i parkerna en möjlighet. Även att arbeta med växelström med en högre frekvens än 50 Hz i parkerna kan vara ett alternativ för att minska såväl elektriska förluster som kostnaderna för omriktare och transformatorer, eftersom transformatorer kan göras mindre och lättare vid högre frekvenser [27], [28], [29]. Koncept med likströms eller mellanfrekvensät är dock än så länge på forsknings- och utvecklingsstadiet.

### **Hydrauliska system för att åstadkomma variabelt varvtal**

Intresse för hydraulisk momentöverföring, ofta i kombination med synkrogenerator utan omriktare uppstår med jämna mellanrum. Tidigare försök har stupat på låg verkningsgrad och att komponenterna inte haft tillräcklig livslängd. Ett system från Voith i Tyskland med en hydrodynamisk koppling har använts för att kunna åstadkomma variabelt varvtal i kombination med en generator med fast varvtal mot nätet. Mitsubishi utvecklar ett system med företaget Artemis där växellådan ersätts med en hydraulpump. Dock har ännu inga koncept med hydraulisk överföring visat sig mer ekonomiska jämfört med koncepten där generatoren drivs med variabelt varvtal.

## **2.7 Horisontal- eller vertikalaxlat**

Vertikalaxlade vindturbiner ägnades ett omfattande utvecklingsarbete från slutet av 1970-talet till början av 1990-talet. Dessa nådde emellertid inte upp till krav på tillförlitlighet och kostnad. Kommersiellt är vindkraftverk baserade på trebladiga horisontalaxlade vindturbiner idag i praktiken allena rådande. Det finns utvecklingsprojekt för större vertikalaxlade turbiner men på den kommersiella marknaden är deras användning begränsad till små turbiner.

## **3 Utveckling av vindkraftverken som del i kraftsystemet**

I takt med att vindkraften utgör en betydande andel av elproduktionssystemet ökar kraven på att vindkraftverken, i likhet med övriga kraftverk, ska kunna tillhandahålla systemdrifttjänster av olika slag för att säkerställa stabil drift under normala förhållanden och stötta systemet vid olika typer av störningar. När vindkraften ersätter reglerbar produktion och konventionella synkrogeneratorer måste balanskraft, spänningshållning och stabilitet i nätet ses över och säkerställas.

---

<sup>11</sup> Med diametrar på drygt 100 meter når man med en trestegs växellåda utväxlingar så att en generator med ca 1500 varv per minut kan användas. Med så stora diametrar som 164 och rotorvarvtal på i storleksordningen 10 varv per minut räcker inte 3 steg för att nå 1500 varv per minut.

<sup>12</sup> I Amerika 60 Hz.

### 3.1 Erfarenheter från kraftsystem med stor andel vindkraft

Hur stor andel vindkraft man kan ha i ett kraftsystem beror på många faktorer. Begränsningar sätts av möjlighet att balansera systemet effektmässigt, men sätts även av sådant som förmåga till spänningshållning, pendlingsdämpning och robusthet mot störningar. Vilka delar i systemet som blir begränsande beror i hög grad på hur systemet är uppbyggt och var man lägger systemgränserna.

För konventionella synkrongeneratorer är rotorernas svängmassa kopplad till elsystemet. Om någon elkonsument plötsligt kopplas bort i systemet kommer systemets frekvens att stiga. Det innebär att alla synkrongeneratorer roterar snabbare. Men då kommer rotorernas svängmassa att motverka denna frekvens- och varvtalsökning. Det hjälper till så att systemet frekvens inte ökar lika snabbt som om det inte fanns någon svängmassa.

För vindkraftverk med variabelt varvtal (där varvtalet styrs genom en frekvensomriktare) är rotorernas svängmassa inte kopplad till systemet och hjälper därför inte till med att motverka frekvensändringar. När vindkraftverken ersätter kraftverk med synkrongeneratorer minskar därför systemets frekvensstabilitet vilket kan vara ett problem när produktionen sker med stor andel vindkraft.

Konventionella synkrongeneratorer används även för att hålla spänningen i elnätet, såväl för kontinuerlig spänningshållning som vid felfall i nätet. Vid ersättningen av konventionella kraftverk med vindkraftverk måste man därför säkerställa systemets förmåga till spänningshållning och säker drift.

År 2011 producerades på Irland 17 procent av elkraften från vindkraft. Irland planerar att 2020 nå en andel på 40 %. Detta har föranlett omfattande studier över hur kraftsystemet behöver anpassas [18]. För systemet på Irland utgör just frekvensstabilitet den huvudsakliga begränsningen vid denna ökning. Studien visar att det skulle vara möjligt att inkludera upp till mellan 60 – 80 procent vindkraft effektmässigt.<sup>13</sup> Förutsättningar för det är att vindkraftverken och andra kraftverk uppfyller nätföreskrifter<sup>14</sup> för att motstå spänningsdippar<sup>15</sup> och att man ändrar inställningar i skydd för felbortkoppling vid snabba frekvensändringar.

Hur stor andel vindkraft man kan ha i ett kraftsystem beror dock på hur systemgränserna sätts och vilka medel man använder för att hålla systemet i säker drift. I Portugal hade man 93 % av elproduktionen från vindkraft i november 2011 [19]. Portugals kraftsystem är dock synkront kopplat till det Europeiska systemet och har därför tillgång till synkron svängmassa i detta system. Det gör att detta system skiljer sig mot systemet på Irland.

### 3.2 Möjligheter för vindkraftverken att aktivt delta med systemdrifttjänster

Andelen vindkraft som man kan ha i ett kraftsystem beror på vilka komponenter som finns i systemet för att hjälpa till med frekvens- och spänningshållning och stabilitet i kraftsystemet (så kallade systemdrifttjänster) samt på vindkraftens egen förmåga att just tillhandahålla systemdrifttjänster.

---

<sup>13</sup> Egentligen att 20-40 % av effekten utgörs av konventionella synkrongeneratorer.

<sup>14</sup> På engelska "Grid Codes"

<sup>15</sup> Så kallad "Fault Ride Through"-kapacitet

I en sammanställning över trender och forskningsläget framtagen inom forskningsprogrammet Vindforsk [20] belyses två parallella val. Ett där man tydliggör kraven på störningstålighet för vindkraftverken men där de inte själva deltar med systemdrifttjänster. Det andra valet är att låta vindkraftverken vara en del i de system som bidrar till spännings- och frekvenshållning. Speciellt för större parker i havet där parkerna är anslutna via större HVDC-anläggningar finns möjlighet att utnyttja vindkraftsparken inte enbart för elproduktionen utan även för systemdrifttjänster. Det pågår flera forsknings- och demonstrationsprojekt som syftar till att klarlägga hur vindkraftverk och vindkraftsparker ska kunna bidra med systemdrifttjänster.

Ett vindkraftverk har med sin rotor (bladen) en stor svängmassa. Konventionell styrning av moment och varvtal gör emellertid att svängmassan inte kopplas direkt till nätet. Med en styrning där nätets frekvens återkopplas vid varvtalsregleringen kan emellertid rotorns svängmassa kopplas till frekvensen för att åstadkomma så kallad ”syntetisk svängmassa”<sup>16</sup>. Flera tillverkare utvecklar numer versioner med styrsystem för att bidra med tröghet och frekvenshållningen [23].

På Irland kommer man (som en del i EirGrids program för smarta elnät) att genomföra tester med Vindkraftverk (med GE Energy:s system WindInertia) i syfte att skapa erfarenhet från styrning där vindkraften bidrar till frekvenshållning med så kallad syntetisk tröghet [25], [26]. Detta ingår som ett led i att nå ett system med större andel än 60 – 80 % vindkraft i systemet. Att låta vindkraften bidra med systemdrifttjänster är dock endast en av flera möjligheter och olika marknadssystem för att säkerställa säker drift är lika viktiga. På Irland har man inom programmet DS3 (Delivering a Secure, Sustainable Electricity System) förslagit produkter som upphandling av ”Synchronous Inertial Response (SIR)” som en del av åtgärderna för att kunna öka andelen vindkraft [24].

Inom det svenska forskningsprogrammet Vindforsk har flera projekt behandlat såväl vindkraftsverkens förmåga att motstå stöningar i kraftsystemet som att bidra med systemdrifttjänster. Dessa forskningsprojekt och trender inom området finns sammanfattade i rapporterna [20-22]. Inom EU-projektet TWENTIES [30] pågår flera demonstrationer där vindkraften bidrar med systemdrifttjänster.

Tabell 3 visar ett tämligen brett spann av koncept för drivlinan i vindkraftsystem. Framtida konceptval kommer att påverkas av respektive koncepts möjligheter att nå god ekonomi vilket innehåller flera delar som kostnad för konceptet, verkningsgrad, tillförlitlighet och även möjligheter till samverkan med kraftsystemet. Sannolikt kommer fler koncept att existera. Samtidigt som det pågår harmonisering av nätföreskrifter kommer olika vindkraftverk att användas med olika optioner för systemdrifttjänster beroende på hur och i vilket kraftsystemens de kopplas in.

Alternativ och möjligheter för vindkraften att bidra med systemdrifttjänster är många och att få kraftsystemets alla delar att fungera tillsammans är en stor utmaning där forskning och demonstrationsprojekt kommer att vara en viktig del. Inom IEC (Technical Committee 88 för vindkraft) pågår arbete med såväl standard för simulering av vindkraftsverkens elektriska system vid kraftsystemstudier som standarder för testning. Det finns ett starkt behov av forskning och utveckling kring system där många komponenter i kraftsystemet samverkar för säker drift. I det perspektivet går utvecklingen av vindkraftsteknik och utvecklingen av smarta elnät inte att separera.

---

<sup>16</sup> På engelska kallat synthetic eller virtual inertia

## 4 Referenser

- [1] BP Statistical Review of World Energy 2012 Statistical review of world energy full report 2012
- [2] World Market Update 2012, mars 2013,  
<http://www.navigantresearch.com/research/smart-energy/wind-energy>
- [3] EC Communication (2008) Offshore Wind Energy: Action needed to deliver on the Energy Policy Objectives for 2020 and beyond, 2008 COM(2008) 768 final.  
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0768:FIN:EN:PDF>
- [4] KOM(2011) 658 slutlig, 2011/0300 (COD) Förslag till EUROPAPARLAMENTETS OCH RÅDETS FÖRORDNING om riktlinjer för transeuropeiska energiinfrastrukturer. [http://ec.europa.eu/energy/infrastructure/strategy/2020\\_en.htm](http://ec.europa.eu/energy/infrastructure/strategy/2020_en.htm)
- [5] Vindkraftsstatistik 2011, ES 2012:02, Energimyndigheten 2012
- [6] På väg mot ett förnybart elsystem - möjligheter till 2030. Rapport med tre möjliga utvecklingsvägar för elproduktion och elanvändning fram till 2030. Rapport från Svensk Vindenergi mars 2013.
- [7] Energimyndigheten, Långsiktsprognoz 2010, ER2011:03,  
<http://webbshop.cm.se/System/DownloadResource.ashx?p=Energimyndigheten&rl=default:/Resources/Permanent/Static/a5f894444155405fbb1d1a063cf43ea4/ER201103w.pdf>
- [8] Tidsskiften ERA, nr 2 2013.
- [9] NEPP Mid term report, maj 2012, [www.nepp.se](http://www.nepp.se)
- [10] Nordic Energy Technology Perspectives, Pathways to a Carbon Neutral Energy Future, [www.iea.org/etp/nordic](http://www.iea.org/etp/nordic)
- [11] El från nya och framtida anläggningar 2011, Sammanfattande rapport, Elforsk rapport 11:26
- [12] Arikel i tidsskriften Windpower Monthly januari 2013 av David Milborrow,  
<http://www.windpowermonthly.com/article/1168162/Wind-energy-costs-bring-projects-profitability>
- [13] Slutrapport för EU-projektet UpWind, Design limits and solutions for very large wind turbines, March 2011 <http://www.upwind.eu/>
- [14] Arikel i tidsskriften Windpower Monthly av James Quilter, 14 mars 2013,  
<http://www.windpowermonthly.com/article/1174697/GE-build-10MW-turbine-testing-facility>
- [15] Close up - the Vestas V164 7MW offshore turbine. Artikel i tidsskriften Windpower Monthly 14 April 2011 av Eize de Vries,  
<http://www.windpowermonthly.com/article/1065676/Close---Vestas-V164-7MW-offshore-turbine>



- [16] Artikel i tidsskriften Windpower Monthly 5 April 2011 av Erin Gill, <http://www.windpowermonthly.com/article/1173416/Statoil-Hitachi-consider-Hywind-Japan>
- [17] Tall towers for large wind turbines, Staffan Engström et al. Elforsk report 10:48, 2010,
- [18] Eirgrid and Soni, “Ensuring a Secure, Reliable and Efficient Power System in a Changing Environment” 2011, [http://www.eirgrid.com/media/Ensuring\\_a\\_Secure\\_Reliable\\_and\\_Efficient\\_Power\\_System\\_Report.pdf](http://www.eirgrid.com/media/Ensuring_a_Secure_Reliable_and_Efficient_Power_System_Report.pdf)
- [19] IEA Wind, 2011 Annual Report, [www.ieawind.org](http://www.ieawind.org)
- [20] Power quality and system stability - Vindforsk projects, a survey of the development and research needs., Morten Hemmingsson and Daniel Karlsson, Elforsk report 12:39, 2012
- [21] Generators and internal electrical systems, Vindforsk projects, a survey of the development and research needs. Paul Gardner , Elforsk report 12:40, 2012
- [22] Reserve requirements, balancing and market issues, Vindforsk projects, a survey of the development and research needs, Johan Claesson and Per Wingårdh, Elforsk report 12:42, 2012
- [23] Frequency Controlling Wind Power - Modeling of control strategies, Mats Wang-Hansen, Robert Josefsson and Haris Mehmedovic, Elforsk rapport 12:43, 2012
- [24] DS3: System Services Consultation Finance Arrangements, EirGrid och Sony. 2012, <http://www.eirgrid.com/operations/ds3/>, rapporten från länken [http://www.eirgrid.com/media/System\\_Services\\_Consultation\\_-\\_Finance\\_Arrangements.pdf](http://www.eirgrid.com/media/System_Services_Consultation_-_Finance_Arrangements.pdf)
- [25] DS3 Programme Advisory Council Meeting Minutes, Eirgrid, October 2012, <http://www.eirgrid.com/media/Advisory%20Council%20Minutes.pdf>
- [26] Delivering the Power System of Tomorrow, Smart Grid, EirGrid Group Customer Conference 2012, Ciara Corby 25 October 2012, <http://www.eirgrid.com/media/Ciara%20Corby%20EirGrid%20Smart%20Grid%20Programme.pdf>
- [27] Wind farm configuration and energy efficiency studies – series DC versus AC layouts, Stefan Lundberg, PhD Thesis, Dep. Of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2006, ISSN-0346-718X
- [28] Design and control of a DC collection grid for a wind farm, Lena Max, PhD Thesis, Dep. Of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2009, ISSN-0346-718X
- [29] System aspects and modulation strategies of an HVDC-based converter system for wind farms, Stephan Meier, PhD Thesis, School of Electrical Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2009, ISSN-1653-5146
- [30] [www.twenties-project.eu](http://www.twenties-project.eu)
- [31] Global Wind Report, Annual market update 2012, GWEC, April 2013, [www.gwec.net](http://www.gwec.net)
- [32] Global Wind Energy Outlook 2012, GWEC och Greenpeace, November 2012, [www.gwec.net](http://www.gwec.net)

## Delrapport till Samordningsrådet för smarta elnät

# Solceller – Teknikutveckling och tillämpning

## Sammanfattning

Solinstrålningen i södra Sverige är i samma storleksordning som i Danmark och i norra Tyskland. Särskilt i Tyskland har marknaden för solceller vuxit kraftigt under senare tid och år 2012 uppgick den installerade effekten för solceller till över 32 GW motsvarande närmare 400 W/capita (1). Skälet till detta är att Tyskland i flera år har haft ett fördelaktigt stöd i form av en särskild inmatningstariff för solet.

Solceller spelar en mycket mer blygsam roll i det svenska energisystemet. I slutet av 2012 var den installerade effekten 23,8 MW eller 2,5 W/capita (1). Trots sjunkande priser på solceller talar mycket för att marknaden för solceller i Sverige även framöver kommer att vara relativt begränsad. I första hand bedöms solceller vara intressant för elanvändaren. Genom egen elproduktion kan elkonsumenten minska behovet av köpt el och värdet av den producerade elen då blir samma som priset för köpt el.

Det svenska elnätet bedöms kunna klara även en storskalig integration av solet. Simuleringar med tre verkliga distributionsnät – ett stadsnät, ett förortsnät och ett landsbygdsnät – visar på goda möjligheter att integrera solet i de befintliga distributionsnäten med bibehållen kvalitet (2). I stadsnätet skulle soletanläggningarna kunna dimensioneras till 100 procent av den årliga elanvändningen utan att nätproblem uppstår och för förorts- och landsbygdsnätet är motsvarande siffra 60 procent.

## Inledning

Jordytan träffas årligen av 10 000 gånger mer solenergi än vad vi gör av med i fossila bränslen. Med dagens verkningsgrader på mellan 10 och 20 procent är solceller en mycket yteffektiv teknik, jämfört med t.ex. odling av biobränslen. Teoretiskt kan solceller tillgodose världens totala energibehov utan att konkurrera med matförsörjning och bevarad biologisk mångfald. Solceller i 5 % av Sahara skulle t.ex. kunna tillgodose hela världens energibehov om man kunde hitta ett kostnadseffektivt sätt att lagra soleten. Möjligheten till soletproduktion är geografiskt ojämnt fördelad. Solinstrålningen i södra Sverige är dock i samma storleksordning som i Danmark och i norra Tyskland.

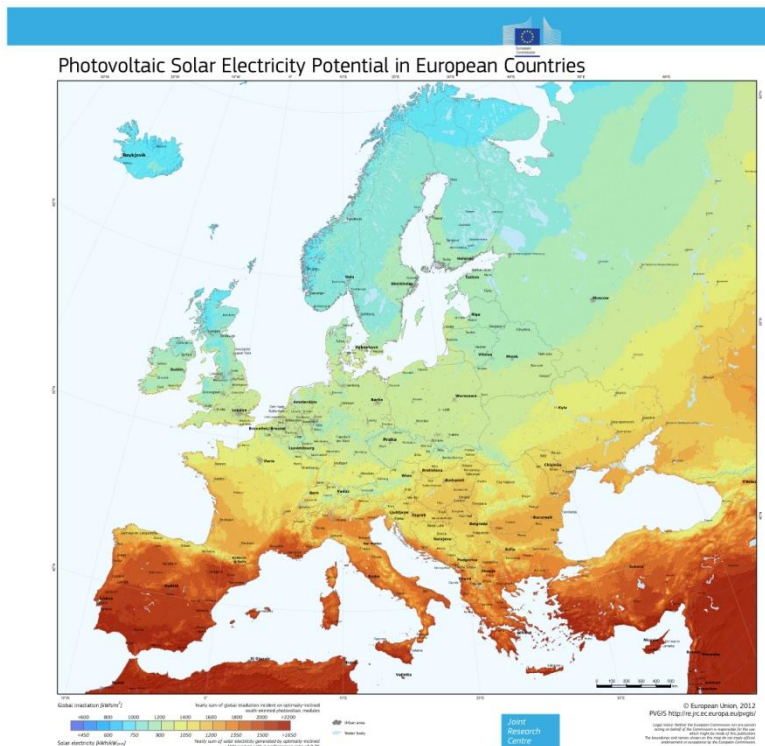


Fig. 1 Solinstrålning och solelproduktionspotential mot en södervänd yta som är optimalt lutad i förhållande till platsens latitud. Källa: JRC (3).

Om man jämför solinstrålningen enskilda månader i Sverige med den svenska elanvändningen så framgår att de i stort sett är varandras motsatser. Det måste därför finnas annan elproduktion som backar upp under vinterhalvåret. Se figur 1 och 2. Sverige har i detta fall en stor fördel i form av den reglerbara vattenkraften.

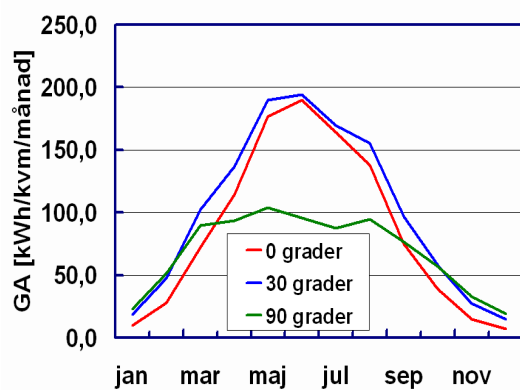


Fig 2 Solinstrålning mot yta med olika lutning. Källa: PVSystberäkningar

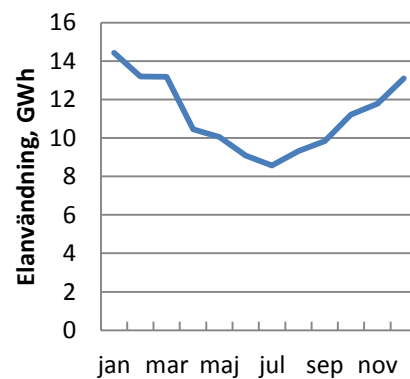


Fig. 3 Sveriges elanvändning 2011. Källa: SvK:s statistik

Solinstrålningens fördelning över dygnet i förhållande till elanvändningen är däremot mer gynnsam, med undantag av delar av kvällstoppen i användningen. I och med att solelproduktionen är kopplad till solinstrålningen har nätslutna solesystem hittills antingen fått

dimensioneras efter elbehovet under en solig sommardag eller så har överskottselen matas ut på elnätet för att säljas till en elhandlare. Vårt svenska elnät är starkt eftersom det är dimensionerat för att klara stora elanvändningslaster med en hög grad av elbaserad uppvärmning vintertid. Det innebär att elnäten i flertalet fall också klarar att ta emot överskottsel från solelproduktionen sommartid.

I många andra länder, bland annat i Tyskland är näten inte lika starka eftersom man har en mycket liten andel elbaserad uppvärmning och en relativt stor andel intermittent produktion. Detta har drivit på en utveckling mot smarta växelriktarsystem som innehåller ett mindre batterilager samt en styrenhet så att delar av elanvändningen, t.ex. uppvärmning, start av tvätt- och diskmaskin, etc. kan styras utifrån tillgången på solel. Solelproduktionen kan därmed i större utsträckning användas i byggnaden och man undviker att mata ut överskottsel på elnätet.

I dagsläget har solcellsgenererad el i Sverige svårt att utan subventioner konkurrera ekonomiskt med etablerade kraftslag. Den globala tillväxttakten på solel är dock snabb och satsningar på marknadsstöd i flertalet länder i kombination med utveckling av högkvalitativa lågprisprodukter talar för att tillväxten består. Tack vare den gynnsamma prisutvecklingen är nu solelanläggningar på väg att bli ekonomiskt konkurrenskraftiga i många länder jämfört med konsumentpriset på el. Inom stora delar av Europa förväntas "grid parity", d.v.s. att kostnaden att producera el från solceller är densamma som att köpa el från elmarknaden, nås innan 2025. Men det krävs också fortsatt fokus på effektivare och billigare solcellssystem för att göra solceller ekonomiskt konkurrenskraftiga som energikälla även för kommersiella elproducenter.

I ett svenskt perspektiv kommer solceller inom överskådlig framtid framförallt att vara intressant för elanvändaren. Genom egen elproduktion kan elkonsumenten minska behovet av köpt el och värdet av den producerade elen då blir densamma som priset för köpt el. Det finns ett fåtal svenska solelparker som har olika ägarformer, men dessa är snarare demonstrationsanläggningar under svenska förhållanden än kommersiella elproduktionsanläggningar.

Energisystemanalyser genomförda inom ramen för NEPP (4) visar att elproduktionen med solceller även på sikt blir förhållandevis liten i Sverige och Norden. Det är egentligen bara i ett scenario (green policy) där energi- och klimatpolitik i stor utsträckning styr mot förnybar elproduktion som solel får betydelse. För Sveriges del uppgår då solelproduktionen till cirka 5 TWh år 2030 och 15 TWh 2050. Motsvarande siffror för Norden är cirka 10 TWh år 2030 och 45 TWh 2050.

Solceller innebär mindre acceptansproblematik än många andra förnybara elproduktionskällor eftersom det är möjligt att integrera solcellerna i byggnader och de ger inte heller upphov till buller eller utsläpp. I Boverkets

byggregler ligger solceller innanför systemgränsen för byggnaden och egenanvänd solcellsproducerad el kan därmed användas för att reducera den årliga elanvändningen i byggnaden för att klara energianvändningskraven i byggnormen. Vid ett eventuellt ökande kylbehov under sommarhalvåret påverkas lastkurvan för den svenska elanvändningen så att den bättre stämmer överens med soletproduktionen.

Enligt ett EU-direktiv ska all ny bebyggelse vara nära nollenergihus från omkring år 2020. För att klara detta krävs någon form av lokal energiproduktion. I det sammanhanget är solet av särskilt intresse.

Elfordon kan kraftigt minska miljöpåverkan från transportsektorn. Byggnadsintegrerade solceller kan bli en del i den hållbara staden där el till transporter och boende produceras i anslutning till byggnaden i det smarta energisystemet. Solceller kan även användas direkt för att förse fordon med energi i soldrivna laddstationer.

En ökad användning av distribuerad byggnadsanknuten energiproduktion har potential att öka människors medvetande i el- och energifrågor och bidra till energibesparingar genom ett effektivare energibeteende. Detta förutsätter dock att användarna har tydlig information om hur mycket el olika apparater använder och hur mycket el som produceras från solcellerna i realtid. Här finns ett behov av utveckling av ett smart energisystem.

## Teknikläge, kostnader, utvecklingspotential

Ett traditionellt solcellssystem består av solcellsmoduler samt s.k. BoS (Balance of System) komponenter som växelriktare, brytare, monteringsprofiler, kablar, överspänningsskydd, transformatorer för större system, sensorer, loggning, batterier (om ej nätanslutet) och eventuellt en extra elmätare.

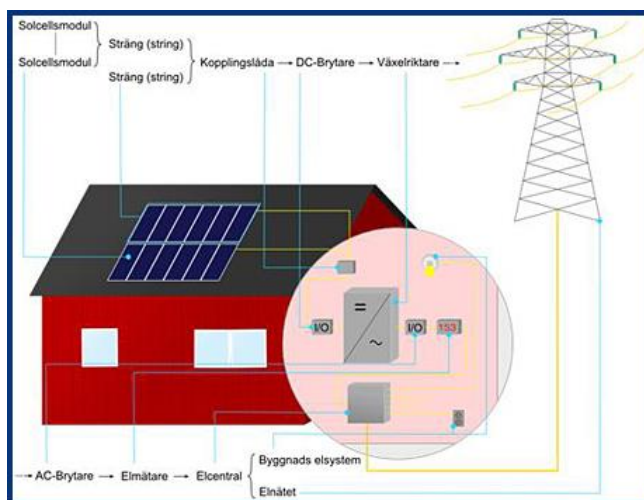


Fig. 4 Schematisk bild av solcellssystem, källa [www.solelprogrammet.se](http://www.solelprogrammet.se).

Kiselbaserade solceller är fortsatt vanligast, med modulverkningsgrader på 10-20 %. Utveckling pågår för att öka verkningsgraden och sänka tillverkningskostnaderna, bl.a. genom att substituera silver med koppar i ledningsbanorna och använda mer n-dopat kisel. Hög verkningsgrad är dock inte per automatik bättre, det beror på kostnaden för den yta man har tillgänglig att bygga på. Ett alternativ till att producera dyrare högpresterande solceller är istället att producera billigare tekniska lösningar som har en något lägre verkningsgrad, exempelvis tunnfilmssolceller. Tunnfilmssolceller innehåller mindre mängd material och kan framställas industriellt i stor skala. Flera tillverkare av tunnfilmsmoduler har produkter på marknaden och på forskningsstadiet ligger verkningsgraderna nära kommersiella kiselbaserade moduler.

Processerna för att tillverka kiselmoduler blir dock också allt mer kostnadseffektiva, så i dagsläget (2013) är kiselmoduler mer kostnadseffektiva än tunnfilmssolceller. Tunnfilmssolcellernas andel av världsmarknaden har också gått ned, framförallt för att användningen av kiselbaserade moduler har gått upp så kraftigt. Det finns dock andra motiv för att satsa på tunnfilmsteknik, exempelvis arkitektoniska värden eftersom svarta moduler är efterfrågade för byggnadsintegrering.

Forskning pågår också för att få fram andra typer av solceller som ska kunna produceras i stor skala till lågt pris, exempelvis olika typer av organiska solceller (verkningsgrad 10-11 % på forskningsstadiet). Tekniker med halvtransparenta solceller öppnar nya möjligheter för solceller som byggnadsmaterial. Verkningsgraderna är blygsamma, men när solcellen också kan utgöra ljusinsläpp i en fasad finns möjlighet att nyttja stora ytor.

Under de senaste åren har en kraftig kostnadssänkning skett för solcellsmoduler. Flera faktorer har bidragit till detta. Marknaden är större, konkurrensen mellan tillverkarna har skärpts och tillverkningsprocesserna är i hög grad industrialiserade och effektiva. Analytiker spår dock att kostnadsminskningen kommer att avta eftersom det är svårt att pressa modulkostnaderna ytterligare med bibehållen kvalitet på produkterna och livskraftiga företag.

Även kostnaderna för BoS-komponenterna har sjunkit, men inte i samma takt som kostnadssänkningarna för solcellsmodulerna. Kostnaden för dessa komponenter skulle behöva halveras för att kostnaden för att producera el med solceller (i goda sollägen) ska hamna i nivå med storskalig elproduktion. Här finns sannolikt möjligheter att reducera kostnaden eftersom produktionen sker i industriell skala. Däremot är det svårare att pressa installationskostnaden, eftersom den är starkt beroende av lokala förutsättningar såsom takets konstruktion, skuggande objekt, logistik och installatörer.

Kostnaden för att installera ett solcellssystem är beroende av systemstorlek och lokala installationsförutsättningar. En uppskattning av kostnadsbilden (exklusive moms) idag (november 2013) är:

- 5 kW 20 kkr/kW (villasystem)
- 30 kW 18 kkr/kW (flerbostadshus)
- 100 kW 15 kkr/kW (större fastighet)

Hur stor yta som behövs för att installera en viss effekt beror på systemets verkningsgrad och ligger i storleksordningen 7-9 m<sup>2</sup>/kW. När man sedan ska beräkna kostnaden per producerad kWh så beror denna dels på investeringskostnaden och dels på vilken kalkylränta som används.

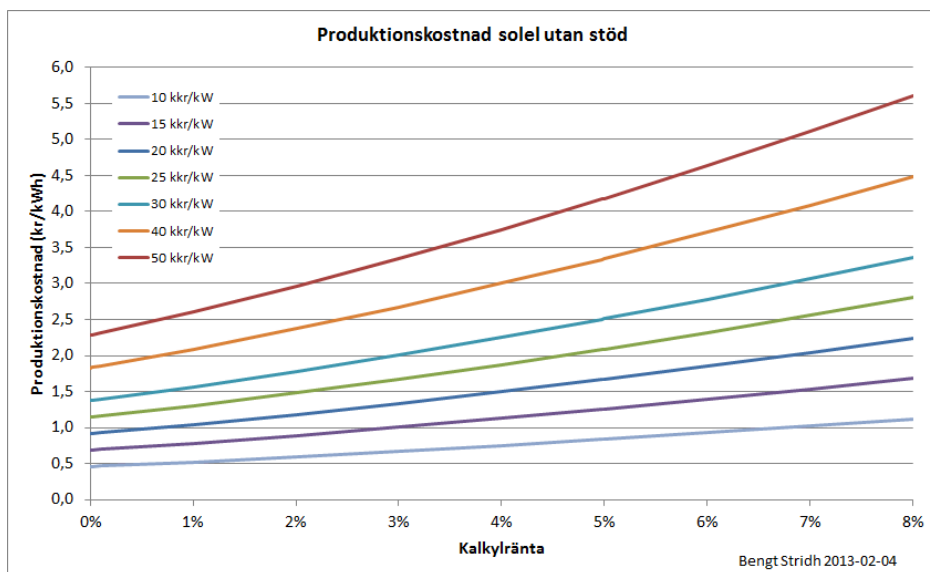


Fig. 5 Produktionskostnaden utan investeringsstöd vid olika installationskostnader och olika kalkylräntor. Diagram: Bengt Stridh (5).

För närvarande finns ett investeringsstöd i Sverige som sträcker sig till och med 2016. Från och med 1 februari 2013 kan man få 35 % av investeringskostnaden i bidrag, med vissa begränsningar (6). Det finns också möjlighet att under vissa förutsättningar få elcertifikat för den producerade solen.

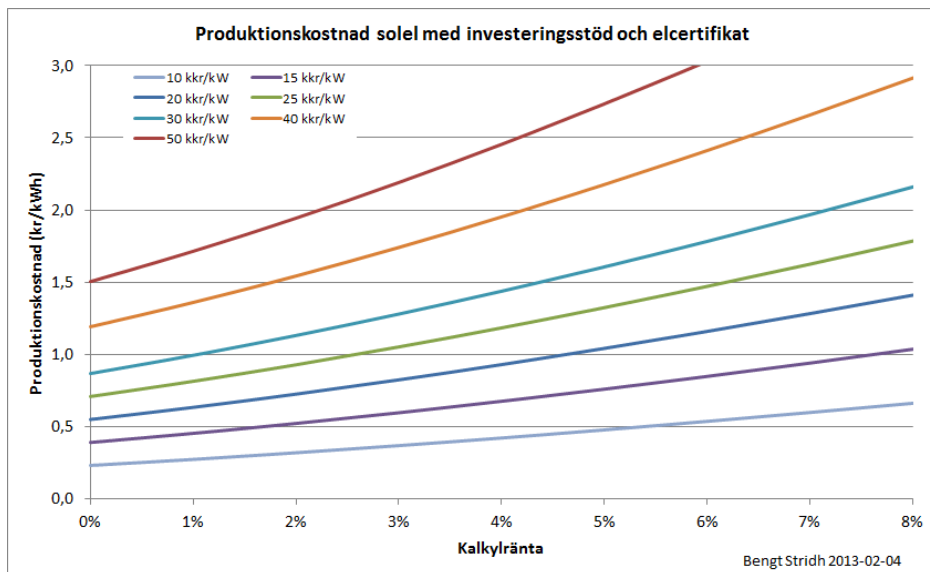


Fig. 6 Produktionskostnaden med investeringsstöd och elcertifikat vid olika installationskostnader och olika kalkylräntor. Diagram: Bengt Stridh (5).

I delar av det tyska distributionsnätet har man nu en mycket hög penetrationsgrad och ett flertal studier har gjorts för att undersöka påverkan på elnätet. I tyska Ulm gjordes mätningar (7) i distributionsnätet i ett område med 130 byggnader varav 18 hade solcellssystem med totalt 222 kW topp effekt, vilket utgjorde 35 % av transformatorns nominella effekt. Mätningar av spänningsvariationen vid transformatorn visade att variationen var som minst vid en hög andel solel, eftersom växelriktarna stabiliserade nätet. I studien visades också att snabba variationer i solinstrålning inte var så problematisk som man kan befara.

Det finns inga motsvarande områden i Sverige där man har en så hög penetrationsgrad. En simuleringsstudie (2) där man studerat tre verkliga distributionsnät – ett stadsnät, ett förortsnät och ett landsbygdsnät – visade på goda möjligheter att integrera solelen i de befintliga distributionsnäten med bibehållen kvalitet. I stadsnätet skulle solelanläggningarna kunna dimensioneras till 100 % av den årliga elanvändningen utan att nätproblem uppstår och för förorts- och landsbygdsnätet är motsvarande siffra 60 %.

Simuleringar har också gjorts på nationell nivå (8) (9) med resultatet att det svenska elnätet klarar en storskalig integration av solel eftersom variationer i instrålning fördelas ut över en stor geografisk area. Särskilt fördelaktigt är det att kombinera solel och vindkraft eftersom dessa kompletterar varandra när det gäller produktionsprofil. En optimal mix enligt studien är 30 % solel och 70 % vindkraft. Med en större andel distribuerad produktion ökar också kraven på exakta prognosverktyg för att kunna förutsäga den förväntade produktionen. I nedanstående diagram visas den månadsvisa summan av producerad solkraft och vindkraft i Tyskland 2012, vilken ligger mellan 7,6 och 4,7 TWh.



## Monthly Production Solar and Wind

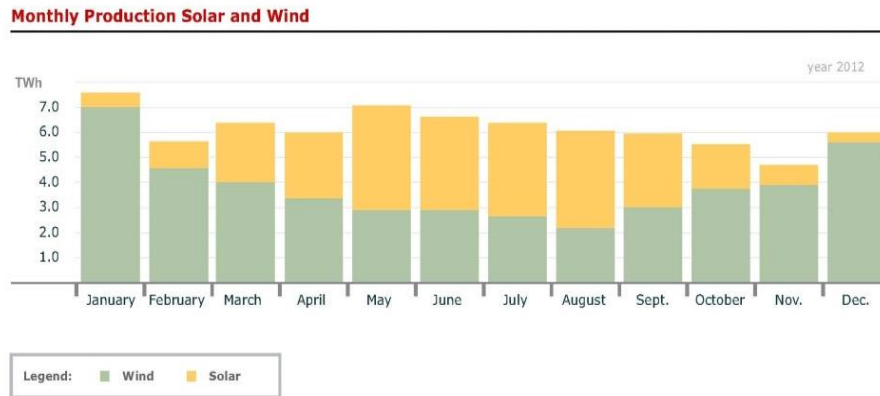


Fig. 7 Månadsvis summa av producerad solkraft och vindkraft i Tyskland 2012. Källa: Fraunhofer ISE (10).

I bland annat Tyskland utvecklas nu system för att öka den egna användningen av solel. Företaget SMA (11) har bl.a. utvecklat ett smart hem system där solelproduktion, elanvändning och ett mindre batterilager kopplas samman och optimeras via en styrenhet.

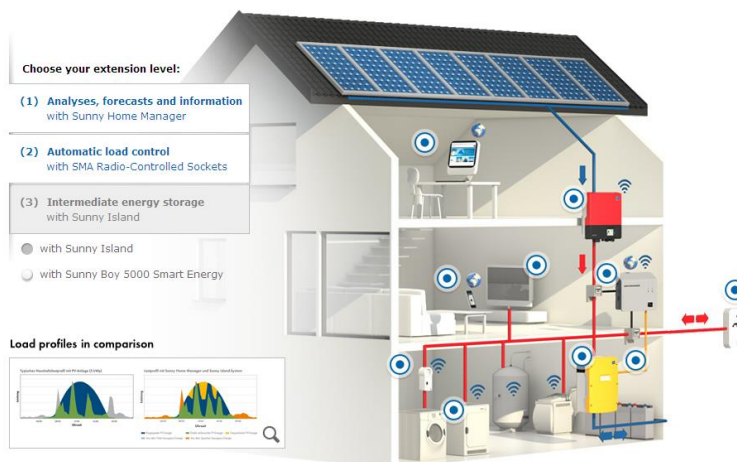


Fig. 7 SMA Smart Home system där solelproduktion, batterilager och elanvändning optimeras av en styrenhet

Det smarta systemet prognostiserar förväntad elproduktion och styr sedan utvalda hushållsapparater efter tillgången på solel, batteristatus och elpris. Elanvändning, solelproduktion och batteristatus visas i realtid via en webportal på dator eller smart telefon.

För svenska förhållanden är det dock en blygsam ökning av användningen av den egna solelproduktionen som kan uppnås med smarta system. En simuleringsstudie (12) baserad på verklig elanvändning i 20 svenska hushåll

indikerar att ökningen är i storleksordningen några procent vid optimal styrning av tvätt-, tork- och diskmaskiner.

## Marknaden för solceller

2012 fanns den största solcellsmarknaden i Tyskland, med en total installerad effekt på 32,4 GW eller knappt 400 W/capita (13). Tyskland har under flera år haft en fördelaktig inmatningstariff för solel. Tariffen har justerats ned i takt med att priserna sjunkit. Kostnaden för att producera el med solceller ligger nu under eller nära marknadspriset på el i många tyska regioner, varför man diskuterar justeringar av inmatningstariffen för att främja egen användning och lagring av den egenproducerade elen.

Italien har haft en förmånlig inmatningstariff och är det land som har näst störst andel solceller installerade, totalt, 16,3 GW (13) och 3 % av den nationella elanvändningen producerades med solceller. Man har identifierat två hot mot den kraftiga marknadstillväxten i Italien – problem med svaga nät i delar av södra Italien där installerad topp effekt av sol- och vindkraft är i samma storleksordning som maxanvändningen och att stödsystemet håller på att spränga budgetramarna.

Starkt växande marknader finns också i Kina, USA, Japan och Frankrike (13). Enligt EPIA, European Photovoltaic Industry Association, kom 2 % (14) av den el som användes i Europa 2011 från solceller. Enligt EPIA (14) kommer tillväxttakten på de stora europeiska marknaderna att avta inom ett par år och de stora tillväxttalen kommer istället att ske på utomeuropeiska marknader som exempelvis Kina och USA.

Solcellsmarknadens tillväxt har historiskt varit starkt kopplad till nationella stödsystem. Tack vare stödsystemen är nu prisbilden för egenproducerad el så gynnsam i många delar av Europa, att stödsystemen troligen har spelat ut sin roll som marknadsdrivare på de stora marknaderna. Istället tros olika former av nettodebitering vara tillräckligt för att stödja marknadstillväxten. En effekt av denna åtgärd kan dock vara att det inte främjar egen användning av den egenproducerade elen.

Den danska solelmarknaden har vuxit kraftigt under 2012. Enligt danska Energi Styrelsen (15) fanns det 3 000 mindre solcellsanläggningar med en sammanlagd effekt på 10 MW. Från januari till oktober 2012 tillkom 40 000 anläggningar med en sammanlagd effekt på 185 MW. Danmark har bland det högsta elpriset för konsumenter i Europa och under 2012 tillämpades nettodebitering för mindre solcellsanläggningar. Den kraftiga tillväxten under 2012 ledde dock till en översyn av villkoren för att mata ut överskottsel.

Solceller har idag en blygsam roll i det svenska energisystemet. I slutet av 2012 var den installerade effekten 23,8 MW eller 2,5 W/capita (1). Investeringsstödet villkor (exempelvis maximal ersättningsnivå per kW och maximal anläggningsstorlek) begränsar i viss mån den svenska solelmarknaden i och med att många aktörer villkorar ett investeringsbeslut

med att bidragsbeslut. Utöver investeringsstödet finns också möjligheter att få ersättning för elcertifikat, men endast cirka 10 % av soleanläggningarna ansöker om certifikat.

Från flera håll har framförts att någon form av nettodebitering, d.v.s. kvittning mellan producerad solelkWh och köpt kWh, bör införas i Sverige. Ett flertal utredningar har behandlat frågan, och den senaste kom med rekommendationen att ge ett skattevdrag istället för en ren nettodebitering.

Med dagens förutsättningar är soleden alltid värd mest om den används av anläggningsägaren. Detta styr mot små anläggningar i fastigheter, trots att det systemmässigt skulle vara mer fördelaktigt med större system eftersom installationskostnaden sjunker med ökande storlek.

I och med att investeringskostnaden för solesystem har sjunkit så kraftigt är kombinationen soles plus värmepump på väg att bli mer konkurrenskraftig än solvärmesystem.

## Citerade arbeten

1. "Trends in photovoltaic applications – Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2012. s.l. : International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 2013.
2. Determining and increasing the hosting capacity for photovoltaics in Swedish distribution grids. **Walla, Tobias, et al.** s.l. : 27th EUPVSEC, 2012.
3. [Online] [http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmaps/eu\\_cmsaf\\_opt/PVGIS-EuropeSolarPotential.pdf](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmaps/eu_cmsaf_opt/PVGIS-EuropeSolarPotential.pdf).
4. **Perspectives, NEPP North European Power.**
5. **Stridh, Bengt.** [Online] <http://bengts.blogg.viivilla.se/>.
6. Villkor för solestöd. [Online] Energimyndigheten. <http://www.energimyndigheten.se/Hushall/Aktuella-bidrag-och-stod-du-kan-soka/Stod-till-solceller/>.
7. Impact of increasing photovoltaic energy penetration on the distribution grid. **Holger, Gerd Heilscher, Florian Meier, Oliver Mayer, Matthias Grottko, Ruf.** s.l. : EUPVSEC, 2012.
8. **Widén, Joakim.** Correlations between large scale solar and wind power in a future scenario for Sweden. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 2. 2011.
9. **Söder, Lennart.** På väg mot en elförsörjning baserad på enbart förnybar el i Sverige: En studie om behovet av reglerkraft. Version 1.0. s.l. : KTH, 2012.
10. [Online] <http://www.ise.fraunhofer.de/en/downloads-englisch/pdf-files-englisch/news/electricity-production-from-solar-and-wind-in-germany-in-2012.pdf>.
11. SMA Smart Home. [Online] <http://www.sma.de/en/solutions/medium-power-solutions/sma-smart-home.html>.
12. Evaluating the Benefits of a Solar Home Energy Management System: Impacts on Photovoltaic Power Production Value and Grid Interaction. **Widén, Joakim and Munkhammar, Joakim.** s.l. : ECEEE Summer Study 2013, 2013.
13. **PVPS, IEA.** A snapshot of global PV1992-2012. 2012.
14. **EPIA.** Global Market Outlook for Photovoltaics Until 2016. 2012.

15. Faktaark 6 november 2012 J.nr. 3401/1001-4896. [Online] Energi Styrelsen.  
[http://www.dkvind.dk/html/nyheder/2012/pdf/081112\\_faktaark.pdf](http://www.dkvind.dk/html/nyheder/2012/pdf/081112_faktaark.pdf).
16. *Widespread integration of distributed photovoltaics at high latitudes: Opportunities and challenges.* **Widén, Joakim and Munkhammar, Joakim.** 2011.
17. **Widén, Joakim, et al.** *Konsekvenser av avräkningsperiodens längd vid nettodebitering av solel.* s.l. : Elforsk, 2010.

Delrapport till samordningsrådet för smarta elnät

## Kunskapssammanställning om energilagring

### Sammanfattning

Väl fungerande och ekonomiska energilagringstekniker är en önskedröm som skulle ge drastiskt nya förutsättningar för energisystemen i allmänhet och elsystemen i synnerhet. Det skulle till exempel kunna uppstå helt nya möjligheter att integrera förnybar elproduktion i elsystemen och lagra elproduktion på dygns- och säsongbasis. Det visar sig dock att dessa problem är tekniskt, vetenskapligt och ekonomiskt svåra och trots stora forskningsinsatser främst i USA och Japan under flera decennier har området inte avancerat så snabbt. Det är möjligt att det kan komma en förändring de närmaste åren eftersom stora demonstrationsinsatser är på väg i USA liksom ökande insatser i EU och dess forskningsprogram Horisont 2020. De sista åren har flera större systemstudier om ellagring publicerats av EU och Euroelectric i Europa och av EPRI, (Electric Power Research Institute), i USA.

I Sverige bedrivs ganska begränsade forskningsinsatser inom området. Det beror till stor del på att Sveriges elsystem med sin stora vattenkraftandel kan sägas utgöra ett stort system för energilagring i olika tidsskalor. Energimyndigheten startar dock ett forskningsprogram om bättre batterier våren 2013. ABB har utvecklat några energilagringssystem och InnoEnergy vid KTH har lagring som ett forskningsområde. Elforsk har medverkat i ett internationellt forskningssamarbete inom IEA, tagit fram översiktsrapporter om lagring och genomfört ett projekt om batterilager för vindkraft i ett nätbolag.

För att få perspektiv på utvecklingen av energilagringsteknik i världen kan en kort återblick vara belysande. IEA genomförde 1996-2000, ett samarbetsprojekt om energilagring i elsystem i vilket ett antal länder medverkade däribland Sverige. Projektet resulterade i översikter av då tillgänglig teknik för lagring samt sådan teknik under utveckling. Vidare innehöll det en inventering av problem inom elsystemen som befintlig eller utvecklad teknik för lagring skulle kunna bidra till att lösa.

Teknikutvecklingen har dock inte varit så snabb i vare sig världen eller Sverige sedan dess. Idag är teknikerna för energilagring i princip desamma som för femton år sedan liksom problemställningarna i elsystemen som teknikerna ska kunna lösa. Teknikerna handlar om batterier av olika typer, varav några har tillkommit eller avancerat i sin utveckling bl. a. på grund av det samtidigt ökande intresset för eldrivna transporter, vidare om superkondensatorer, svänghjul, supraledande magnetlager (SMES), pumpkraft, tryckluftslager (CAES), och vätgaslagring, ibland ihop med bränsleceller.

Internationellt är pumpkraft den i särklass största lagringstekniken sett till installerad effekt, vilken växt under 2000-talet. Ett av huvudsyftena med lagring i elsystem idag är att kunna hantera större mängder förnybar energi i produktions-, transmissions- och distributionssystemen. För dessa frågeställningar finns också kopplingar mellan ellagring och smarta nät.

## Utgångspunkter och avgränsningar

Disposition:

- Inledning, hur teknologin påverkar energisystemet, fördelar, utmaningar
- Tekniskläget, kostnader, utvecklingspotential
- Översiktligt kring marknadspotential (potential, kostnader i förhållande till nytta, tidsaspekter)

Rapporten behandlar i huvudsak lagring av elektrisk energi eller lagring för senare omvandling till elektrisk energi för elkraftsystemet. I rapporten används ibland ordet *ellager* som ett sammanfattande begrepp. Notera dock att el i sig mycket sällan lagras (kondensatorer är ett exempel), utan elenergin omvandlas till någon annan energiform som t.ex. lägesenergi hos vatten i pumpkraftverk eller elektrokemiskt i batterier. Lagring av termisk energi behandlas endast mycket översiktligt liksom lagring av mekanisk energi i fordon t ex svänghjul. Batterier, för elfordon mm ingår inte i denna kunskapssammanställning utan. Däremot ingår batterilager av olika typer som delar av elsystem på olika nivåer.

## Teknikläge kostnader och utvecklingspotential

I världen tilldrar sig lagring ett ökande intresse i flera sammanhang. Mest omtalat är batterier för el- eller hybridfordon. Ett problemområde som uppmärksammas allt mer, gäller integration av förnybar energi i elkraftsystem särskilt utjämning av vindkraft från perioder/platser där det blåser mycket till perioder/platser där det blåser litet samt motsvarande förhållanden för solenergi. Lagringsteknik kan också ha betydelse för att ta bort eller lindra effekterna av elavbrott i transmissions- och distributionsnät, (system för avbrottsfri el, s.k. UPS-system eller Uninterrupted Power Supply) och kan ingå i olika typer av reserver i elproduktionssystem.

### *Lagringstekniker*

I begreppet lagringstekniker för elsystemet ingår följande tekniker samt kraftelektronik i gränssnitten till elnät och elproduktionsanläggningar. Kraftelektronikdelen svarar ofta för en väsentlig andel av hela kostnaden för ett system för ellagring

- Pumpkraftverk
- Tryckluftslagring CAES, (Compressed Air Energy Storage)
- Batterier, konventionella och avancerade
- Bränsleceller och väte
- Svänghjul
- Superkondensatorer
- Supraledande magnetlager (SMES<sup>1</sup>)

Dessa tekniker har funnits i olika utvecklingsstadier under de senaste femton åren och i vissa fall ännu längre. Några principiellt nya tekniker har inte tillkommit under den tiden men vissa nya batterityper – i första hand litiumjonbatterier har tillkommit och utvecklats, ibland för andra syften såsom eldrivna transporter och mobiltelefoner.

---

<sup>1</sup> Superconducting Magnetic Electricity Storage

Det internationella utvecklingsläget för lagringstekniker inom elkraftområdet kan illustreras med den totalt installerade kapaciteten i världen år 2010 i olika anläggningstyper<sup>2</sup>:

- Pumpkraftverk 127 000 MWel.
- Pumpkraftverk svarar för över 99 % av den totalt installerade lagringskapaciteten för el i världen.
- Den samlade kapaciteten i pumpkraftverk var ca 80 000 MW vid sekelskiftet 1999-2000 och väntas växa till 203 000 MW år 2014.

Efter pumpkraftverk kommer lagring i komprimerad luft i ett fåtal men stora anläggningar. Övriga tekniker har betydligt mindre totalt installerade effekter (2010):

- Lagring i komprimerad luft (CAES) ca 440 MW
- Batterier:
  - Natrium/svavelbatterier 316 MW
  - Bly/syrabatterier ca 35 MW
  - Nickel/Kadmiumbatterier ca 27 MW
  - Litium/jonbatterier ca 20 MW
  - Redoxflow batterier < 3 MW
- Svänghjul <25MW

Utöver pumpkraftverk är övrig installerad kapacitet för lagring tämligen blygsam om man jämför den med befintlig elproduktion av olika sorter.

I världen stod år 2009 olika typer av batterilager för sammanlagt ca 400 MW och svänghjul för < 25 MW. Batterilager har enligt uppgift ökat till 590 MW i april 2012. Som jämförelse kan nämnas, att vindkraftkapaciteten i EU passerade 100 GW under 2012 och enbart den svenska vindkraftkapaciteten uppgick till strax under 2 900 MW i slutet av 2012 enligt Svensk Vindenergi. Det är alltså långt kvar innan batterilager kan spela någon stor roll för utjämning av vindkraft globalt sett.

I USA tror somliga bedömare på en snabbare utveckling av energilagringstekniken än hittills när resultaten från aktuella amerikanska demonstrationsprojekt kommer ut på marknaden, (se nedan).

### ***Kort om teknikerna***

Energilagringsteknikerna för el befinner sig på olika utvecklingsstadier. Mogna och beprövade tekniker är pumpkraftverk, tryckluftslager, (Compressed Air Energy Storage, CAES) och blybatterier. Dit kan också räknas svänghjul och SMES men SMES är endast kommersiella i mindre storlekar.

---

<sup>2</sup>Källa: Electric Power Research Institute, EPRI, Electricity Energy Storage Technology Options  
A White Paper Primer on Applications, Costs, and Benefits  
Technical Update, December 2010

<sup>3</sup> Enligt rapporten Pumped Storage Hydropower, Summary Report on a Summit Meeting Convened by Oak Ridge National Laboratory, the National Hydropower Association and the Hydropower Research Foundation 2010 väntas världens samlade kapacitet i pumpkraftverk växa till 203,000 MW år 2014 – en årlig tillväxt på 10% [Ingram, Elizabeth A., "Worldwide Pumped Storage Activity," HRW, Vol. 18, No. 4, September 2010, p.13].

Pumpkraftverk är vattenkraftverk med dammar på två nivåer. Lagret töms genom att vattnet får falla mellan den högre och den lägre nivån och producera el via turbinerna. Lagret fylls genom att vattnet pumpas tillbaka från den lägre till den högre nivån.

Vid laddningen av ett tryckluftslager komprimeras luft med kompressorer och elektriska motorer/generatorer. Luften förvaras sedan vanligen i underjordiska utrymmen till exempel övergivna gruvor. När det tillhörande kraftsystemet har produktionsunderskott leds den komprimerade luften och bränsle till en gasturbin som driver motorn/generatoren och genererar el.

Svänghjulsagring kräver hög rotationshastighet och stor roterande massa för att kunna lagra stor rörelseenergi. Moderna svänghjulsager använder magnetiska lager. Axeln "svävar" på ett magnetfält vilket ger låg friktion och slitage. Effekten i typiska svänghjulsager ligger i området 2 kW- 20 MW. Dimensionen på en modul är ca 1 m längd och 0.5-1m i diameter. Svänghjullager kan leverera hög effekt under kort tid men kan endast lagra måttliga energimängder.

I SMES lagras elenergin i supraledande spolar som hålls vid mycket låga temperaturer. Även SMES kan leverera hög effekt men bara under kort tid. Energilager med konventionella batterier finns i effekter upp till 50 MW och urladdningstider upp till några timmar. I övrigt befinner sig teknikerna, särskilt avancerade batterier av flera typer samt tekniker baserade på väte och bränsleceller fortfarande i olika stadier av utveckling, demonstration och tidig marknadsintroduktion.

Energitätheten i Wh/kg är högst för avancerade batterisystem som litium-jon och natrium/svavel. Vissa flödesbatterier som zink/brom och vanadin/redox batterier befinner sig i tidiga kommersialiseringsstadier. De har något lägre energitätheter än litium-jon och natrium/svavel men har fördelen att de kan byggas upp modulärt. Elektrolyterna förvaras i tankar utanför batterikärlet. Batteriets energimängd bestäms av tankarnas storlek och kan bestämmas oberoende av batteriets effekt. Det är därför lätt att skala upp sådana batterier till högre kapacitet. Fraunhoferinstitutet Umsicht i Tyskland har nyligen rapporterat om framsteg med redoxbatterier. Man har fått fram en prototyp med en effekt på 25 kW och en verkningsgrad på 80 Procent. Nästa utvecklingssteg är 100 kW.

Svänghjul och SMES har de högsta effekttätheterna räknat i W/kg.

Självladdning är försumbar för pumpkraftverk och tryckluftslager men kan vara ganska stor för vissa batterisystem, (12 % per dag för Na/S) och för svänghjul (20-100 % /d).

Verkningsgraden under en cykel från laddning till urladdning är 75-85 % för pumpkraftverk 85-95 % för svänghjul 60-95 % för konventionella batterier och 85-95% för avancerade batterier

Investeringskostnaden (i USD/kW) är 700-5000 för pumpkraftverk, 150-500 för svänghjul och SMES, 300-900 för konventionella batterier och 1000-4500 för de avancerade batterityperna.

Livslängden för anläggningar kan vara 50 -100 år för pumpkraftverk och 3-20 år för batterier. Antalet möjliga cykler är högre för de avancerade batterierna än för de konventionella.

Det sagda sammanfattas i följande bilder figur 1 och 2 på nästa sida:



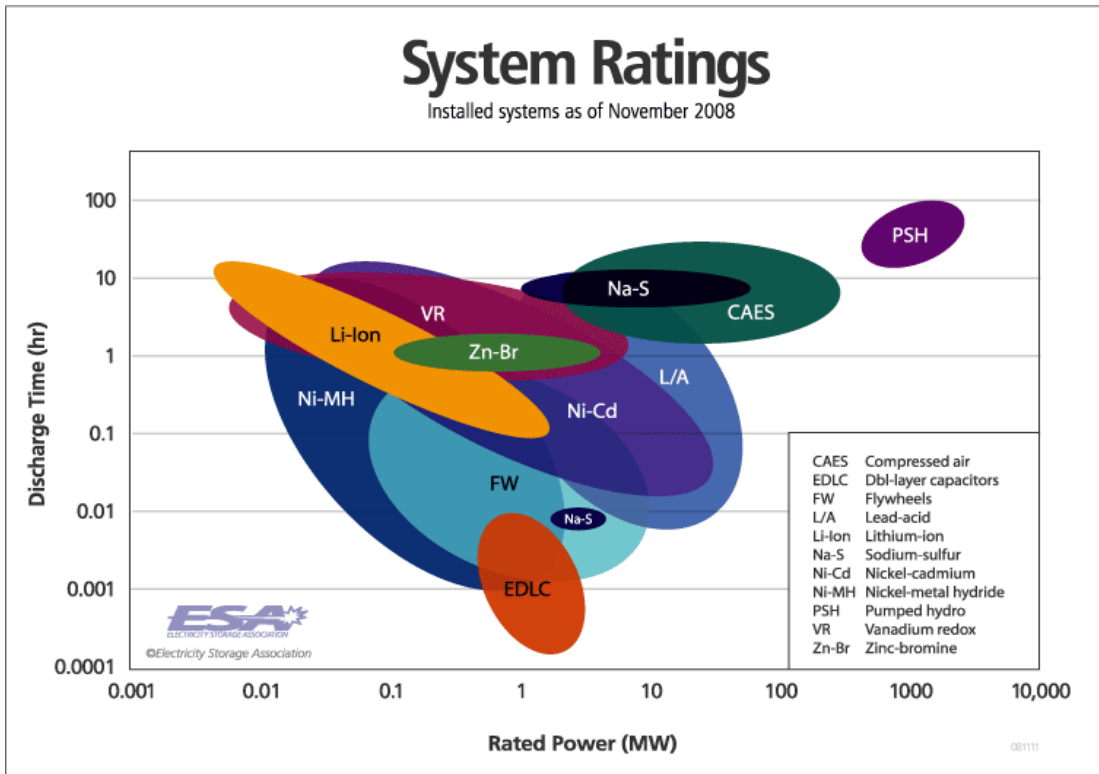


Fig. 1 Kapacitet och urladdningstider för olika energilagringstekniker.  
 Källa: Electricity Storage Association ESA, USA

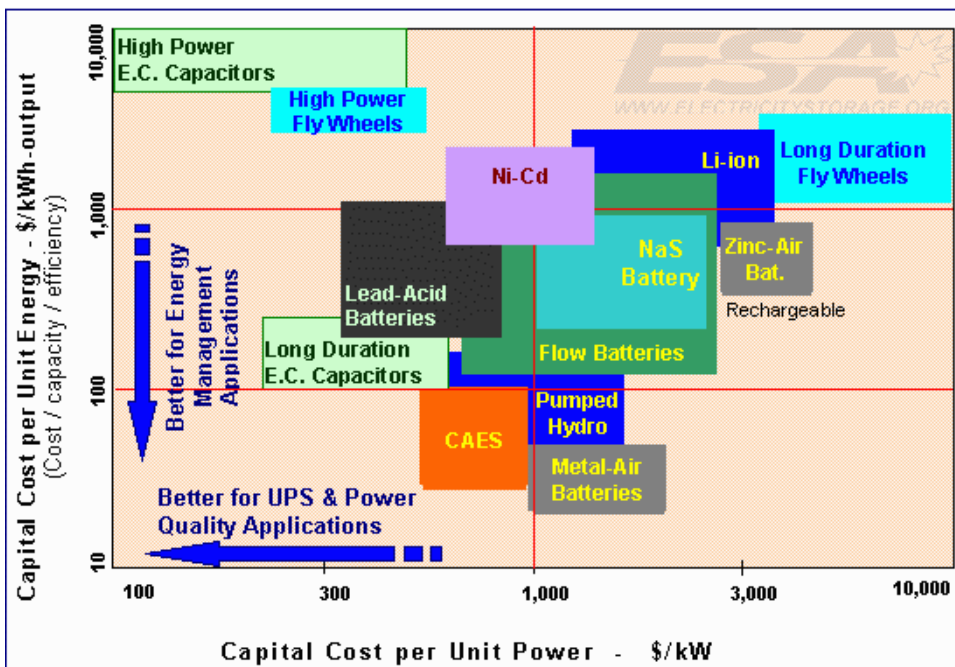


Fig. 2 Kapitalkostnader USD/kWh och USD/kW för olika energilagringstekniker  
 Källa: Electricity Storage Association, ESA (USA)

### ***Vilka problem i elsystemen kan energilagringsteknik bidra till att lösa***

Nedan följer en uppräknig på de problem i elsystemen som energilagringstekniker kan bidra till att lösa:

- Elproduktion
  - Otillräcklig toppkapacitet
  - Otillräcklig belastningsföljning
  - Ökad tillgänglighet
  - Snabb aktiv störningsreserv
  - Produktionsoptimering
  - Momentan aktiv störningsreserv
  
- Elöverföring
  - Spännings- och frekvensreglering
  - Stabilitet
  - För hög/för låg kapacitet
  - Ökad tillgänglighet
  - Dämpning av elektromekaniska pendlingar i kraftsystemet
  
- Distribution
  - Kapacitetsbrist
  - Ökad tillgänglighet
  - Integration av lokal elproduktion
  - Ökad elkvalitet

Installation av energilagringsteknik kan vara ett sätt att skjuta upp investeringar i elproduktion och elnät. Projekt inom ellagring vinner ofta på om flera syften/ problemställningar kan hanteras i en teknisk lösning.

När passar olika energilagringstekniker? Nedan listas några exempel:

- Vattenkraft- eller pumpkraft löser problem av många typer
- Batterianläggningar har hög flexibilitet. Tillämpliga t ex vid senareläggning av nätinvesteringar och integration av förnybar energi
- Stora SMES anläggningar passar för stöttning av kraftöverföring
- Små SMES och svänghjul passar för kundtillämpningar och högre elkvalitet

### ***Energilagring i Sverige***

I Sverige kan man se vattenkraften och dess roll i regleringen av elproduktionssystemet som ett stort lagringssystem med olika tidsskalor för lagringen, från timme till säsong. Svensk vattenkraft spelar också stor roll när det gäller möjligheterna att integrera större mängder förnybar energi i kraftsystemet. Den stora vattenkraftandelen i det svenska elproduktionssystemet har gjort att annan energilagringsteknik för att kunna integrera förnybar energi i elkraftsystemet inte blivit en lika prioriterad fråga som i EU och USA. När det gäller ellagring som ett sätt att ta bort eller lindra effekterna av elavbrott är däremot svenska problem likadana som andra länders.

I Sverige byggdes ett pumpkraftverk i Juktan som blev färdigt 1978. Men när den svenska elmarknaden blev avreglerad från 1996 blev verket oekonomiskt och det byggdes därför om till ett vanligt vattenkraftverk. Ombyggnaden blev färdig 1996. År 2011 kom en riksdagsmotion (M) att bygga om Juktan till pumpkraftverk igen för att integrera vindkraft.

### ***El från solceller och batterilager***

Det svenska elnätet bedöms kunna klara även en storskalig integration av solel. Simuleringar med tre verkliga distributionsnät<sup>4</sup> – ett stadsnät, ett förortsnät och ett landsbygdsnät – visar på goda möjligheter att integrera solel i de befintliga distributionsnäten utan energilager och med bibehållen kvalitet. I stadsnätet skulle soleanläggningarna kunna dimensioneras till 100 procent av den årliga elanvändningen utan att nätproblem uppstår och för förorts- och landsbygdsnätet är motsvarande siffra 60 procent.

I många andra länder, bland annat i Tyskland är näten inte lika starka eftersom man har en mycket liten andel elbaserad uppvärmning och en relativt stor andel intermitterent produktion. Detta har drivit på en utveckling mot smarta växelriktarsystem som innehåller ett mindre batterilager samt en styrenhet så att delar av elanvändningen, t.ex. uppvärmning, start av tvätt- och diskmaskin, etc. kan styras utifrån tillgången på solel. Solelproduktionen kan därmed i större utsträckning användas i byggnaden och man undviker att mata ut överskottsel på elnätet.

### ***Vindkraftverk och batterilager i Sverige***

Inom ramen för Elforsks Smart Grid program har en omfattande förstudie<sup>5</sup> genomförts om energilager anslutna till vindkraftverk. Rapporten behandlar energilager och deras funktion från en nätägares perspektiv. I projektet studeras ett verkligt nät inom Falbygden Energis (Feab) genom mätningar och simuleringar.

Acceptansgränsen är ett sätt att kvantifiera påverkan av ny konsumtion eller produktion på ett elnät. Det är möjligt att höja acceptansgränsen genom förändringar i nätet. Exempel på sådana åtgärder kan vara att bygg nya/byta ut existerande ledningar eller transformatorer, förbättra spänningskontrollen, koppla in filter eller ansluta energilager.

Fem olika tillämpningar för ett energilager beskrivs i förstudien, nämligen ökad acceptansgräns i nätet, minskade nätavgifter mot överliggande nät, att kapacitetsutjämna och balansera elproduktion från intermitteranta energikällor, nätförluster och energilager som reservkraft vid avbrott. Sex olika alternativ för att kunna utöka mängden förnyelsebar energi i ett nät diskuteras, det är traditionell nätplanering, reaktiv effektreglering, nedstyrning av vindproduktion, styrbara laster, dynamisk kapacitetsgräns och utökning av tillåten överlast/ överspänning. I projektet studerades främst litiumjon batterilager eftersom en mindre sådan installation finns under utvärdering inom det studerade exempelnätet hos Feab.

### ***Affärsmodeller***

Två affärsmodeller belyses i rapporten. Dels om ägaren är en nätägare och dels om ägaren är en elhandlare med balansansvar. I affärsmodell *Balanskraft* ingår inköp och för-

---

<sup>4</sup> Determining and increasing the hosting capacity for photovoltaics in Swedish distribution grids. Walla, Tobias, o.a. u.o. : 27th EUPVSEC, 2012.

<sup>5</sup> Elforsk rapport 12:44

säljning på Nord Pool Spot, där även kostnaden för lagrets förluster ingår. Batteriernas kapacitet laddas i och ur på en timme och lagret cyklas en gång per dygn.

I affärsmodellen *Nätägare* används lagret i första hand till att öka acceptansgränsen och cyklas därför i första hand med avseende på överlast. I simuleringarna ingår inte några ekonomiska beräkningar eller antaganden för den nänytta eller tillämpning som energilagret bidrar med.

Då energilager fortfarande är i forsknings- och utvecklingsfasen är det naturligt med höga investeringskostnader, men även låga prisskillnader under ett dygn på Nord Pool Spot bidrar till att det för närvarande inte är en lönsam investering. Rapporten pekar dock på att det finns en något större möjlighet till lönsamhet med affärsmodellen *Balanskraft* än med affärsmodellen *Nätägare*.

Ytterligare en affärsmodell som kan bli aktuell i framtiden avser energilager för en infrastruktur där det bland annat ingår elbilsaddning, solceller, elkvalitetsmätning och aktiva kunder. Modellen bygger på en energihub, (treports växelriktare) som självständigt och automatiskt kan styra energiflöden mellan solceller, energilager och elnät så att nyttorna för elkunderna och energibolagen ökar. Energihuben styrs av information om exempelvis aktuellt elpris, väder, status på energilagret, lokal förbrukning m.m. Det lokala energilagret är placerat i direkt anslutning till elabonnentens anläggning.



Fig. 3 – Energihuben styr energiflödet mellan solceller, energilager, lokal förbrukning och elnät.  
Källa: Sammanfattning av projektet om energilagring hos FEAB

Ett exempel som visar på möjligheten med ett lokalt energilager är vid timmätning av el, där elpriset i framtiden varierar betydligt över dygnet. Energihuben laddar automatiskt energilagret när priset är som lägst, sedan kan energin användas när som helst över dygnet. En annan fördel med ett lokalt energilager kan finnas hos de elkunder som har effekttariffer. Dessa tariffer bygger på att elkunden betalar en avgift som beror på det högsta effektuttaget mätt under någon timme varje månad. Eftersom detta ofta handlar om korta toppar så kan dessa minskas med ett förhållandevis litet energilager.

Energihuben ger också möjlighet till strömutjämnning mellan fasledarna så att utrymmet mellan huvudsäkringarna och lasterna ökas. Detta extra utrymme kan användas antingen för att minska huvudsäkringarna och därmed nätavgiften eller att öka belastningen, t.ex. för elbilsladdning. Detta bidrar även till att minska distributionsförlusterna i elnätet.

## **Forskning om energilagring**

Energilagring har varit ett område inom statliga energiforskningsprogram internationellt och i Sverige sedan oljekriserna på 1970-talet. Under 1970- och 1980-talen bedrevs i Sverige flera forskningsprojekt om storskalig säsongslagring av värmeenergi i grundvattenformationer, (akviferer), samt i berggrum, (tidigare oljelagringsutrymmen), bland annat som ett sätt att ge nya förutsättningar för kraftvärmeförbrukning. Vidare byggdes något hundratal hetvattenackumulatörer för dygnsutjämnning i fjärrvärmeverk och studerades värmelagring i salter (fasändringssystem).

### **IEA**

International Energy Agency, IEA, startade redan i slutet av 1970-talet ett forskningssamarbete, (Implementing Agreement), kring värmelagring. Sverige kom in redan från början, medverkar fortfarande i detta samarbete och har haft ledande roller. Ett antal delprojekt (annex) har bedrivits inom detta forskningssamarbete.

I slutet av 1990-talet utvidgades detta IEA-samarbete med ett annex om energilagringsteknik i elsystem. Annexet innehöll både översikter över olika lagringstekniker och inventeringar av vilka problem dessa tekniker skulle kunna lösa i systemen för produktion, transmission, distribution. Elforsk och senare Energimyndigheten deltog i två etapper av detta projekt 1996-2000 som slutade med kunskapssammanställningar och förslag till demonstrationsprojekt<sup>6</sup>. De senare fördes dock aldrig vidare inom IEA. IEA har haft energilagring som en del av andra forskningssamarbeten, såsom högttemperatursupraledning<sup>7</sup>, väte och bränsleceller och på senare år i samarbeten om elnät (ENARD) och om smarta nät ISGAN. Det finns en ganska omfattande rapportering om IEA-projekten på Elforsks webbplats.

### **USA**

US Department of Energy, DOE, har sedan länge ett forskningsprogram om energilagring och som i stor utsträckning bedrivs vid dess nationella laboratorier särskilt Argonne, Lawrence Berkeley, Pacific Northwest och Sandia. Under 2012 bildade DOE en ny organisation med Argonne som nav för att påskynda utvecklingen av energilagring, Joint Centre for Energy Storage Research, JCESR. I DOE:s program ingår ett antal demonstrationsprojekt om energilagring som har startat och blir successivt operativa under 2012 och 2013, ett projekt om tryckluftlagring, CAES, dock först 2016. Demonstrationsprogrammet har följande delar:

- Batterilager för dygnsreglering av vindfarmer, (flera batteriprojekt)
- Frekvensreglering, (ett projekt, svänghjul, 20 MW 5 MWh)
- Distribuerad energilagring för stöd till nät, (olika batterityper, Li-jon, Vanadin Redox, ZinkBromid, avancerade blybatterier m fl)
- Tryckluftslager, Compressed Air Energy Storage CAES (ett projekt, 300 MWh)

---

<sup>6</sup>Elforsk ägnade en del arbete åt energilagring och ellagring redan i sina visions- och framtidsstudier från mitten av 1990-talet

<sup>7</sup>Elforsk var fram t.o.m. år 2010 engagerat i IEA samarbetsprojekt om högttemperatursupraledning

- Demonstrationer av lovande nya energilagringstekniker, (nya tillämpningar av befintliga grundtekniker, batterier, svänghjul CAES)

En del av bakgrunden till programmet är att trots ett stort behov finns det fortfarande endast ett fåtal ellagringssystem integrerade i amerikanska elnät.

### ***Sverige***

Forskning pågår om flera energilagringstekniker vid svenska universitet och högskolor. ABB har utvecklat några lagringssystem. Energimyndigheten startar våren 2013 ett forskningsprogram om bättre batterier.

Den svenska noden av KIC<sup>8</sup> InnoEnergy är ett samarbete mellan KTH, Uppsala Universitet, ABB och Vattenfall. Det är inriktat mot smarta nät och har som ett uttalat syfte att åstadkomma ett genombrott inom energilagring. Associerade partners och nätpartners är för närvarande Elforsk, Ericsson, Fortum, Logica, Nova Höskolecentrum, Power Circle, Seabased, Science partner, Sting, STRI och Svenska Kraftnät samt Technion.

### ***Elforsk***

Utöver medverkan i IEA projektet 1996-2000 har Elforsk drivit några projekt inom energilagring. Elforsk genomförde 2007-2008 en inventering av framtidens el- och värmeproduktions-tekniker däribland en studie av energilagring. Projektet resulterade i teknik och problemöversikter och förslag lämnades till en svensk forskningsstrategi för området. Projektet inom ramen för Elforsks Smart Grid program har redovisats ovan.

### ***Kommentarer***

Huvuddelen av pågående forskning i världen är teknisk/vetenskapligt inriktad, men det finns också inslag av systemforskning och forskning om market design för elsystem med ellagring inom EU och Sverige, däribland inom Elforsk<sup>9</sup>. På senare år har kopplingarna ökat mellan forskning om ellagring resp. smarta nät.

## **Översiktsrapporter mm**

### ***EPRI***

Amerikanska EPRI. Electric Power Research Institute publicerade i december 2010 en stor översiktsrapport om både ellagringstekniker och deras roll i elsystem:” Electricity Energy Storage Technology Options A White Paper Primer on Applications, Costs, and Benefits Technical Update. Rapporten är ett aktuellt och bra uppslagsverk.

### ***EU***

EU kom i början av 2013 ut med ett Working Paper The future role and challenges of Energy Storage. DG Ener Working Paper. Rapporten behandlar följande frågor och ger en god lägesbeskrivning och aktuella tekniska data men innehåller inget principiellt nytt utöver vad vi redovisat i denna rapport.

EU kom 2012 ut med rapporten Electricity Storage: How to Facilitate its Deployment and Operation in the EU Final report June 2012. Där diskuteras utförligt energilagringens plats i elsystem, särskilt om dessa förändras i riktning mot större andelar av distribuerad produktion,

<sup>8</sup> KIC är en Knowledge and Innovation Community under European Institute of Innovation and Technology, EIT

<sup>9</sup> Elmarknadsreformen - behöver den reformeras? Elforsk rapport 12:32. Björn Hagman och Håkan Heden,

som exempelvis flera av elsystemen i EU Energy roadmap 2050. Rapporten diskuterar vidare konkurrens med alternativa tekniska lösningar, kopplingarna till smarta nät och tar upp frågor om Market Design i samband med ellagring. Rapporten talar om den ”gamla världen” med centrala elproduktionssystem och den nya med större inslag av decentraliserad produktion, smarta nät och smarta apparater samt ”demand side management”

### ***Eurelectric***

Eurelectrics rapport: Decentralised storage: impact on future distribution grids kom i juni 2012. Även den rapporten utgår från scenarierna i EU:s Energy Roadmap 2050 med en kraftig ökning av variabel förnybar elproduktion till 2050. Detta kommer att leda till utmaningar i att hålla stabiliteten i eltilförseln. Då kan ellagringsteknik bidra, vilket vattenkraft och pumpkraft redan gör.

Förnybar energi som matas in i låg- och mellanspänningsnät kommer att fordra ytterligare småskaliga nätanslutna lagringsresurser som kan stödja distribuerad elproduktion och möjliggöra nya tjänster såsom energy management och systemtjänster. Decentraliserad energilagring är inte ett naturligt monopol. Dock är nätanslutna ellager sällan ekonomiskt konkurrenskraftiga idag. Men tekniken har ändå hög ekonomisk potential på lång sikt. Regelsystemet för ellagring i nät är inte så utvecklat vilket skapar osäkerheter.

I förhållande till smarta nät är en egenskap hos energilagringsteknik att den kan användas för att skjuta upp investeringar i kapacitetshöjningar, genom att minska toppbelastningar och undvika konflikter om nätutbyggnader.

Ellagring via system med vätgas och bränsleceller ger kopplingar till det europeiska gasnätet. Ett sätt för långtidslagring av stora kvantiteter förnybar el är att använda naturgasnätet för att lagra elektrolytiskt framställd vätgas vid elöverskott, (Power-to-Gas, P2G). Processen kan utvidgas med att först framställa syntetiskt metan ur väte och CO<sub>2</sub>. Denna ”förnybara gas” kan lagras och transporteras i naturgasnätet. Alternativt kan den förbrännas i gaskraftverk.

### ***IEA***

IEA är i färd med att ta fram en Energy Storage Technology Roadmap och har haft seminarier i januari och februari 2013.

### ***Elforsk***

Elforsk medverkade i två etapper under åren 1996-2000 i ett IEA-projekt om energilagring i elsystem<sup>10</sup>. Elforsk genomförde 2007-2008 en inventering av framtidens el- och värmeproduktionstekniker däribland en studie av energilagring: Inventering av framtidens el- och värmeproduktionstekniker. Delrapport Energilagring. Elforsk rapport 08:83. Rapporten lämnar förslag till en svensk forskningsstrategi för området. Den innehåller en omfattande bibliografi och en kommenterad litteraturgenomgång.

### ***Vattenfall***

Vattenfall testar f. n. två batterianläggningar på 2 resp. 1 MW i Berlin.

---

<sup>10</sup> Elforsk rapport 00:5 IEA Ellagring. Rapport från ett internationellt samarbete. Elforskrapport 00:6 IEA Ellagring. Rapport från ett internationellt samarbete. Elforskrapport 00:8 IEA Ellagring. Rapport från ett internationellt samarbete .