

# **LÖSNINGAR**

---

# **PÅ LAGER**

---

**Energilagringstekniken och  
framtidens hållbara energiförsörjning**



**Titel:** Lösningar på lager - *Energilagringstekniken och framtidens hållbara energiförsörjning*

**Författare:** Örjan Larsson & Benjamin Ståhl - Blue Institute

**Serie:** VINNOVA Analys VA 2012:02

**ISBN:** 978-91-86517-62-5

**ISSN:** 1651-355X

**Utgiven:** Mars 2012

**Utgivare:** VINNOVA –Verket för Innovationssystem / *Swedish Governmental Agency for Innovation System*

**VINNOVA Diariernr:** 2009-02796

---

## **VINNOVA utvecklar Sveriges innovationskraft för hållbar tillväxt**

VINNOVA är Sveriges innovationsmyndighet och ska öka konkurrenskraften hos forskare och företag i Sverige.

Vår uppgift är att främja hållbar tillväxt i Sverige genom finansiering av behovsmotiverad forskning och utveckling av effektiva innovationssystem. För att göra detta har vi cirka 2 miljarder kronor att investera i nya och pågående projekt varje år.

En viktig del av VINNOVAs verksamhet är att öka samarbetet mellan företag, högskolor och universitet, forskningsinstitut och andra organisationer i innovationssystemet. Vi gör det på flera sätt, bland annat genom långsiktiga investeringar i starka forsknings- och innovationsmiljöer, genom att investera i projekt som ska öka kommersialiseringen av forskningsresultat eller genom att skapa katalyserande mötesplatser.

VINNOVA är ett statligt verk under Näringsdepartementet och nationell kontaktmyndighet för EU:s ramprogram för forskning och utveckling. Sammanlagt arbetar drygt 200 personer på VINNOVAs kontor i Stockholm och Bryssel. Generaldirektör är Charlotte Brogren. VINNOVA bildades 1 januari 2001.

I serien VINNOVA Analys publiceras studier, analyser, utredningar och utvärderingar som tagits fram inom eller på uppdrag av VINNOVAs avdelning för Verksamhetsutveckling.

---

I VINNOVAs publikationsserier redovisar bland andra forskare, utredare och analytiker sina projekt. Publiceringen innebär inte att VINNOVA tar ställning till framförda åsikter, slutsatser och resultat. VINNOVAs publikationer finns att beställa, läsa och ladda ner via [www.VINNOVA.se](http://www.VINNOVA.se). Tryckta utgåvor av VINNOVA Analys och VINNOVA Rapport säljs via Fritzes, [www.fritzes.se](http://www.fritzes.se), tel 08-598 191 90, fax 08-598 191 91 eller [order.fritzes@nj.se](mailto:order.fritzes@nj.se)

*VINNOVA's publications are published at [www.VINNOVA.se](http://www.VINNOVA.se)*

# **Lösningar på lager**

**Energilagringstekniken och  
framtidens hållbara energiförsörjning**

Projektet drivs av Blue Institute, en tankesmedja grundad av Mercuri Urval, med fokus på strategi- och tillväxtfrågor. Mercuri Urval är ett svenskt konsultföretag som arbetar för att stärka sina kunders konkurrenskraft genom att identifiera, utveckla och tillföra rätt kompetens och förmåga som gör det möjligt att bygga upp organisatorisk och strategisk styrka. Analysarbetet och rapporterna inom ramen för *Framtida tillväxtmöjligheter för Sverige* är en del av den verksamhet som Blue Institute bedriver för att skapa och sprida kunskap om marknadsutveckling och de strategiska utmaningar som näringslivet står inför. Genom att arbeta utifrån ett industriellt nätverk, med en industriell tidshorisont och i nära samarbete med de företag som är involverade i tillväxtområdena har den kunskapen kontinuerligt validerats och spridits. Projektet drivs med bidrag från VINNOVA.

VINNOVAs framsynsverksamhet fokuserar på framväxande globala tillväxtområden och förutsättningarna för att med offentliga satsningar på forskning, utveckling och innovation bidra till hållbar tillväxt i Sverige inom ramen för dessa. Framsynsverksamheten syftar dessutom till att identifiera andra typer av policyinsatser än investeringar i forskning, utveckling och innovation som är viktiga för att möjliggöra ekonomisk tillväxt och jobbtillväxt inom framväxande tillväxtområden. Därmed bör den kunna utgöra ett viktigt underlag för svensk närings- och tillväxtpolitik.

# Förord

Sverige är ett exportberoende land som framgångsrikt skapat tillväxt, arbete och välstånd genom att företag utvecklat lösningar som varit internationellt konkurrenskraftiga. Men innovationer och nya marknader måste ständigt skapas, och det sker i en allt hårdare global konkurrens. *Framtida Tillväxtmöjligheter för Sverige* syftar till att identifiera framväxande globala tillväxtområden och att beskriva svenska företags förutsättningar, roll och ambitioner. Programmet har nu pågått i fyra år och har identifierat ett sjuttioital tillväxtområden. Alla har genomgått ett förstudiearbete och ett antal av dem har fördjupats och avrapporterats i studier som denna.

*Lösningar på lager* är en av två rapporter från Blue Institute som handlar om energilagring. Den här rapporten fokuserar på energilagring för elnät. Den andra rapporten, *Utan nät*, behandlar bärbar och mobil energilagring, särskilt batterimarknadens utvecklingsmöjligheter och framtida tillväxt. Rapporterna tar fasta på den starka utvecklingen som pågår i världen där el används för allt fler tillämpningar samtidigt som komplexiteten i elsystemet ökar.

Ett allt mer decentraliserat elnät, med en ökande andel intermittenta förnybara energikällor, kombinerat med begränsningar i det befintliga kraftnätet ställer höga krav på nya energilagringstekniker. Förmågan att kunna lagra energi kommer därför att vara kritisk i de elnät som nu växer fram i världen. I rapporten analyseras drivkrafter och motkrafter för marknaden för energilagring, aktörer som kan positionera sig, de tekniska möjligheterna och statusen på forskning och utveckling.

En viktig slutsats är att det finns utrymme för många lösningar och att olika tekniker måste anpassas till de existerande kraftsystemen. För att vara framgångsrik inom energilagring för elnät krävs därför inte bara produkter utan framförallt ett djupt kunnande om att integrera olika tekniska lösningar i existerande kraftsystem. I Sverige finns den förmågan, både i företag och på universiteten. Kombinationen av kunskap om olika produkter och tekniker, systemintegrationskompetens och konsultativ teknisk kompetens gör att flera svenska företag ser stora möjligheter med den framväxande energilagringmarknaden.

Vår förhoppning är att den här rapporten bidrar till strategiprocesser i företag och hos myndigheter. Studien har utförts av Blue Institute i nära samarbete med

företag som är aktiva i området. Vi vill tacka alla som medverkat, lämnat information och delgivit sin analys av området. Öppenheten och osäkerheten i marknaden innebär dock att rapporten inte gör anspråk på att vara en fullständig beskrivning. Det är en analys som beskriver och kommenterar utvecklingen, och syftar till att skapa debatt och underlätta diskussion.

Stockholm i mars 2012

*Göran Liljegren*  
VD  
Blue Institute

*Göran Marklund*  
Ställföreträdande GD externa frågor  
VINNOVA

# Innehåll

<b>Executive Summary</b> .....	7
Energy storage in the grid – market expands as needs grow .....	7
Energy storage applications and technologies – room for many solutions .....	8
The roles and opportunities for Sweden .....	9
<b>Inledning</b> .....	11
<b>Energilagring för elnät: behovet ökar och marknaden kommer att växa</b> .....	13
<b>Tillämpningar inom energilagring för elnät</b> .....	19
<b>Teknik för energilagring i elnäten</b> .....	23
Pumpkraftverk .....	25
Tryckluft (CAES) .....	27
Batterier .....	29
Bränsleceller .....	36
Superkondensatorer .....	37
Supraledande lager (SMES) .....	37
Svänghjul .....	38
Sammanfattning: teknik och tillämpningar inom energilagring för elnät .....	39
<b>Möjligheter för svensk industri</b> .....	40
<b>Slutsatser</b> .....	42
<b>Referenser</b> .....	44
<b>Appendix: Olika energilagars effektivitet</b> .....	46





## Executive Summary

The capability to store energy will be crucial in the future energy landscape. An increasing demand for electricity, grids operating at their limits and an increasing share of intermittent renewable power sources in the energy mix are trends that necessitate energy storage. Technology and products are being developed to meet those needs. This report by Blue Institute outlines the emerging market opportunities for energy storage solutions.

### **Energy storage in the grid – market expands as needs grow**

The need for energy storage solution is driven by an increasing demand for electricity, and especially for clean electricity. The rapid increase of intermittent renewable power sources such as wind and solar is primarily motivated by the challenges of climate change, energy independence and growing capacity requirements. Since intermittent power sources cannot be fully predicted, the stability of the grid requires either reserve capacity in the form of additional power stations, grid extension, energy storage and/or demand side management. Probably a mix of strategies will co-exist.

However, energy storage solutions do have some advantages. They can be used in situations of excess production as well as excess demand, i.e. they can be used continuously, unlike additional power plants that are only needed at times of peak demand. Moreover, they do not confer energy dependence on fuel exporters, as gas- or oil-powered power stations may do. Finally, they do not add to the overall strain on the grid. However, these advantages must be balanced against the cost of alternative investments in order for a positive business case to exist.

To date, such a business case has proved elusive. Only approximately 120 GW of installed energy storage capacity exists in the world today – compared to an installed base of perhaps 600 GW of island/off-grid diesel generators. Virtually the entire installed energy storage base consists of pumped hydro, with a few compressed air energy storage (CAES) installations and scattered small battery installations. But as intermittent renewable power sources are being installed, this landscape is poised to change.

There are many uncertainties regarding the pace and scope of the market growth, which means that estimates of the future market for energy storage solutions vary widely. Today's market of approximately one billion USD can be expected to grow to between 5 and 10 billion USD by 2015 and to between 10 and 20 billion USD by 2020. Some estimates are even more optimistic, though we believe that a market size at the conservative end of the spectrum is most probable.

The bulk of a cumulative investment that will total as much as 330 GW in additional capacity by 2030 will be in pumped hydro and CAES. However, in terms of market value the investments will be more evenly spread to include batteries. Due to the varying specific needs that energy storage solutions can be used for, this is not a winner-takes-all market but rather one where many solutions will coexist.

## **Energy storage applications and technologies – room for many solutions**

Energy storage applications manage variations in the production and consumption of electricity and thereby secure its quality and/or availability. By being able of addressing several applications simultaneously, some technologies have a clear advantage over others. However, the multifarious requirements of the emerging energy landscape provide room for the coexistence of many solutions.

In terms of capacity the largest needs are in applications for renewable time shift and energy balancing. More immediate market growth is to be found in applications targeting quality and availability as ancillary services to the grid (e.g. black start services, frequency stabilization, spinning reserve and voltage control). Island storage, especially in situations coupled with renewable power sources, is in many circumstances attractive compared to diesel generators.

The report outlines the major technologies for energy storage applications: pumped hydro, compressed air (CAES), batteries, flywheels, superconductors, superconducting magnetic energy storage (SMES) and fuel cells. The technologies are competing in some applications but are complementary in others (or simply unsuitable to use). Technology choice is also heavily dependent on grid specific factors and in some cases geography (for pumped hydro and CAES).

Technology vendors are naturally gearing up for this market. However, their success depends not only on their product but also on how they can be integrated in a larger system. Energy storage is and will remain a need that utilities will face by integrating products and solutions in their existing grid configurations, and solution providers will want to be able to offer a range of alternatives. Energy storage for the grid is very much a question of managing complex systems.

As such, there are no energy storage technologies, products or services that will radically shift the industrial structures in the foreseeable future. Business models that turn capital expenditures into operative ones through functional or “per kWh” contracts could make an impact, but require considerable capital investments. The more probable scenario is that solution providers that integrate technology into their offerings – and technology vendors able to provide the requisite standards – will stand to gain as the need for energy storage applications increases.

## **The roles and opportunities for Sweden**

The power industry is important in Sweden, employing 130 000 people with exports in excess of 60 billion SEK. Although there are few technology vendors of energy storage products in Sweden, there is considerable experience and strong international positions when it comes to offering and delivering energy storage solutions. Some smaller companies do exist in some areas, especially in niche battery applications and assembly/product integration. Also, there is considerable knowledge in terms of research centers, notably the Advanced Battery and Fuel Cell Centre in Uppsala.

We believe that the growth of the energy storage market will provide opportunities for Swedish product companies, power consultants and system integrators. Companies that already have strong positions in delivering competitive and reliable power and grid installations can pursue immediate commercial opportunities.



## Inledning

*Vi befinner oss i början av ett systemskifte som tillhör industrihistoriens allra viktigaste, där de sinande, miljöpåverkande bränslena ska ersättas och där elektriciteten kommer att spela en huvudroll. I det framväxande nya energilandskapet är möjligheten att lagra energi en viktig förutsättning. Behovet av energilager drivs av allmänt ökad elektrifiering och av allt större andel av energin kommer ifrån förnybara kraftkällor som är intermittenta.<sup>1</sup> Energilagring innebär dock inte en applikation utan många olika som bärs upp av skilda fysikaliska och kemiska principer, levererade i olika tekniska förpackningar anpassade till systemlösningar för skilda behov.*

Den här rapporten är en av två från Blue Institute som handlar om lagring av energi.<sup>2</sup> Den här studien beskriver varför energilagringsteknik är en avgörande faktor för en framtida hållbar energiförsörjning. Fokus ligger på att förstå marknaderna och de marknadsmekanismer som tekniken, tjänsterna och investeringskapitalet föranleder. Omställningen av energisystemet innebär också en omställning av de ingående värdesystemen. Den över hundra år gamla affärsmodellen i kraftindustrin som byggt på en ständigt växande storskalighet och sjunkande elpriser i ett enkelt, centraliserat envägs-flöde kommer att tvingas anpassas till den ökande komplexiteten.

Energilager för elsystemet eller elnäten brukar kallas för EES - Electric Energy Storage. Även begreppet ESG - Energy Storage Grid och RESS - Rechargeble Energy Storage System används. I rapporten kommer vi företrädesvis att använda benämningen EES. Definitionen är att ett EES lagrar energi som redan har genererats som elektricitet och kontrollerat kan frigöra den igen vid en annan tidpunkt.<sup>3</sup> Det innebär att andra media som per definition kan vara lagrad energi - biomassa, olja och kol till exempel - inte omfattas av definitionen.

Behoven av att lagra energi sträcker sig i praktiken från mycket små mängder - mikroformat och mikrowattimmar - till storskalighet och gigawattimmar. Det gäller i synnerhet elsystemet. De små behoven finns i datorerna, systemelektroniken, som styr näten och produktionen. De stora finns i själva huvudprocessen för energiförsörjning. När energilagren utvecklas kan tekniska plattformar i viss mån delas mellan smått och stort. Ett exempel är batteriteknik där samma kemiska principer kan användas i en styrdator som för att öka kvalitén på strömmen i högspänningsnätet. Men oftast visar det sig att

---

<sup>1</sup> D v s de är oregelbundna i sin elkraftsproduktion

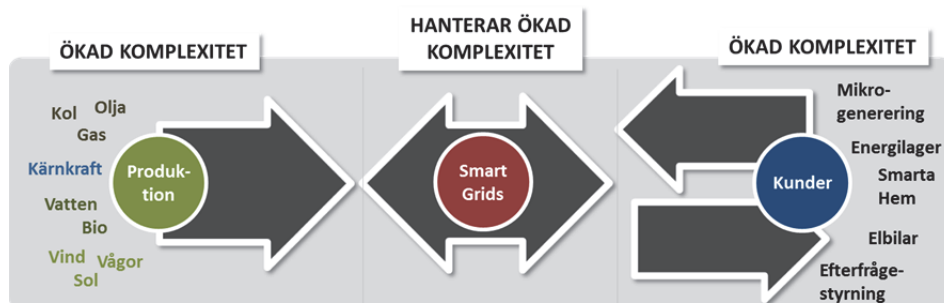
<sup>2</sup> Den andra rapporten (*Utan nät – batterimarknadens utvecklingsmöjligheter och framtida tillväxt*) fokuserar på mindre energilagringssapplikationer. Fokus är företrädesvis på batterier för bärbara och mobila applikationer för konsumentelektronik och fordon.

<sup>3</sup> Definition enligt EPRI, 2010.

de specifika kraven som ställs på energilager i elnätsskala skiljer sig åt. Då krävs det en öppenhet för nya teknikdimensioner och kombinationer för att uppfylla kraven till rimliga kostnader. Ett av budskapen med denna studie är att energilagring i elinfrastrukturen är en fråga om att hantera komplexa system.

## Energilagring för elnät: behovet ökar och marknaden kommer att växa

Energiförsörjningen i världen håller på att förändras. Drivkrafterna är flera. Först och främst ökar kraven på **hållbarhet** i energiförsörjningen - till stor del sker det genom att öka andelen intermittenta förnybara kraftkällor. Minskad **sårbarhet** i energiförsörjningen eftersträvas genom att ersätta bränsleimport med förnybar energiproduktion och genom robusta infrastrukturer som kan hantera ökad komplexitet på både utbuds- och efterfrågesidan. Ytterligare en viktig drivkraft är att det totala elbehovet **växer** med utvecklingsmarknadernas snabba välståndökning. Sammantaget innebär det att både politisk och ekonomisk fokus riktas mot en omställning där förnybara kraftkällor, energieffektivisering och smarta elnät utgör grundstenarna.



Figur 1 Det moderna elektriska försörjningssystemet hanterar ökad komplexitet i både utbuds- och efterfrågeändan. Konceptet kallas Smart Grid eller smarta elnät. Källa: Blue Institute

Ett karaktärsdrag för många av de förnybara alternativen är att produktionen per enhet är relativt liten. Det måste kompenseras genom större antal kraftproduktionsenheter som ofta distribueras över stora geografiska områden. Dessutom är de i regel beroende av väderleken eller tiden på dygnet. Resultatet av allt detta blir **en mer oförutsägbare elförsörjning**. Men då el produceras och förbrukas i samma ögonblick kräver nätets stabilitet att en konstant balans upprätthålls. Traditionella kraftkällor som kärnkraft och vattenkraft kan relativt enkelt *prognosticera* sin produktion och fossildrivna kraftverk kan enkelt *anpassa* sin elproduktion. Men om det inte blåser står vindkraftverk stilla och på natten kan inte solceller producera el.

**Förnybar elproduktion** omfattar kraftslagen: vattenkraft, biokraft, vindkraft, solkraft och vågkraft  
**Förnybar intermittent elproduktion** omfattar kraftslagen: vindkraft, solkraft och vågkraft

Fluktuationer och osäkerhet i väderförhållanden är inget problem när inslaget av intermittenta energikällor är förhållandevis litet, men när de ökar i andel blir det snabbt kritiskt att hantera dem. Idag finns det redan länder och regioner som har så stora inslag av intermittenta energikällor att det utgör reella utmaningar och investeringarna i förnybara energikällor fortsätter att växa kraftigt. Både vindkraft och solceller nådde nya rekordnivåer 2010 - totalt var den installerade effekten i världen ca 240 GW vid början av 2011.<sup>4</sup> Till 2020 och 2030 finns det flera länder som har ambitioner att vindkraftens andel av elproduktion ska vara över 10 procent, däribland USA. I Danmark är den redan 15-20 procent, likaså i Portugal och Spanien, i Tyskland är den ca 10 procent - i vissa regioner över 50 procent.<sup>5</sup> Därför är behovet att kunna hantera de intermittenta variationerna redan en realitet.

Ytterst består utmaningen i att det måste finnas tillräckligt med reservkapacitet för att hålla balansen i kraftsystemet. Det brukar kallas för **reglerkapacitet**. Vattenkraften utgör en förnämlig sådan resurs där den finns. Lägesenergin som lagras i form av vatten i kraftverkens reservoarer kan med kort varsel omsättas till elektricitet på nätet. I Norden är vi begåvade med stora mängder vattenkraft som har ett värde utöver den rena energiproduktionen eftersom efterfrågan på balanskraft växer i Europa. Kärnkraft är mindre lämpligt ur den här aspekten - det tar för lång tid att styra upp och ner produktionen inom önskvärda temperaturspann. Inte heller elproduktionen från kraftvärmelanläggningar lämpar sig ekonomiskt. Konventionella snabbstartande reservkraftverk med gasturbiner som kan kompensera för låg produktion är ett vanligt - men ur klimatsynpunkt ofta mindre lämpligt<sup>6</sup> - sätt att upprätthålla nätbalansen.

Utmaningen kan även brytas ned till geografiskt begränsade områden - **Micro Grids**. Då är det möjligt att använda lokala energilagring såsom stora batterier för att balansera tillgången mot efterfrågan. Ytterligare ett sätt att möta utmaningen är att koppla samman nät - **Grid Extension** - vilket bygger på sannolikheten att väderleken inte är densamma överallt samt på att ojämnheter i förbrukningen genom sammanlagring kan jämnas ut. En sådan utbyggnad pågår för fullt mellan länder och regioner i världen. Till sist återstår åtgärder på förbrukarsidan - **Demand Side Management** - som minskar efterfrågan på el vid bristsituationer. Förbättrade statistiska metoder, prognoser och erfarenheter av de nya kraftslagen kommer med all sannolikhet också att göra att driften av näten kan ske med större precision.

Alla dessa metoder har för- och nackdelar och troligtvis kommer vi att få se en blandning av åtgärder för att hantera nätbalansen. Men energilagring har några fördelar. Det ökar inte (till skillnad från konventionell reservkraft) beroendet av fossila bränslen eller

<sup>4</sup> REN21, 2011, Global Status Report on Renewable Energy

<sup>5</sup> Global Wind Energy Council, 2010, Global Wind Report; European Wind Energy Association, 2011, Pure Power

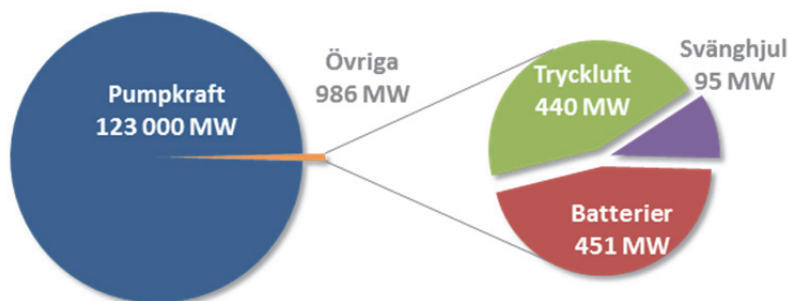
<sup>6</sup> De flesta gasturbiner eldas med olja eller naturgas. Försök med kol har också gjorts och även biogas förekommer.



beroendet av de som säljer dem. Energilagring kan också hantera reglering både uppåt och nedåt, d.v.s. inte bara tillföra utan även lagra energi när produktionen överstiger förbrukningen. Det innebär också att energilager till skillnad från konventionell reservkapacitet kan användas konstant. Energilagring ger också en mindre total nätansträngning än andra alternativ (bortsett från åtgärder på förbrukarsidan).

Utöver att synkronisera energiproduktionen med efterfrågan hjälper energilagren också till att ge nätet stadga så att leveransen i vägguttaget har rätt frekvens (50 Hz) och rätt spänning (till exempel 230 V). **Elkvalitet** blir allt viktigare i högt belastade, mer distribuerade och föråldrade nät och eftersom det skyddar de allt känsligare apparater vi ansluter till nätet.

Idag är marknaden för energilagring i elsystemen relativt begränsad. Det är få tillämpningar och tekniker som ännu nått ett större kommersiellt genomslag, trots att de flesta av dem utvecklades så tidigt som på 1970-talet. Hit hör pumpkraftverk, tryckluft (CAES), supraledande lager (SMES), termiska lager och vissa batterityper (de olika teknologierna beskrivs mer ingående senare i rapporten). Installationerna skedde som en konsekvens av oljekrisen och för att komplettera kärnkraften - framförallt för att minska sårbarheten.



Figur 2 Existerande energilager för elnät i världen år 2011. Källa: US Dept. of Energy, 2011

För de nya kraven på energisystemen som uppstår är eloperatörernas driftserfarenheter i regel begränsade till det som kommit fram i tester och pilotinstallationer. Konsekvensen blir att det råder en avvaktande inställning - tekniken är oprövad, effekterna i olika tillämpningar osäkra, kostnaden hög, och intäktsmodellerna oprövade. För många tekniker är verkningsgraden dessutom förhållandevis låg.

Mot detta står det verkliga och växande behovet. Hur stort behovet är för ett enskilt land beror på hur stora fluktuationerna i kraftproduktionen kan väntas bli, mixen mellan vind och solceller, var dessa installeras geografiskt och flera andra faktorer. Enligt konsultbolaget **Boston Consulting Group** kommer behovet av energilager i elnäten år 2025 vara 100 GW för Europa (motsvarande 150 TWh eller 5 procent av elbehovet) och 170

GW i USA.<sup>7</sup> Den amerikanska energimyndigheten bedömer att för varje gigawatt av vindelsproduktion behövs 17 megawatt i ”spinning reserv”, d.v.s. reservkapacitet som kan kopplas in omedelbart vid behov.<sup>8</sup> För Sverige har **Svenska Kraftnät** beräknat det utökade reglerbehovet till mellan 4,3 och 5,3 GW vid en utbyggnad av vindkraften motsvarande 30 TWh.<sup>9</sup>

Exakt hur snabb och stor utvecklingen blir råder det dock delade meningar om (se figur 3). Under 2008 bedömde till exempel forskningsinstitutet **Pike Research** att marknaden var värd 1,9 mdr USD men att den förväntas att växa till omkring 22 miljarder USD år 2021.<sup>10</sup> Ett annat analysföretag, **SBI**, menar att marknaden kommer att gå från dryga 3 mdr USD 2006, via 4,8 mdr 2010 till över 10 mdr USD 2015.<sup>11</sup> En tredje bedömning görs av **BCC Research** som menar att marknaden 2010 motsvarade 4 mdr USD och kommer att växa till 18,5 mdr 2015.<sup>12</sup> Undersökningsföretaget **Visiongain** bedömer att marknaden 2011 är 0,7 mdr USD som till 2021 har vuxit till runt 15 mdr USD.<sup>13</sup> Slutligen bedömer konsultbolaget **Boston Consulting Group** att marknaden år 2010 var ca 1 mdr EUR och kommer att växa till 4-6 mdr EUR år 2015 och till 10 mdr EUR år 2020. Den kumulativa investeringen till år 2030 bedöms bli ca 280 mdr EUR.<sup>14</sup>

Sammantaget visar de flesta bedömarna att det kommer att skapas mycket stora marknader för energilagring, även om den antagna takten och storleken skiljer sig åt. En annan tydlig signal avseende detta är att det under det senaste årtiondet skett en kraftig ökning av både riskkapital och statliga stödmedel till olika lösningar för energilagring.<sup>15</sup>

Storleken på marknaden i dagsläget bedöms till mellan 1 och 2 mdr USD per år. Den största delen avser tillämpningar för lagringskapacitet i elnäten men även olika stöd-jande tillämpningar som garanterar elkvalitet är en viktig del av marknaden. Därtill kommer tillämpningar för energilagring utanför elnätet, så kallad island storage (som i dagsläget framförallt tillgodoses av dieselgeneratorer). Den totala marknaden uppskattas omfatta mellan 10 och 25 mdr USD år 2020.

<sup>7</sup> Boston Consulting Group, 2010, Electricity Storage - Making large scale adoption of wind and solar energies a reality

<sup>8</sup> IFandP Research, 2010, Energy Storage: Changing the rules of the game

<sup>9</sup> Svenska Kraftnät, 2008m Storskalig utbyggnad av vindkraft. Konsekvenser för stamnätet och behovet av reglerkraft,

<sup>10</sup> Pike Research, 2010, Energy Storage on the grid

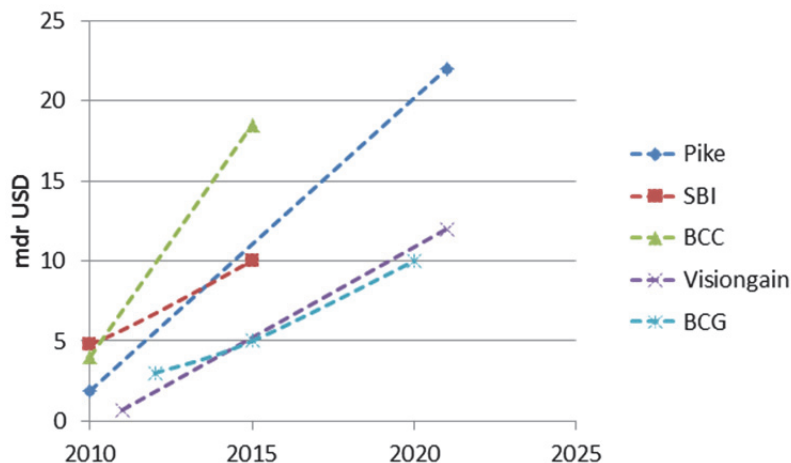
<sup>11</sup> SBI Energy Report, 2010

<sup>12</sup> BCC, 2011, Utility-scale Electricity Storage Technologies: Global Markets

<sup>13</sup> Visionagain, 2010, The Energy Storage Technologies (EST) Market 2011-2021

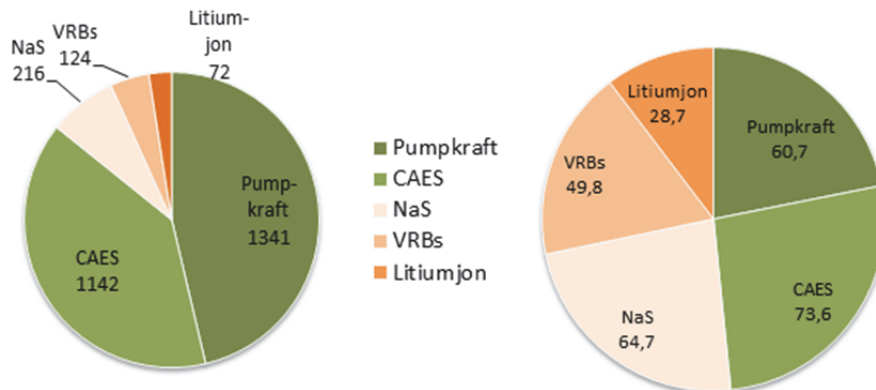
<sup>14</sup> Boston Consulting Group, 2010, Electricity Storage Making Large-Scale Adoption of Wind and Solar Energies a Reality,

<sup>15</sup> Lux Research, Lux Smart Grid and Grid Storage Intelligence, <http://www.luxresearchinc.com/industries/energy-and-utilities.html>



Figur 3 Att marknaden växer råder det inget tvivel om. Men det finns inte ett entydigt proportionellt samband som gör att storleken kan beräknas med stor säkerhet framåt. Källor: Pike Research, SBI, BCC, Visiongain, Boston Consulting Group

Enligt Boston Consulting Group, som ligger i det lägre estimatet, finns det ett ackumulerat behov om ytterligare 330 GW energilager till år 2030, vilket motsvarar en total investering på ca 280 mdr EUR. De menar också att det redan idag finns attraktiva ”business case” för vissa tillämpningar: balanskraft, elkvalitet/stabilisering, möjligheten att skjuta upp investeringar i elnätet (så kallad T&D deferall), lagring för applikationer utan tillgång till ett elnät (island-storage) samt återstartstjänster (tillämpningarna beskrivs mer ingående i nästa avsnitt). Den största tillämpningen kommer att vara balanskraften för de intermittenta kraftslagen på näten.



Figur 4 Marknadsprojektioner per teknik. Källa: Boston Consulting Group

Det är framförallt pumpkraftverk, tryckluft (CAES) och batterier av typen natriumsvavel, litiumjon samt flödesbatterier (teknikerna beskrivs mer ingående i följande avsnitt) som är aktuella för de här applikationerna. I termer av kapacitet beräknas pumpkraft stå för nästan hälften av den tillkommande kapaciteten och CAES något mindre. Batterier

kommer att stå för en mycket lägre andel av kapaciteten, runt 15 procent. I termer av värde kommer fördelningen att vara jämnare, med ca 22 procent av marknadspotentialen för pumpkraftverk, 27 procent för CAES, 23 procent för natriumsvavelbatterier, 18 procent för flödesbatterier samt 10 procent för litiumjonbatterier. Geografiskt är det främst USA, Europa och Kina som driver marknaden.<sup>16</sup>

Marknaden för energilagring - och dess potential - berör många aktörer och flera branscher. Framförallt är det energibolag som kommer att investera i energilager och även generera de förväntade intäkterna och besparingarna. De andra givna aktörerna är teknikleverantörer, som ibland levererar en produkt som ett batteri men i andra fall levererar system där till exempel en tryckluftsanläggning ingår. Dessutom innebär det mer än bara kärnteknik att investera i energilager. Kringutrustning som transformatorer, fränskiljare, kraftelektronik och platsinstallation tillkommer. De aktörer som levererar sådana produkter och tjänster - och inte minst de som tar helhetsåtaganden - är också viktiga aktörer. Eftersom mycket av energilagringens behov härrör från förnybara energikällor är det också troligt att sådana utrustningsleverantörer (av till exempel vindkraftverk) och anläggare också kommer att vara aktiva på marknaden.

Sammanfattningsvis består svårigheten i att bedöma marknaden främst i fyra osäkerheter som också präglar den framväxande marknadskaraktäristiken:

- 1 Att **behoven** är osäkra - både kvantitativt och kvalitativt.
- 2 Att det finns **alternativa lösningar** - t.ex. att bygga ut ledningsnäten eller produktionskapaciteten.
- 3 Att **tekniken ofta är oprövad** - och därmed är även bedömningen av kostnaderna osäkra.
- 4 Att **leverantörerna** ofta är små och beroende av riskkapital – marknaden är långt ifrån **konsoliderad**.

Den totala marknaden är ett uttryck för behoven men det kanske mest intressanta är hur marknaden fördelas på olika tillämpningar och tekniker. Behov, förutsättningar och lösningar kan mötas med hjälp av olika fysikaliska och kemiska principer som samtidigt måste anpassas till större systemlösningar. I nästa avsnitt beskrivs de tillämpningar som energilagring lämpar sig för och de tekniker som kan användas.

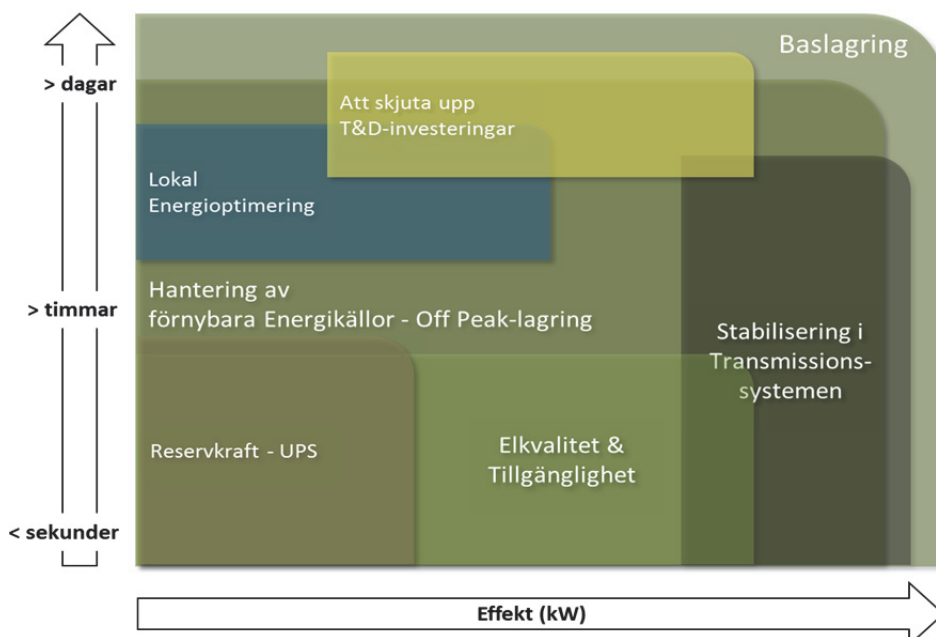
---

<sup>16</sup> Boston Consulting Group, 2011, Revisiting Electricity Storage – There is a business case

## Tillämpningar inom energilagring för elnät

Tillämpningar av energilagring för elsystemet handlar om att hantera variationer i produktionen och förbrukningen och/eller kvaliteten och tillgängligheten till elektricitet. Eftersom de tekniska och ekonomiska behoven kan vara så olika krävs olika tekniker för att uppfylla dessa. Under vissa förhållanden kan ett energilager - en specifik teknik - täcka flera behov och därmed användas för flera tillämpningar. Att täcka flera behov kommer att vara en nyckelfaktor för olika produkters framgång i området.

Tillämpningarna som efterfrågas har olika syfte. Vissa handlar om att säkerställa nätets driftsfunktion, som att upprätthålla spänning och frekvens (d.v.s. tillämpningar för **elkvalitet & tillgänglighet**) eller för att återstarta nätet efter ett strömavbrott (**black start services**). För att vara lämpliga behöver energilager här kunna ge ifrån sig mycket kraft snabbt, men inte nödvändigtvis under en lång tid.



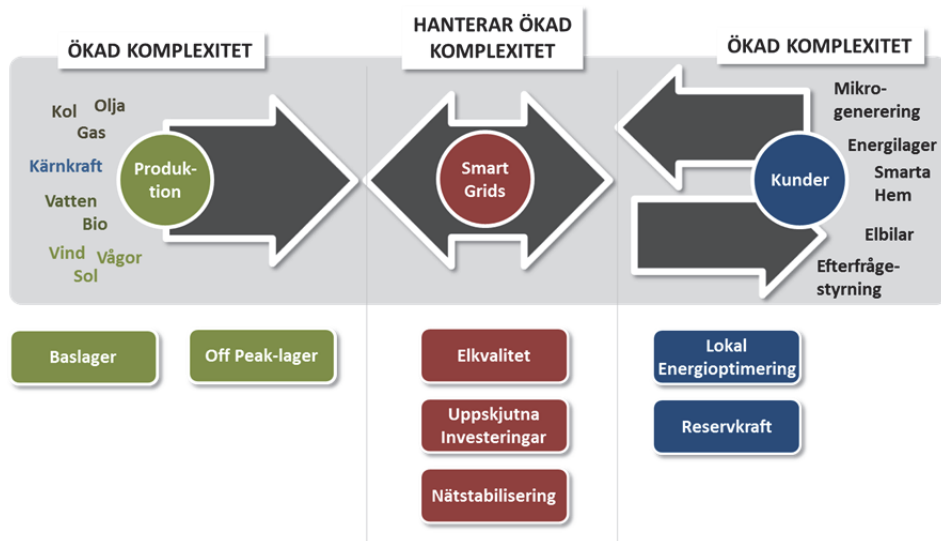
Figur 5 Behov och tillämpningar av energilager i relation till kapacitet och tid. Källa: Blue Institute

I andra fall är det viktigare med energilagringsskapacitet, till exempel i **off-peak lagring**. Det omfattar tillämpningar som med hjälp av energilager möter perioder av hög förbrukning för att minska kostnader - så kallad **time-shift**, **time of use** eller **peak shaving**, beroende på vem som använder energilagret. För enskilda industrier, samhällen eller kommersiella fastigheter kan off-peak-lagring tillämpas som **lokal energi-**

**optimering.** På ett liknande sätt finns det tillämpningar som handlar om att optimera framförallt intermittenta förnybara källors effektivitet, d.v.s. lagra överskott till tidpunkter då produktionen inte räcker till (**renewables energy time shift** eller **renewables capacity firming**).

Energilager kan också användas för att **skjuta upp investeringar i ett transmissions- eller distributionssystem** som ligger nära sin tekniska begränsning (**deferred T&D investment**) eller för att redan vid upprättande optimera nätinvesteringar. Slutligen finns det tillämpningar där energilager utgör reservkraft (**UPS, island power**), både för näringsverksamhet och för hushåll samt för situationer där ett elnät inte finns att tillgå, till exempel för avlägsna mobiltelefonmaster.

De största behoven finns för baslagring över längre tid samt för att hantera förnybara och intermittenta kraftkällor. Men även att garantera kvaliteten och tillgängligheten i ledningarna är ett redan existerande (och växande) behov.






Figur 6 Energilagens positioner i det elektriska värdesystemet. Källa: Blue Institute

Lagring av energi kan ske i centraliserade system i megawattimmostorlek eller decentraliserat i många mindre enheter fördelade på olika ställen över nätet. Energilager kan också användas i fastigheter och i industrin för att lagra energi lokalt för senare användning, från minuter till timmar. Lagringssystem som placeras ut nära transformatorstationer eller lokala fördelningssystem ska kunna förhindra överbelastningar och avbrott. Energilager i elnäten kommer i de flesta fall utgöras av fast installerad utrustning, men inget hindrar att de även kan utformas som mobila system. Det gör det möjligt att utnyttja dem under begränsad tid på en viss plats och sedan enkelt flytta dem till andra ställen och på så sätt matcha föränderliga behov både ekonomiskt och flexibelt.

Investeringskalkylen för olika typer av energilager är i hög grad beroende av teknik-kostnaden och potentiella intäkter av både effekt (d.v.s. kilowatt) och lagringskapacitet (d.v.s. kilowattimmar). Därtill måste man väga in hur snabbt energin kan levereras. Elnäten är till sin natur komplexa och behöver båda karaktärerna. Komplexiteten gör dels att en direkt jämförelse av teknikkostnader är svår och dels att det finns utrymme för många olika tekniker.

	Elkvalitet & systemstabilitet	Lokal energi-optimering	Time Shift	Skjuta upp T&D investeringar	Reservkraft/UPS
Pumpkraftverk	Red	Red	Green	Red	Red
CAES	Red	Red	Green	Red	Red
batterier	Bly/syra	Yellow	Green	Red	Green
	Litiumjon	Yellow	Green	Yellow	Green
	NaS	Yellow	Green	Yellow	Green
	Flödesbatteri	Yellow	Green	Yellow	Green
Bränsleceller	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Superkondensatorer	Green	Red	Red	Red	Red
SMES	Green	Red	Red	Red	Red
Flywheels	Green	Red	Red	Red	Red

 Tekniken är lämplig för tillämpningen
  För att använda tekniken krävs kompletterande tekniklösningar och/eller att kostnaderna sjunker
  Tekniken är mindre lämplig

Figur 7 Schematisk sammanställning av teknik och tillämpning. Källa: Blue Institute

Sammantaget innebär detta att tekniker och tillämpningar i vissa områden är överlappande. Eftersom de nästan uteslutande också måste vara anpassade till ett särskilt system kommer en avgörande framgångsfaktor vara att en teknik eller produkt är beprövad och passar väl in i systemleverantörers utbud.

Ett sätt att minimera osäkerheten för kunden är att erbjuda energilagring som en del i en systemleverans, eller till och med som en tjänst. I det senare fallet minimeras även kapitalkostnaden för kunden, som istället bärs av leverantören. Det innebär att gränsen mellan utrustningsleverantörer och leverantörer av tjänster bitvis suddas ut. Som ett initiativ för att övervinna tveksamheter som råder på marknaden och för att påvisa fördelarna med olika system kan det fungera.

Exempelvis har energibolaget **AEP** nyligen lanserat den första piloten för samhällsgemensam energilagring. Ett annat exempel är **Beacon Power**<sup>17</sup> som ursprungligen planerade att sälja sina svänghjul som utrustning för effektbalansering, men istället har styrt

<sup>17</sup> Beacon Power meddelade i slutet av oktober 2011 att de förklarar sig i konkurs.

om till en tjänstestrategi och en affärsmodell som gör att man fungerar som en vertikalt integrerad elleverantör beredd att stötta alla led i elförsörjningskedjan, från producent till konsument. Ytterligare ett exempel är **Bloom Energy** som erbjuder sina kunder att betala per kWh istället för själva bränslecellerna de tillverkar.

Att få fart på marknaden ligger i leverantörernas intresse även av andra skäl. Genom att bygga anläggningar nu får man plattformar för vidareutveckling och för att pröva olika sätt att pressa kostnaderna. I en marknads initiala skeden kan utbyggnaden av en installationsbas vara viktig och prioriteras före lönsamhet, vilket dock är ett risktagande som kräver finansiell uthållighet.



## Teknik för energilagring i elnäten

Energilagring kan ske på flera sätt. **Mekanisk** lagring flyttar till exempel vatten eller luft och utnyttjar sedan rörelseenergin för att generera el. Genom **termisk** lagring omvandlas energin till värme. **Elektrisk** lagring utnyttjar magneter eller kondensatorer. **Elektrokemisk** lagring sker i olika typer av batterier och **kemisk** lagring sker i väte. Tabellen nedan sammanfattar olika tekniker och deras huvudsakliga för- och nackdelar.

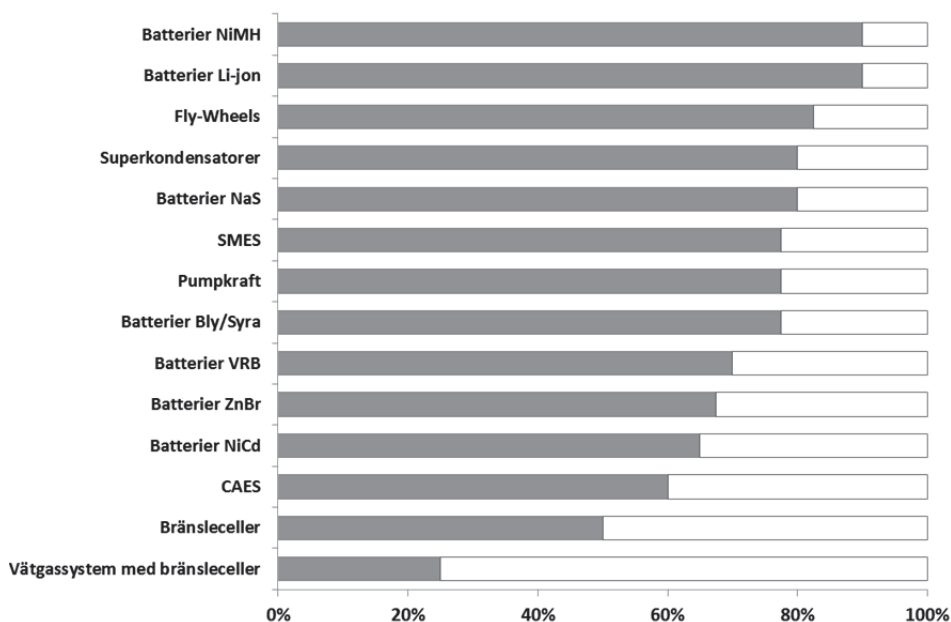
	LAGRINGSTEKNIK	FÖRDELAR	NACKDELAR
Mekanisk	Pumpkraftverk	Hög kapacitet, låg relativ kostnad	Krav på höjdskillnad, ingrepp i naturen
	Tryckluft - CAES	Hög kapacitet, låg relativ kostnad	Kräver naturliga förutsättningar och gasturbinkraftverk
	Svånghjul	Hög effekt	Låg energitäthet
Elektrisk	Supraledande - SMES, DSMES	Hög effekt	Dyra, låg energitäthet
	Kondensatorer	Lång livstid, hög effektivitet	Låg energitäthet
Elektrokemisk	Bly-Syrbatterier	Låg kostnad	Begränsad livslängd vid djupa urladdningar
	Flödesbatterier Natrium-Svavelbatterier	Hög kapacitet, oberoende effekt och energiegenskaper	Låg energitäthet
	Litiumjonbatterier	Hög effekt och energitäthet och effektivitet	Dyra, kräver dyr kringutrustning
	Övriga avancerade batterier	Hög effekt och energitäthet och effektivitet	Hög kostnad
	Bränsleceller	Hög effekt, kan "tankas" med bränsle	Hög kostnad
Termisk	Varmvatten, Smältsalt, Fasomvandling	Dessa energilagringstekniker berörs ej i rapporten, då de inte omvandlas till el. Däremot finns det en stor potential att koppla samman värme- och elsystem för energioptimering och –effektivisering.	
Kemisk	Väte		

Den kanske mest kända tekniken för energilagring är batterier. Men för elnätstillämpningar finns andra alternativ som ofta passar bättre. Dessutom kan olika tekniska lösningar komplettera varandra. Det kan i ena änden vara millisekundsbehov som motsvaras av **kondensatorer**, futuristiska **supraledande magnetiska lager** eller snabba **svånghjul**. I den andra änden handlar det om att kunna försörja med elkraft i dagar, månader och år - då krävs dammar, pumpkraftverk eller andra anordningar. Inte sällan behövs både och. Den största potentialen för tillväxt inom EES finns i den avancerade

batteritekniken, särskilt litiumjon och så kallade NaS-batterier, i pumpkraftverk och lagring med hjälp av tryckluft (CAES).

En av de viktigaste egenskaperna hos energilager ur både tekniskt och ekonomiskt perspektiv är dess effektivitet. **Round-trip efficiency** (RTE) är ett begrepp som används för att ange hur bra ett energilager är på att lämna tillbaka den energi som från början har lagrats. RTE är lika med kvoten energi ut/energi in. Förlusterna uppstår i systemet i form av kylning, värmning, pumpar, DC/AC och AC/DC-konvertering, styr-, kontroll- och säkerhetsutrustning. I batterier sker förluster även i cellstackar och elektrolyt, medan det i andra energilager förekommer mekaniska förluster i form av friktionsvärme.

I ett större systemperspektiv är det också relevant att ta hänsyn till försörjningskedjorna. Vad kostar det t.ex. att använda 100 kWh el för att producera och distribuera vätgas för en bränslecell i jämförelse med att distribuera och lagra energin i ett elektriskt system? I sammanställningen nedan har vi angett RTE för de typer av energilager som diskuteras i rapporten. En detaljerad och kommenterad sammanställning återfinns i appendix.



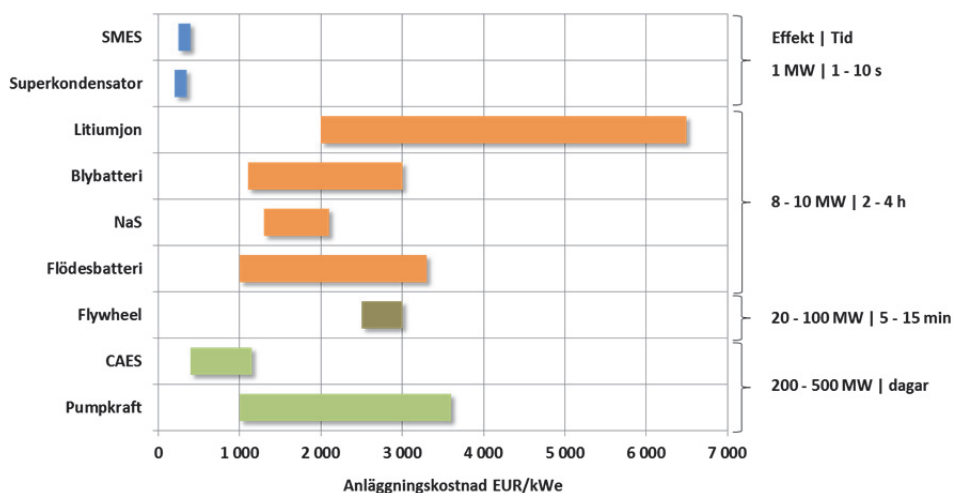
Figur 8 Round Trip Efficiency för olika typer av energilager (genomsnittsvärden) (Källor: se appendix)

Av installerad kapacitet dominerar i dagsläget **pumpkraftverken** med cirka 123 GW installerad kapacitet<sup>18</sup>. Pumpkraftverken är mycket platsspecifika och därför har få nya anläggningar kommit till under de senaste decennierna men som beskrivs nedan pågår

<sup>18</sup> US Department of Energy, Electricity Advisory Committee, Energy Storage Technologies Subcommittee, 2011, Energy Storage Activities in the United States Electricity Grid,

en hel del utvecklingsarbete. Den näst mest använda tekniken, tryckluft (CAES), kommer på en fjärran andraplats med två anläggningar om totalt 440 MW, d.v.s. ungefär en tredjedels procent så mycket installerad kapacitet som pumpkraftverk. Sedan kommer olika batterityper och diverse andra tekniker, med en sammantagen kapacitet på 500 - 600 MW. Som referens uppgår den svenska vattenkraftens installerade effekt till 16 GW.

En avgörande parameter för både praktiskt val av teknik och framgång på marknaden är kostnaden per installerad kWh lagringskapacitet. Följande uppgifter kan tjäna som vägledning men i praktisk tillämpning kan kostnaderna sträcka sig utanför angivna intervall. Att göra helt jämförbara kostnadsanalyser är också vanskligt då olika tekniker har olika optimala användningsområden - till exempel med avseende på möjlig lagringsstorlek och möjlig lagringstid. I diagrammet nedan är teknikerna redovisade med intervall för anläggningskostnaden (capital cost) för en typisk storlek och möjlig lagringstid.



Figur 9 Anläggningskostnaden för olika typer av energilagring. Källa: Europeiska kommissionen/SETIS

På följande sidor beskrivs de huvudsakliga lösningarna som erbjuds marknaden för energilagring i elnäten. Vi berör olika huvudprinciper och dess underdiscipliner och vilka för- och nackdelarna kan vara. I en del fall ger vi också referenser till anläggningar som faktiskt finns i drift.

## Pumpkraftverk

**Pumpkraftverk** bygger på principen att vatten pumpas upp till ett högre liggande vattenreservoarer när det råder överskott på el och släpps ner igen för att driva en generator när det behövs ström. Pumpvattenkraftens effektivitet ligger mellan 70 - 85 procent och är den mest mogna och utbredda tekniken för storskalig energilagring, bortsett från naturliga kraftverksdammar. Kina, Japan och USA har flest antal anläggningar med

kapaciteter från tiotals MW till flera GW. Pumpkraftverk är en bra matchning för vindkraft eftersom vatten som pumpas upp kan bevaras där under mycket lång tid för att portionsvis kompensera luckor i vindkraftsproduktionen. Den kan också användas som hjälpkraft när andra generatorer faller ur och för att stabilisera frekvens och andra parametrar för elkvalitet.

På 1970-talet byggdes ett svenskt pumpkraftverk i **Juktan** vid Umeälven. På helger och nätter pumpades vatten upp till **Blaiksjön**, för att sedan släppa ner det genom en turbin när energibehoven ökade. I och med avregleringen av elmarknaden ansågs denna reserv inte vara nödvändig och kraftverket konverterades 1996 till ett vanligt vattenkraftverk, d.v.s. man lät vattnet gå direkt från **Storjuktan** via turbinen ut i **Storumansjön**. Möjligheten att återställa pumpkraftverket finns dock kvar. Med dagens utbyggnad av vindkraft kan beslutet verka ologiskt - verket skulle ha varit utmärkt för att balansera **Skellefteå Krafts** stora vindkraftsutbyggnad. Det är inte helt osannolikt att kraftverket skulle kunna återuppstå.

I den konventionella formen av pumpbaserad vattenkraft krävs stora nivåskillnader, som berg eller fjäll. Möjligheterna att bygga pumpkraftverk begränsas därför av geografiska förhållanden och byggena innebär ingrepp i miljön. Detta gäller inte minst när det behövs högspänningsledningar som skär igenom områden av särskilt stora naturvärden. Om pumpkrafttekniken ska kunna utvecklas vidare behöver den lämna bergstrakterna och placeras där de bäst behövs.

Ett innovativt koncept har förslagits av konsultföretaget **KEMA**<sup>19</sup> som går ut på att vindkraftverken och pumpkraftverket placeras intill varandra. En **energiö** skulle etableras i en grund del av Nordsjön och ca 60 kvadratkilometer av havet (en yta ungefär dubbelt så stor som Lidingö) ringas in med vallar och skapar en konstgjord sjö. Vindkraftverk byggs sedan runt om på vallen. Överskottsproduktion av el från vindkraftverken kan användas för att pumpa vatten ur det omgivande havet in i den konstgjorda sjön. Vattenflödet tillbaka från dammen till havet genererar elektricitet och hela arrangemanget skulle bli ett stort energilager till havs att använda när det inte blåser. KEMA har uppskattat att energin som kan levereras från ”ön” motsvarar i genomsnitt 1 500 MW som kan levereras under 12 timmar innan den tar slut.

Ett alternativ till energiöar är att utnyttja naturligt höglänt terräng i anslutning till havet. Sådana havsvattenanläggningar finns bland annat i **Yanbaru**, Okinawa. Ytterligare en variant som skisserats är underjordskraftverk som endera skulle kunna utnyttja övergivna gruvor, naturliga grottor eller skapade reservoarer.

Den installerade kapaciteten i världen av pumpkraftverk bedöms vara cirka **123 000 MW**. I jämförelse med andra former av energilager i elsystemet - som uppgår till några hundra megawatt - är pumpkraftverken helt dominerande. I Europa är så många som tio

<sup>19</sup> KEMA, 2009, Energy island is an innovative concept for large-scale electricity storage

pumpkraftverk under uppbyggnad, inklusive 178 MW-anläggningen **Avce** i Slovenien, 540 MW **Kopswerk 2** i Österrike, 480 MW **Limberg 2** i Österrike, 171 MW **Baixo Sabor** i Portugal och 141 MW **Nestil** i Schweiz. Flera potentiella projekt är under utredning och en stor del av kommande investeringar förväntas ske i Spanien och Portugal av vindkraftsoperatören **Iberdrola**.<sup>20</sup> Leverantörer inom området är bland annat **Andritz Hydro**, **Alstom**, **Siemens**, **ABB**, **Voith Hydro**, **General Electric** och **Harbin Electric Machinery**.

Den underliggande principen bakom pumpkraftverk utvecklas även i andra applikationer. Det amerikanska entreprenörföretaget **Gravity Power LLC** har lanserat idén om att gräva ner pumpkraftverket under jord. Principen bygger på att borra ett djupt cirkulärt schakt likt en cylinder i en bilmotor. I cylindern placeras en stor ”kolv” byggd av betong. Kolven kan lyftas i cylindern genom att pumpa vatten underifrån, vilket lagrar energin. Vid behov låter man tyngdkraften trycka ner vattenpelaren under kolven och via en rörledning i cylinderns botten passerar vattnet en turbin och generator. På det sättet kan lägesenergin omvandlas till elektricitet, med en RTE faktor som motsvarar den i ett ordinärt pumpkraftverk. Kapaciteten ska kunna uppgå till mer än 50 MW i de största schakten, motsvarande 200 MWh i energimängd. Fördelen med denna modell skulle bland annat vara betydligt kortare byggtid och att miljöpåverkan blir marginell eftersom största delen av anläggningen finns under jord.<sup>21</sup>

Ytterligare en princip som bygger på gravitation, lägesenergi och Arkimedes princip är vikt-gravitationsverk, som också har prövats och patenterats i olika varianter. Principen är att två hängande behållare med en cylinder inuti och en lina emellan rör sig vertikalt upp och ner - som två vikter mot varandra. Samtidigt pumpas vatten emellan de två cylindrarna så att de är ömsom fulla och ömsom tomma. När den ena behållaren släpps ner fylls den samtidigt med vatten och ökar i vikt samtidigt lyfts den andra behållaren genom att den töms på vatten i det nedersta läget. Linan mellan vikterna/behållarna löper över en motor/generator som kan tillföra respektive förbruka elenergi.

## Tryckluft (CAES)

En annan beprövad teknik för energilagring är att komprimera luft. Tryckluft användes redan på 1800-talet för att driva klockor och maskinmotorer i stadsnät. CAES, Compressed Air Energy Storage, komprimerar luft i stora underjordskammare (till exempel saltgruvor) när det finns ett överflöd av elproduktion, som sedan expanderas och blandas med gas för att driva en turbin när el behövs. Tekniken är beprövad, har en relativt låg kostnad och är lämplig för energilagringssapplikationer som kräver mycket kapacitet över en längre period (som peak shaving och time shifting) och förväntas därför också stå för en betydande del av marknaden för energilagring för elnät de närmsta åren.

<sup>20</sup> Renewable Energy World, 2009, Hydropower in Europe: Current Status, Future Opportunities

<sup>21</sup> Se <http://www.gravitypower.net/> för mer information.

I **Huntorf**, Tyskland, har en anläggning funnits sedan 1978 som kan leverera nästan 300 MW reservkraft i upp till tre timmar. Systemet används ungefär 100 gånger per år. En liknande mindre anläggning finns i McIntosh, Alabama som togs i bruk 1991. Två CAES projekt befinner sig i utvecklingsstadiet: **Iowa Stored Energy Park (ISEP)** och **Central Utah Magnum Project**. ISEP är ett 270 MW-projekt mitt i Iowas mest vindkrafttäta område. Iowa är en av de ledande "vindstaterna" i USA och projektet är tänkt att utnyttja en underjordisk sandstensreservoar på 3 000 meters djup - en "luftbubbla" som är 1,5 km bred och 60 meter tjock. Projektet i centrala Utah har en gynnsam lokalisering för både västra stamnätet i USA och naturgasnätet. Flera exempel på demonstrationsprojekt är **New York State Electric and Gas (NYSEG)** som arbetar med ett projekt i en saltgruva i New York, samt **Pacific Gas and Electric (PG & E)** som tittar på ett 300 MW projekt i Kern County.

Dessa tryckluftsdrivna energilagransanläggningar är betydligt mer komplicerade i praktiken än vad deras enkla princip föranleder en att tro. Gas värms upp när den komprimeras vilket begränsar hur mycket luft som kan pumpas ner i underjorden innan det blir för varmt för säker förvaring. Ju längre varm luft lagras, desto mer värme går förlorad i väggarna i den omgivande grottan - det utgör en betydande del av den ingående energin. När den sedan släpps ut igen, kyls den expanderande luften ner. Om man låter luften matas in i en gasdriven turbin, ökar effektiviteten. Effekten med luftkomprimering blir alltså bäst om den används för att öka effektiviteten i ett konventionellt gasturbinkraftverk. På lite längre sikt tror den amerikanska kraftföretagsorganisationen **EPRI** att tekniken går att förbättra så att den kan bli ett konkurrenskraftigt alternativ för energilagring utan inslag av fossila bränslen.<sup>22</sup>

Ett sådant system skulle avskilja och lagra kompressionsvärmerna och sedan använda den för att värma den frisläppta luften för att direkt driva en gasturbin, utan något extra bränsle.<sup>23</sup> Gjuterier och masugnar har i många år tagit till vara spillvärme i eldfasta tegel och liknande material - att tillämpa tekniken för lagring av tryckluft bör därför vara fullt möjlig. Verkningsgraden för ett sådant system skulle vara strax under 80 procent, jämförbart med pumpkraftverk. Anläggningskostnaden liksom drift och underhåll bedöms också i samma härad - mellan 250 till 500 USD per kWh. Lämpliga platser för CAES går att hitta på många ställen i världen.

Namnkunniga leverantörer som **Alstom**, **Dresser-Rand**, **Siemens**, **Man Turbo**, **Zublin**, och **General Electric** är aktiva inom området. Det finns också exempel på utvecklande och kreativt tänkande i det här området. **Bright Energy Storage**, ett företag som fortfarande befinner sig i uppstartsstadiet, har lanserat iden om ett undervattensbaserat energilager med tryckluft. Tekniken ska ge avsevärt lägre kostnader (25-75

---

<sup>22</sup> EPRI, 2011, State of the technology

<sup>23</sup> Systemet skulle vara adiabatiskt, d.v.s. utgöra en termodynamisk process där ingen värme tillförs eller bortförs från en vätska eller gas.

USD per kWh) och går ut på att placera en lång ”plastpåse” förankrad under vatten i hav eller sjö, som fylls med tryckluft från landbaserade kompressorer. Lagring av luft vid hydrostatisk jämvikt med omgivande vatten kräver betydligt enklare och tunnväggiga konstruktioner än motsvarande tryckkärl på land. Barlasten är tänkt att bestå av sand från sjön/havets botten.

**SustainX** är ett annat amerikanskt utvecklingsföretag vars metod går ut på att lagra energi i form av tryckluft. Hydrauliska pumpar drivs med hjälp av elektricitet för att komprimera luft för förvaring ovan jord i vanliga industriella tryckkärl. Tryckluften expanderas vid behov och används för att driva en hydraulmotor som driver en elektrisk generator. Tekniken använder isoterma cykler - kompression och expansion - som med hjälp av vattendimma håller luften vid konstant temperatur. Företaget fick 2009 bidrag från den amerikanska energimyndigheten för utveckling av konceptet.<sup>24</sup> **General Compression** erbjuder motsvarande teknik och har även de tagit emot offentligt utvecklingskapital i USA.

## Batterier

Batterier är den vanligaste och för volymapplikationer viktigaste energilagringsformen<sup>25</sup> och den återfinns också inom energilager för elnät. Förenklat går det att dela upp batteriteknik för elnät i följande grupper:

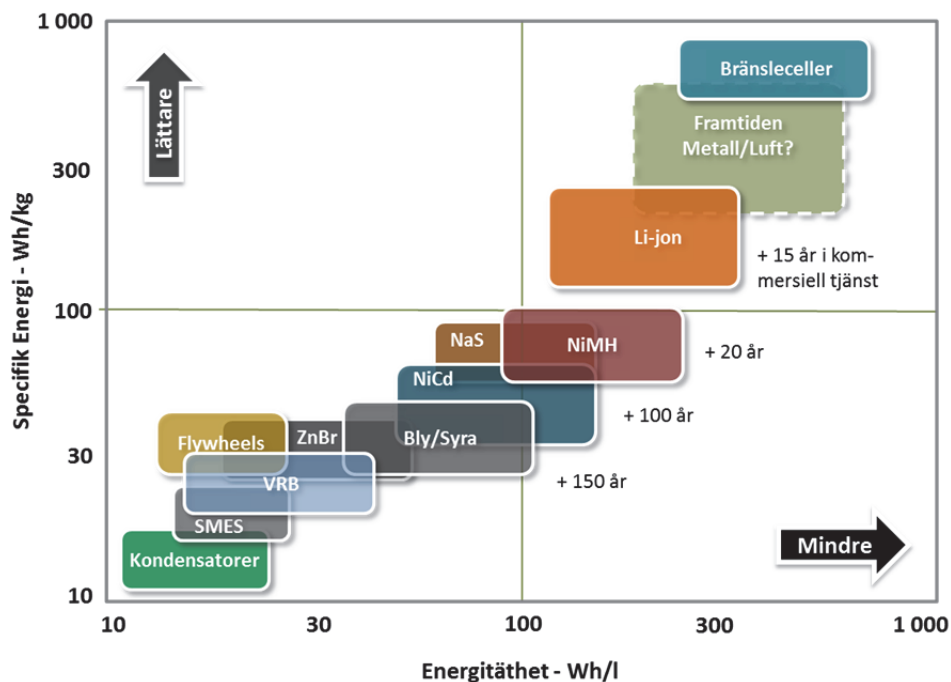
- Blybaserade (Pb): Påvisad låg kostnad och robusthet, återvinningsbart till 98 procent
- Litiumbaserade: (LiJon) Hög energitäthet, små, lätta, dyra
- Natriumsvavel (NaS)
- Flödesbatterier och olika hybridvarianter

Bland batteriernas egenskaper är kanske den viktigaste förmågan att hålla **energi** i relation till vikten (kg) - kallas specifik energi - och i förhållandet till volymen (liter, m<sup>3</sup>) - benämns energidensitet eller energitäthet. I grafen nedan visas batterier i förhållande till andra energilager som diskuteras i rapporten. Ytterligare viktiga egenskaper är förmågan att kunna lämna mycket **effekt** när det behövs, att klara många i- och urladdningscykler för lång livslängd, och god verkningsgrad (RTE). Att batterierna inte läcker för mycket laddning när de förrådslagras kan också vara en viktig egenskap för vissa tillämpningar.

---

<sup>24</sup> <http://www.sustainx.com/financial>

<sup>25</sup> Batterier och olika sammansättningar beskrivs i mer detalj i Blue Institutes rapport *Utan nät - batterimarknadens utvecklingsmöjligheter och framtida tillväxt* (2011).



Figur 10 Olika batteriers energiinnehåll i förhållande till dess vikt och volym, samt hur länge de funnits på marknaden.  
Källa: Blue Institute

I valet av batterier kommer möjligheten till **återvinning** att spela en stor roll. För de gamla batterislagen som bly/syra finns återvinningsprocesserna på plats. Men för de nya batterityperna saknas dessa i stor utsträckning. Det beror på en kombination av faktorer. För de första pågår fortfarande utvecklingsarbetet vilket innebär att vi inte vet vilka materialkombinationer som kommer att finnas på marknaden under kommande decennier. För det andra kommer valet att vara beroende av möjligheten att återvinna. Det kan vara bättre att använda en sällsynt metall som är enkel att recirkulera än en med god förekomst som ger negativ miljöpåverkan och kanske är svår att utvinna på grund av funktionella eller politiska skäl. Det kommer sannolikt också behövas ett pantsystem för att skapa skarpa ekonomiska incitament för hög återvinningsgrad.

Nedan går vi igenom de vanligaste batterityperna som kan komma ifråga för tillämpningar i elsystemet.

## Bly/syra

Problemet med att lagra energi i stor skala skulle för länge sedan vara löst om **bly/syrabatterier** varit mer effektiva. Tekniken som har legat till grund för startbatterier i bilar under mer än hundra år dras tyvärr med låg energitäthet - med andra ord är de skrymmande och tunga i förhållande till hur mycket energi de lagrar. De är inte heller bra på att klara upprepade laddningscykler. I elnätssammanhang har de därför mest an-



vänts för avbrottsfri kraftförsörjning i nätstationer och teleanläggningar. De mest notabla finns i Berlin om 8,5 MWh och i Kalifornien med hela 40 MWh som är världens största.

Det finns på olika håll försök att vidareutveckla blybatteriet. Sedan 2003 har amerikanska **Axion** utvecklat en teknologi som kombinerar den positiva elektroden från ett blybatteri med en negativ elektrod från en superkondensator (se nedan). Kombinationen ger kraft och livslängd som närmar sig de avancerade litiumjonbatteriernas till priset av ett blybatteri. Axion har varit förtegnade om prestanda och potentiella applikationer, men det har testats för hybridfordon, järnväg och militära tillämpningar under de senaste åren. Under provning i laboratorium har prototyperna klarat mer än 1 600 laddningscykler. I jämförelse klarar de flesta blybatterier 300 till 500 cykler under motsvarande driftsförhållanden.

Ett annat exempel på en mycket spännande utvecklingsväg är det **bipolära batteriet**. Genom att göra batterierna bipolära, istället för som vanliga batterier monopolära, får batteriet mycket större tolerans för snabba svängningar mellan laddning och urladdning - strömmen kan gå "fort och lätt" i båda riktningar. Svenska **Effpower** har utvecklat ett batteri där blyet lagts in i en keramisk platta. Syran är inte flytande utan absorberad i en glasfiberseparator och hela batteriet är monterat under högt tryck, vilket ger en lång livslängd. Batteriets styrka är att det kan ge mycket hög effekt, men det har inte så stor energilagringkapacitet. Det gör att batteriet är perfekt för elhybridfordon där uppladdning vid inbromsning hela tiden växlar med effektuttag från batteriet vid acceleration.

Ett tredje exempel är det Australiensiska forskningsinstitutet **CSIRO**<sup>26</sup> som sedan några år stöttat forskning med liknande inriktning. Resultatet ska bli ett batteri som tål fyra gånger fler laddningar än ett vanligt blybatteri, samtidigt som det bara kostar en fjärdedel av existerande batterier för hybridbil, inom några år ska tekniken även kunna användas för tillämpningar i elnäten.

## Litium

**Litiumjonbatterier** används brett i mobiltelefoner och bärbara datorer. De största fördelarna med dem är dess extremt höga verkningsgrad på över 90 procent. Litiumjonbatterier har också hög energitäthet. Den stora nackdelen är kostnaden, som delvis är påverkad av höga säkerhetskrav och behovet av avancerad laddningsövervakning. Batterierna använder litiumsalt i en organisk lösning som är lättantändligt. Det kräver en robust konstruktion för att minimera brand och explosionsrisker.

Litiumjonbatterier som tillverkas för hemelektronik kostar för närvarande några hundra dollar per lagrad kilowattimme. För tillämpningar i fordon måste kostnaderna komma

---

<sup>26</sup> Commonwealth Scientific and Industrial Research, 2009, UltraBattery: no ordinary battery

ner till högst **200 USD** per kWh och för elnätstillämpningar behövs ännu lägre priser. Säkerhetsfrågorna är dock lättare och billigare att möta i stationära tillämpningar än i handhållna enheter och i fordon. Det finns ett starkt stöd för litiumjonteknikens framtid, så starkt att leverantörer är på väg att bygga in sig i en - åtminstone temporär - överkapacitet. Det innebär hård konkurrens mellan olika tillverkare, som var och en hoppas att de ska leda jakten på de nödvändiga och dramatiska kostnadsminskningarna för att öppna nya marknader.

När litiumjonbatterierna introducerades innebar det ett större tekniksprång som fortfarande har stor utvecklingspotential. Utvecklingen av energilagringssystem för elnät gynnas av att litiumjontekniken är i stark utveckling tack vare fordonsindustrins intresse. Jakten på billigare litiumbatterier går bl.a. ut på att byta ut kobolten i batteriets minuspol mot andra billigare material, t.ex. mangan, nickel eller järnfosfat. Ett annat spår går ut på att den omgivande luften fungerar som katod (så kallade litium-luft batterier). Fördelarna med en sådan teknik skulle vara många. Det ger en mycket hög energitäthet och lägre vikt eftersom den ena elektroden utgörs av den omgivande luften. Problemen är att litium reagerar häftigt vid kontakt med vatten (som oftast finns i luft).

Det amerikanska utvecklingsbolaget **PolyPlus** säger sig att ha löst problemet med en ”skyddad litiumelektrod”. Enheten består av en platt, rektangulär bit litiummetall överlappad på sidorna med en keramisk elektrolyt som kallas lisicon. Den fasta elektrolyten är ogenomtränglig för vatten men litiumjonerna kan passera. En annan lösning som forskning vid **St. Andrews University** i Skottland har kommit fram till är att ersätta den oxid av litium och kobolt som fungerar som positiv elektrod, med poröst kol. Även **IBM** meddelade för ett par år sedan att de skall utveckla litiummetall-luft-batterier för smarta elnät och för transportsektorn. Målet var att tekniken ska vara tillgänglig inom fem år. Men ännu har metall-luft batterier en livslängd på bara några hundra cykler och en verkningsgrad på 50 procent.

För stationära tillämpningar kan man förvänta sig kapaciteter i storleksordningen en megawatt eller mer under de närmast kommande åren. Den amerikanska leverantören **Ener1** har landat ett kontrakt som går ut på att konstruera och leverera ett lagringssystem för orten **Sochi** i Ryssland inför vinterolympiaden 2014. Beställare är Rysslands Federal Grid Company (FGC). Syftet är att förstärka nätet speciellt i de mer avlägsna delarna av Kaukasien, att kapa effekttoppar och ge förutsättningar för integration av intermittent förnybar elproduktion. En förstudie ska också utföras för att utreda möjligheterna till lokal utveckling och produktion i Ryssland.

Det franska energibolaget **EDF Energy Networks** beslutade 2008 att tillsammans med **ABB** uppföra en demonstrationsanläggning för att förbättra elkvaliteten och styra spänningen från den ojämna vindkraftsproduktionen på Norfolkkusten, där det finns en stor havsbaserad vindkraftspark. Anläggningen är uppbyggd kring ett så kallat **SVC Light-system**, som möjliggör styrning av aktiv såväl som reaktiv effekt i ett kraftsystem - oberoende av varandra. Snabb reaktiv effektkompensering innebär att nätspänning och

stabilitet kan styras. Styrning av den aktiva effekten sker med hjälp av energilagret som jämnar ut variationerna från de intermittenta energikällorna t.ex. vind- och solkraft.<sup>27</sup> I fallet med EDF kan batterisystemet leverera 200 kW under en timme. I april 2010 lanserades ABB SVC-Light med energilager som en kommersiell produkt. Batterierna kommer från franska **SAFT**.

I juni 2011 fick **ABB** den första svenska beställningen på ett energilager för elnätet. Ett litiumjonbatteri ska installeras i anslutning till en befintlig nätstation i centrala Falköping och kapaciteten är 75 kW i perioder på upp till 60 minuter. Beställare är **Falbygdens Energi** som är ett dotterbolag till Göteborgs Energi. Anläggningen kommer att tas i drift i slutet av året och ska utvärderas under hösten 2012 i samarbete med **Energi-myndigheten**, som även delfinansierar projektet. Falbygden har en relativt stor andel vindkraft ansluten till nätet och prognoserna visar på en fortsatt ökning. Ett energilager gör det möjligt att lagra vindkraften under natten och leverera ut den under dagen och få en effektivare användning av den förnybara energin. Installationen ingår som en del i Falbygdens Energis satsning på att utveckla smartare elnät. Man kommer bland annat att undersöka hur ett energilager kan fungera som effektreserv vid laddning av elbilar och även testa nya affärsmodeller.

ABB har även inlett ett samarbete med den amerikanska fordonstillverkaren **General Motors** i syfte att undersöka möjligheterna att använda ”förbrukade” batterier från hybridbilen Chevy Volt i elnätet.

NASDAQ-listade **A123** bygger litiumjonbatterier och system för transporter, elsystemet och kommersiella marknader. Av företagets intäkter sägs 40 procent komma från elnätbaserade tillämpningar. Bland annonserade projekt under 2011 märks ett 20-megawatts spinning reserv-system som levererats till **AES Gener** för en anläggning i Chile. Ett 32 MWh demonstrationsprogram tillsammans med **Southern California Edison** och i samarbete med **DTE** ett 500-250 kWh demonstrationsprojekt. A123 betraktar sig som en turn-key systemleverantör, och 30 procent och mer av kostnaden bedöms gå till balanseringen av batterisystemet. Andra leverantörer med batterilösningar är bland annat **Litec**, **Altairnano**, **EnerDel**, **LG Chem**, **Ener1**, **Valence Technology**, **Advanced Battery** och **Ultralife**.

## Flödesbatterier

**Flödesbatterier** är en typ av uppladdningsbara batterier med fördelarna hög kapacitet, lång livscykel, snabb responstid och hög tolerans för över- och underladdning. Nackdelen är den låga energidensiteten. Principen för flödesbatterier uppfanns redan 1902 och det finns tre olika typer:

---

<sup>27</sup> ABB pressrelease, ABB levererar första energilagret för lågspänningsnät till Falbygdens Energi, juni 2011

- Vanadin Redox (VRB)
- Zink Bromid (ZnBr)
- Tetrasulfidbromidbatterier

**VRB**-tekniken har sitt ursprung i forskning under ledning av Professor Maria Skyllass-Kazacos vid University of New South Wales, Sydney. Principen patenterades 1986. Det finns flera VRB-system som har installerats som backup-lösningar. De finns oftast i avlägsna områden utan anslutning till större nät, som **Kings Island** i Tasmanien. Det är en ort som ligger i avskildhet och utan tillgång till det Tasmanska stamnätet, men lokal kraftproduktion finns bland annat i form av vindkraft. Överskottskapaciteten av den produktionen går således inte att skicka vidare eller säljas till andra delar av ön. Lösningen i detta fall blev ett Vanadinbatteri. I **Kenya** finns ett 5 kW-system som ägs av ett telefonbolag.<sup>28</sup> Exempel i den större skalan återfinns i **Sapporo**, Japan med ett 4 MW batterisystem. Installationen skedde 2005 och kan nu redovisa över 14 000 cykler utan större problem.<sup>29</sup> Men i allmänhet tycks utvecklingen ha stagnerat under de senaste åren. Inga större installationer har rapporterats trots goda erfarenheter från tidigare försök.

Allmänt sett är detta en batteriteknik som inte ger några utsläpp, inte ger upphov till farliga restmaterial för deponi och har inget laddningsläckage. Byggmaterialet är dessutom "grönt" och batteriet kan faktiskt laddas och laddas ur samtidigt. Potentialen borde vara stor speciellt då batteriet bevisligen klarar mer än 10 000 laddcykler. En nackdel är den låga energitätheten vilket gör att tekniken lämpar sig bäst för stationära tillämpningar. Det har dock gjorts försök med mobila applikationer och en golfbil i Australien har försett med ett litet VRB-batteri. Leverantörer är bland annat **Cellstrom**, **Prudent Energy**, och **Sumitoma**.

**Zinkbromidbatterier** är av typen hybridflödesbatterier. Tekniken används främst för s.k. peak-shaving, reservkraft och smärre lastutjämning. Leverantörer är bland annat **ZBB**, **Prudent Technologies** och **Premium Power**. Premium Power utvecklar en produkt, **HomeFlow**, för hemmabruk i kombination med någon intermitterent förnybar energikälla. HomeFlow ska lagra cirka 30 kWh räknat i energimängd och klara ett effektuttag på 10 kW, till ett pris av 7 500 USD. Då ingår omriktarelektronik så att batteriet direkt kan anslutas till t.ex. ett solcellssystem. Företagets affärsidé är att bli motsvarigheten till **Dell** när det gäller flödesbatterier. De flesta av Premiums flödesbatterier ska kosta mellan 250 till 300 USD per kWh, vilket vore sensationellt billigt. Zinkbromid är dessutom en biprodukt från skaldjur. Med andra ord finns det gott om råmaterial.

---

<sup>28</sup> Africa Online, 2010, Guest Editorial - WinAfrique Technologies

<sup>29</sup> Holzman, D.C., 2007, The Vanadium Advantage: Flow Batteries Put Wind Energy in the Bank, Environmental Health Perspective

## NaS

Ytterligare en typ av batterier som är intressanta för energilagring för elnät är natrium-svavelbatterier (**NaS-batterier**). De utvecklades i Japan, som har en installerad lagringskapacitet som kan uppgå till ca 300 MW upp till sex timmar i sträck när det behövs. I USA finns ca 10 MW NaS-kapacitet på plats och lika mycket till är på väg. Vanliga applikationer är lastutjämning och för att temporärt skjuta upp större investeringar i näten. Ett exempel finns i **Presidio** i södra Texas, där man varit vana vid strömavbrott. En enda 10 mil lång kraftledning försörjer samhället med elektricitet och problemet är att den byggdes 1948. Nu har staden fått ett jättebatteri - i folkmun kallat **Bob (Big Old Battery)** - som ska råda bot på problemet. Bob ska kunna förse stadens drygt fyra tusen invånare med 4 MW i åtta timmar på en laddning. Batteriet är från det japanska företaget **NGK Insulators**. Det anlände till Kalifornien i december 2009 och fraktades till Texas i 24 långtradar.<sup>30</sup>

Fördelen med NaS-batterier är att de har en hög energitäthet och kan klara tusentals laddningscykler - livslängden är enligt leverantören 12 - 20 år. Batteriets celler har även en hög verkningsgrad (runt 89 procent), och är tillverkat av relativt billiga, ofarliga material. Ett batteri på 1 MW (10 MWh) upptar ca 85 m<sup>2</sup> markyta. En av nackdelarna med denna teknik är den höga operativa temperaturen och att natrium är korrosivt. Tillammans gör det att NaS batteri endast lämpar sig för storskaliga tillämpningar. Att natrium och svavel måste förvaras i flytande form i separata tankar<sup>31</sup> betraktas också som en nackdel. NaS batterier kostar mellan 1 500 - 3 000 USD per kW vilket är dyrare än att producera reservkraft från en gasturbin.

Intressanta planer finns också för det som kallas ett **Energy Warehouse i Baja Kalifornien**. Ett entreprenörföretag sägs ha upphandlat 350 hektar mark för att uppföra en batteripark omfattande 1 GW (1 000 MW) NaS-batterier. Idén är att erbjuda lagringskapacitet till både amerikanska och mexikanska operatörer. Att bygga jättebatterier i närheten av de mest tätbefolkade regionerna kan vara en god affärsidé.

Den amerikanska operatören **PG&E** har 15 miljoner kunder och 430 MW solceller installerade. PG&E förväntar sig inom några år att erbjuda en mix av 13 procent sol och 10 procent vindkraft, en kombination som någonstans i systemet kommer att kräva energilager. Och investeringarna har påbörjats. Det första projektet är ett 4 MW/28 MWh NaS-batterisystem som betjänar ett stort kontorskomplex i slutet av en lång distributionsslinga med en historia av strömavbrott och andra problem. Batteriet, som levereras av **NGK**, förväntas vara i drift under fjärde kvartalet 2011 och adressera problemen med tillförlitligheten, elkvalitén, frikoppling från nätet, frekvenshållning, lastprofil och hjälpsystem. Det andra projektet är i en transformatorstation nära Vaca Dixon Solar

<sup>30</sup> NPR, 2010, In Texas, One Really Big Battery

<sup>31</sup> Tekniken kallas också för flödesbatteri (flow battery) eftersom elektrolyten pumpas över cellstacken från den ena tanken till den andra

Plant i Vacaville, Kalifornien och omfattar en 2 MW/14 MWh-installation som förväntas att vara i drift i slutet av 2011.

## Bränsleceller

Bränslecellen kan liknas vid ett batteri som "tankas". Det optimala bränslet är vätgas som enklast kan sönderdelas elektrokemiskt. För vardagliga tillämpningar är vätgas dock svårt att hantera och transportera, och de bränslen som förväntas användas är till exempel metanol, bensin eller naturgas. Bränsleceller innebär att el kan produceras distribuerat i stora mängder och ersätta centrala kraftstationer. De kan alltså betraktas både som distribuerade generatorer och energilager. De kan också lagra kraft och eliminera en del av problemen med batterier, som långa laddningstider, hög vikt och höga priser.

Det är inte konstigt att bränsleceller har varit "Next Big Thing" sedan **William Grove** påvisade principen år 1838. Men hittills har inte utvecklingen gjort tekniken konkurrenskraftig. Företag som **Bloom Energy** och **Ceres Power** säger sig ha utarbetat sätt att öka tillförlitligheten samtidigt som kostnaderna minskat. Bloom Energy har fått mycket uppmärksamhet för sin "Energy Server" som används av företag som Google, ATT, WalMart och Kaiser Permanente. En Energy Server, eller Bloom Box, tar upp en yta som en parkeringsplats och har 100 kW effekt, tillräckligt för att förse 100 (amerikanska) hem med el och drivs av naturgas eller biogas. Totalt hade Bloom Energy i juli 2011 levererat 120 Energy Servers som totalt levererat ca 55 GWh el. En stor installation åt Delawares **Delmarva Power** på 30 MW håller på att utredas. Dessutom erbjuder Bloom Energy kunder att betala per kWh (i långa kontrakt) snarare än att köpa enheter-na i sig. Det är en affärsmodell liknar de traditionella energibolagens och som omvandlar kapitalkostnaden till en löpande kostnad. Än så länge är spridningen dock begränsad till Kalifornien, som har generösa subventioner för bränsleceller. **Ballard Power**, **Plug Power** och **Hydrogenics** är andra exempel på leverantörer av bränsleceller.

Bränsleceller förekommer också i andra applikationer. I Japan har **Osaka Gas** på prov installerat bränsleceller i hushåll som med 80 procent effekt tar tillvara på gasen och producerar el och värme. **Oorja Protonics**, ett startupföretag i Fremont, Kalifornien, har skapat en bränslecell som ger all den energi som en gaffeltruck behöver för ett åtta timmars skift. Att tanka bränsle tar ungefär fem minuter. Traditionella truckar körs på blybatterier som tar timmar att ladda och behöver bytas var fjärde timme.

Vissa biltillverkare fortsätta att utreda möjligheten att driva bilar med vätgas genom bränsleceller. **Honda** hyr till exempel ut 200 exemplar av modellen FCX till privatpersoner i **Kalifornien** och i **Japan**. Även tillverkare som **Opel**, **Daimler** och **Mazda** testar bränslecellsbilar. **Volvo Car** har med forskningsstöd från **Energimyndigheten** påbörjat utvecklingen av en bränslecell i syfte att öka räckvidden för sina elbilar. I projektet samarbetar Volvo Personvagnar med företaget **Powercell Sweden AB**.

## Superkondensatorer

Precis som batterier kan kondensatorer lagra energi och bli en kompletterande teknik. Till fördelarna hör att det går att få ut mycket höga momentana strömmar och de kan klara hundratusentals, kanske miljoner, i- och urladdningscykler utan att degenerera. Nackdelen är att både energimängden och den tid som laddningen kan hållas kvar är begränsad. En variant av kondensator är ultra- eller **superkondensatorn** som precis som batterier använder en elektrolyt med den skillnaden att inga kemiska reaktioner sker. Fördelen är att lagringsförmågan blir mycket större än för traditionella kondensatorer.

Användningsområden i elnäten omfattar främst tillämpningar för förbättrad elkvalitet. Men även andra applikationer är möjliga, till exempel att styra bladen på vindkraftverk för att skydda dem från skador.

Det finns också en del förhoppningar om att kondensatortekniken skulle kunna utvecklas så långt att de ersätter batterierna. Lagringskapacitet bedöms kunna öka med mellan fem till tio gånger under de kommande åren. Men att de skulle göra batterierna onödiga verkar inte särskilt sannolikt annat än för speciella effektintensiva tillämpningar. Exempel på en möjlig tillämpning för kondensatorteknik är att fånga upp rörelseenergi och bromsenergi som skapas när ett tåg närmar sig en station. Den lagrade energin kan sedan användas för tågets avgång och initiala acceleration. Effektivitetsvinsterna av denna relativt enkla applikation är mycket stora.

Bland de aktiva utvecklingsföretagen finns MIT:s spin-off **FastCAP Systems**, **ADA Technologies** och **Nippon Chemi-Con**. När det gäller att pressa kostnaderna handlar det oftast om att göra billigare kolelektroder. Bland aktörerna här finns **SolRayo**, **TDA Research** och **University of Kentucky**. Elektrolytutveckling är ett annat hett område, liksom joniska vätskor och litium. Amerikanska **Maxwell** är annars den ledande leverantören inom området. Andra leverantörer är **Batscap**, **Nesscap** och **ESMA**.

## Supraleddande lager (SMES)

**Superconducting Magnetic Energy Storage** (SMES) lagrar energi i magnetfältet kring en supraleddare. Den ursprungliga idén lanserades av **Ferrier** år 1969, som djärvt föreslog byggandet av ett SMES stort nog att klara den dagliga lagringen av elenergi för hela Frankrike. Men kostnaden skulle blivit orimlig och idén begravdes. Forskningen började i stället i USA vid **University of Wisconsin** som ledde till byggandet av de första små SMES-enheterna. År 1986 byggde **Hitachi** ett 5 MJ-system som anslöts till Hitachis 6,6 kV industrinät i Japan. Genom programmet ISTEK byggdes år 1998 en 100 kWh anläggning, också den i Japan.

Supraleddande magnetisk energilagring har flera fördelar. Tidsfördröjningen vid laddning och urladdning är försumbar, mycket hög effekt kan tillhandahållas för en kort tid och energiförlusterna är mindre än vid andra lagringsmetoder. Dessutom är de viktigaste

delarna icke rörliga vilket resulterar i hög tillförlitlighet och lång teoretisk livslängd. Till nackdelarna hör höga materialkostnader som gjort att hittills endast mindre anläggningar för mycket specifika behov har varit kommersiellt aktuella. SMES används också för att ge kontrollerad kvalitet på elförsörjningen i fabriksanläggningar som kräver extremt ren kraftförsörjning, till exempel i anläggningar för mikrochiptillverkning.

Det finns i dag flera typer av mindre SMES-enheter (ca 1 MWh) tillgängliga för kommersiellt bruk och större (ca 20 MWh, som kan ge 400 MW under 100 sekunder eller 10 MW i 2 timmar) finns i försöksanläggningar. Den teoretiskt möjliga storleken anges till hela 2 000 MW. I norra Wisconsin i USA används distribuerade SMES-enheter för att öka stabiliteten i ett nät som på grund av ett pappersbruk är föremål för stora plötsliga lastförändringar och potentiellt okontrollerade svängningar med risk för spänningskollaps. **American Superconductor** är ett av de företag som utvecklar tekniken. Man anger att operatören **Wisconsin Public Service** i det här fallet har ökat kapaciteten på nätet med 15 procent tack vare SMES-anläggningen.<sup>32</sup>

Ett projekt som är inriktat på större SMES-system drivs av **ABB** i samarbete med **Super Power**, **Brookhaven National Laboratory** och **University of Houston**. Den amerikanska energimyndigheten finansierar genom programmet **ARPA-E** projektet med 4.2 miljoner USD. ABBs mål är att utveckla ett SMES i storleken 1 - 2 MWh för kommersiell skala och kostnadsmässigt konkurrenskraftig med blybatterier.<sup>33</sup>

## Svänghjul

Ett annat sätt att lagra energi på är i ett snabbt roterande svänghjul. Elektrisk energi omvandlas till rörelseenergi genom en motor som ger fart till hjulet, och utvinns när det behövs genom att svänghjulet driver en generator som bromsar hjulet och producerar elektricitet.

Svänghjul som lagringssystem är kommersiellt etablerad och finns bland annat i form av avbrottsfri strömförsörjning som kan leverera små mängder kraft på sekund- eller minutbas. För lagring under längre tider är de inte konkurrenskraftiga. Men en stor fördel med svänghjul är att de är snabba och kan absorbera energi på mycket kort tid, inom några sekunder eller minuter, och sedan ge tillbaka den lika snabbt. Det är precis vad som behövs för att reglera och förbättra elkvaliteten i ett elnät där avsikten är att hålla en viss frekvens.

Att hålla nätet stabilt är en sann utmaning för alla elleverantörer. Av den anledningen försöker leverantörerna tillsammans med elbolagen finna nya lösningar. Det amerikanska företaget **Beacon Power**<sup>34</sup> säger sig ha ägnat tio år av utveckling för att ta fram

---

<sup>32</sup> <http://www.amsc.com>

<sup>33</sup> MIT Technology Review, 2011, Superconducting Magnets for Grid-Scale Storage

<sup>34</sup> Beacon Power meddelade i slutet av oktober 2011 att de förklarar sig i konkurs.



ett mycket avancerat svänghjul som är optimerad för frekvensreglering i elsystemet. Ett 3 MW stort svänghjul har så här långt installerats i New England och ett annat på 20 MW har satts upp i New York. Värdet av nätbalansering och andra närliggande tjänster skulle enligt företaget kunna uppgå till 1 miljard USD om några år eftersom som mer och mer intermittent förnybar elproduktion byggs. Andra leverantörer är **Active Power** i USA och **Vycon** i England. Vid **Ångströmlaboratoriet** i Uppsala har det pågått forskning under flera år kring svänghjultekniken och man har bildat företaget **Electric Line** för att kommersialisera idéerna, vilka framförallt vänder sig mot fordonsapplikationer.

## Sammanfattning: teknik och tillämpningar inom energilagring för elnät

Det finns flera energilagringsprinciper, ett stort antal tekniker och ett ännu större antal produkter och lösningar för energilagring. En del av dem har funnits länge medan andra har utvecklats relativt sent. För flera - särskilt batterier - sjunker kostnaderna oberoende av elnätstillämpningar då de spelar en stor roll i andra branscher som till exempel fordonsindustrin. Marknaden kommer att växa och det finns utrymme för en mångfald tekniker. En trolig utveckling kan vara följande:

- Initialt kommer sannolikt produkter som baseras på känd FACTS-teknik<sup>35</sup> i kombination med t.ex. litiumjonbatterier för ökad elkvalitet och stabilitet av näten vara de vanligaste i den mindre skalan.
- Parallellt kommer vi att se utbyggnad av större energilager - främst pumpkraft och utbyggnad av vattenkraft där det är möjligt - som uppbackning av de intermittenta förnybara energikällorna.
- Successivt kommer sedan andra smalare produkter som lätt kan inlemmas i systemen, som kan standardiseras och som kan påvisa en hög grad av tillförlitlighet att vinna mark.

---

<sup>35</sup> Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS) är ett system som består av statisk utrustning som är avsett att förbättra och öka överföringsförmågan i elnät för växelström. I allmänhet är systemen baserade på kraftelektronik.

## Möjligheter för svensk industri

För att energilagren ska få sin avsedda funktion - att svara upp mot strömavbrott eller brist, att öka kvaliteten på strömmen etc. - krävs djup kunskap om själva processen och karaktären på kraftproduktionen och överföringssystemen. Först när det är integrerat i systemet får energilagret sitt egentliga värde. Detta öppnar för flera möjligheter. I första steget finns utvecklingsmöjligheter inom de plattformar som finns för energilagret *per se*, d.v.s. som teknik- och komponent leverantör. I steg två finns möjligheter att integrera energilagren i befintliga och i nyutvecklade system som kan installeras i kraftnätet, anpassade för olika behov.

Ett exempel på integrering är ABBs **SVC Light med energilagrar** - ett slags reservkrafttaggregat för elnätet. Systemet möjliggör dynamisk styrning av både aktiv och reaktiv effekt i ett kraftsystem oberoende av varandra.<sup>36</sup> För att klara kraven har **ABB** och den franska batteritillverkaren **SAFT** kombinerat två system: ABBs SVC-light, som i dag främst används för att kompensera variationer i ström och spänning i näten och SAFTs litiumjonbatterier som kan lagra energi.

Elbranschen i Sverige som helhet försörjer ca 130 000 anställda och har ett betydande exportvärde, mer än 60 mdr kronor.<sup>37</sup> Därmed är det en av de viktigare inom svenskt näringsliv. Några av de viktiga systemaktörerna i svensk elektroteknisk industri är **ABB**, **Ahlstom**, **Westinghouse** och **Siemens**. Även teknik konsulterna spelar en väsentlig roll för elsystemkompetensen, till exempel **ÅF**, **SWECO**, **Ramböll** med flera. Ett stort antal mindre systemintegratörer och konsulter kompletterar bilden.

Däremot är energilagring som sådan inte definierad som bransch och därför finns heller ingen statistik att tillgå. Det är vidare en tvärteknologisk disciplin som bygger på flera olika fysikaliska och kemiska principer. De befintliga forskningsmiljöerna, primärutvecklingen, produktionen och marknadsfunktionerna är dock oftast specifika för en viss teknologi. Skillnaden är stor mellan att konstruera pumpkraftverk och den kemikompetens som tarvas för att utveckla litiumjonbatterier till nästa fas, eller att med precision tillverka ett svänghjul som roterar med 60 000 varv per minut.

Förutom system- och anläggningskompetens i Sverige är det främst inom batterier med inriktning på fordonsindustrin som förekommer och då i mindre skala. Exportvärdet kan vara 300 - 500 miljoner SEK baserat på att batteritillverkningen sysselsätter 550 perso-

---

<sup>36</sup> Snabb reaktiv effektkompensering innebär att nätspänning och stabilitet kan styras effektivt. Styrning av den aktiva effekten möjliggörs med hjälp av dynamisk energilagring som bidrar till att jämna ut variationer från intermittenta energikällor, såsom vind- och solkraft.

<sup>37</sup>Power Circle, 2009, Kartläggning av Elkraftbranschen

ner i landet.<sup>38</sup> **SAFT** i Oskarshamn har 450 anställda som producerar batterier för stationära tillämpningar, t.ex. telekommunikation. Företaget är en del i den franska koncernen SAFT Groupe SA. **Alelion Batteries** är en avknoppning från **ETC**, Energi Teknik Centrum, som erbjuder litiumjonteknik för bland annat fordon. Fabriken invigdes så sent som i april 2009 och har tjugotalet anställda. Inriktningen är att sätta samman celler från andra tillverkare till paket för olika användningsområden. **CellTech** är ett annat sammansättningsföretag som tillhör teknikhandelsgruppen **Addtech**. **Aventek** i Sollentuna sätter samman olika typer av batteripaket och utför även batteritester.

**Effpower** med bakgrund från **Tudor** och utveckling vid **Chalmers** ägs bland annat av **Volvo Technology Transfer AB**, **Industrifonden** och **Gylling Invest AB**. Produktidéerna bygger på vidareutveckling av blybatteriet till ett bipolärt batteri som ger högre effekt samtidigt som det tål många ur- och uppladdningar. Tillsammans med den österrikiska batteriproducenten **Banner** förbereds inledande serieproduktion.

Nyligen har också bland annat industriforskningsinstitutet **Swerea IFV** tagit initiativ till samarbeten runt batteriteknik som skulle kunna leda till en pilotfabrik i Sverige.

Det finns således initiativ inom batteriteknik, vilket inte minst kan vara viktigt för svensk fordonsindustri, men de är ännu av mycket begränsad storlek jämfört med den kapacitet som finns och de investeringar som görs i Japan, Kina och Sydkorea.

**Svensk forskning** kring batteriteknik finns företrädesvis vid **Ångströmlaboratoriet** i Uppsala - Advanced Battery and Fuel Cell Centre räknas som en av Europas ledande grundforskningsmiljöer inom utveckling av material för energilagring och energiomvandling i batterier och bränsleceller. Även för svänghjul pågår kommersialisering av forskningsresultat från Ångströmlaboratoriet. Andra tekniska högskolor, särskilt **Chalmers** och **KTH**, berör inom sina program energilagringsteknik.

---

<sup>38</sup> Ibid.

## Slutsatser

**Förmågan att lagra energi kommer att bli allt viktigare i framtidens energilandskap.** Utvecklingen drivs av den ökande användningen av elektricitet i samhället, den ökande andelen förnybara intermittenta kraftkällor som ansluts till näten samt den mer decentraliserade elförsörjningsstrukturen som växer fram.

**Marknaden för energilagring i elnäten har knappt kommit igång.** De energilager som gärna lyfts som goda exempel är i många fall installationer som är tjugo till trettio år gamla och uppfördes på andra premisser än de som råder nu. Idag är behoven buffertar för de intermittenta förnybara kraftslagen och teknik för att försäkra kvaliteten på den elektriska leveransen.

**Det finns redan positiva investeringskalkyler för energilager** genom bättre reglering av näten, mer topplastkapacitet och utjämning av förnyelsebar elproduktion. I vissa situationer är de konkurrenskraftiga alternativ som kan användas för att skjuta upp nätinvesteringar och för att förbättra kvaliteten och tillgängligheten. Genom att påvisa möjligheten till flera intäktströmmar från samma investering - att stapla fördelarna på varandra - kan kalkylerna bli ännu bättre.

**Behoven är uppenbara men marknadens tillväxttakt är osäker.** Det görs många olika antaganden om tillväxt, var den kommer att ske och inom vilken teknik. Vi ser sammantaget att det fortfarande finns många osäkra faktorer, för teknikutvecklingen som sådan och vad gäller hur energilagren ska betalas och av vem. Därför är marknadsprognoser som bäst att betrakta som vägledande och punkter för jämförelser av antaganden.

**Ett enkelt och troligt scenario** är att den nödvändiga tekniken vid behov väljs och inkluderas i nät- och produktionsinvesteringar. Det finns trots allt tillräckligt med lösningar att välja mellan. Kostnaderna kommer att anpassas i takt med att tekniken prövas och volymerna ökar. Affärsmöjligheterna på kort sikt finns framförallt hos befintliga systemleverantörer och integratörer.

**Slutsatsen blir att energilagring för elnät praktiskt inkluderas som en komponent bland många i den erfarenhet som finns i branschen av system och anläggnings-teknik.** I de stora volymerna blir de naturliga delar i större anläggningsprojekt, men också förekommer som enstaka utplacerade energilager med specifika uppgifter – till exempel för ökad elkvalitet.

Marknaden kommer att accelerera när utbyggnaden av förnybara intermittenta kraftkällor inte kan fortsätta utan att de kombineras med ny energilagringkapacitet. Den punkten är redan nådd på några ställen i världen. Praktiska överväganden om verkningsgrad

men också robusthet, tillgänglighet, livslängd, underhållskostnader etc. kommer att avgöra vilka tekniker som kommer att bli vanligast.

Det går inte att utesluta att leverans- eller affärsmodellerna för hur energilagren ska betalas kan ta sig nya former, men ännu finns det väldigt lite som tyder på att det blir radikala strukturförändringar inom kraftteknik- och elbranschen. För branschen är det troligt att fördelarna med sådana lösningar verkligen måste bevisas innan de kan göra anspråk på - förmodligen rätt specifika - delar av marknaden.

## Referenser

- ABB**, 2011, Pressrelease: ABB levererar första energilagret för lågspänningsnät till Falbygden Energi
- Africa Online**, 2010, Guest Editorial, WinAfrique Technologies
- BCC Research**, 2011, Utility-scale Electricity Storage Technologies: Global Markets
- Boston Consulting Group**, 2010, Electricity Storage - Making large scale adoption of wind and solar energies a reality
- Boston Consulting Group**, 2011, Revisiting Electricity Storage – There is a business case
- Commonwealth Scientific and Industrial Research**, 2009, UltraBattery: no ordinary battery
- Environmental Health Perspective**, Holzman David C, 2007, The Vanadium Advantage: Flow Batteries Put Wind Energy in the Bank
- EPRI (Electrical Power Research Institute)**, 2010, Electric Energy Storage Technology Options - A Primer on Applications, Costs & Benefits
- EPRI (Electrical Power Research Institute)**, 2011, State of the Technology Report
- European Wind Energy Association**, 2011, Pure Power 2011
- Europeiska kommissionen SETIS**, Electricity storage in the power sector
- Global Wind Energy Council**, 2010, Global Wind Report
- GreenTech Media**, februari 2011, Fuel Cells: The Future or a Flop?
- IFandP Research**, Energy Storage, 2010, Changing the rules of the game
- KEMA**, 2009, Energy island is an innovative concept for large-scale electricity storage
- Lux Research**, 2011, Lux Smart Grid and Grid Storage Intelligence
- MIT Technology Review**, mars 2011, Superconducting Magnets for Grid-Scale Storage
- NPR (National Public Radio)**, 2010, In Texas, One Really Big Battery, <http://www.npr.org>
- Pike Research**, 2010, Energy Storage on the grid
- Power Circle**, Kartläggning av Elkraftbranschen, 2009
- REN21**, 2011, Global Status Report on Renewable Energy

**Renewable Energy World**, 2009, Hydropower in Europe: Current Status, Future Opportunities

**SBI Energy**, 2010, SBI Energy Report

**Svenska Kraftnät**, 2008, Storskalig utbyggnad av vindkraft. Konsekvenser för stamnätet och behovet av reglerkraft

**US Department of Energy, Electricity Advisory Committee**, 2011, Energy Storage Technologies Subcommittee Energy Storage Activities in the United States Electricity Grid

**Visionagain**, 2010, The Energy Storage Technologies (EST) Market 2011-2021

## Appendix: Olika energilagars effektivitet

En av de viktigaste egenskaperna hos energilagrar är både tekniskt och ekonomiskt perspektiv är dess effektivitet. **Round-trip efficiency** (RTE) är ett begrepp som används för att ange hur bra ett energilager är på att lämna tillbaka den energi som från början har lagrats. RTE är lika med kvoten energi ut/energi in. Förlusterna uppstår i systemet i form av kylning, värmning, pumpar, DC/AC och AC/DC-konvertering, styr-, kontroll- och säkerhetsutrustning. I batterier sker förluster också i cellstackar och elektrolyt, medan det i andra energilagrar förekommer mekaniska förluster i form av friktionsvärme.

ENERGILAGER	ROUND TRIP EFFICIENCY	ANM.
Batterier Bly/Syra	75 - 80 procent	
Batterier Li-jon	85 - 95 procent	Lägre nivåerna inkl kringutrustning
Batterier NaS	75 - 85 procent	
Batterier NiCd	65 procent	
Batterier NiMH	85 - 95 procent	
Batterier VRB	65 - 75 procent	
Batterier ZnBr	60 - 75 procent	
Bränsleceller	40 - 60 procent	Systemverkningsgrad: se vätgassystem med bränsleceller
Tryckluft (CAES)	50 - 70 procent	Ca 70 procent sett ur elektriskt perspektiv
Svånghjul	85 - 90 procent	Med magnetlager och vakuumneslutning
Pumpkraft	75 - 85 procent	
SMES	95 procent	Inklusive förluster i kylsystemet
Superkondensatorer	85 - 98 procent	
Vätgassystem med bränsleceller	20 - 30 procent	Inkluderar hela värdekedjan

### Källor:

Beacon Power, Frequency Regulation and Flywheels fact sheet (<http://beaconpower.com>)  
 Benitez et al., 2006, The Economics of Wind Power with Energy Storage, REPA working paper  
 BINE Informationsdienst, Druckluft Speicherkraftwerke Integration von regenerativen Stromerzeugern Projektinfo 05/2007  
 Bossel, U., 2006, Does a Hydrogen Economy Make Sense?, IEEE Proceedings  
 Europeiska Kommissionen/Setis, Electricity storage in the power sector (<http://setis.ec.europa.eu/>)  
 Garcia et al., 2006, Round Trip Energy Efficiency of NASA Glenn Regenerative Fuel Cell System, NASA TM 2006-214054  
 IEEE, NAS Battery Control Optimization (<http://www.ewh.ieee.org>)  
 Sandberg, C, Charging the Energy Revolution, Altair Nano  
 Stine, W.B. & M. Geyer, 2001, Power from the sun  
 US Department of Energy, 2008, Market Analysis of Emerging Electric Energy Storage Systems  
 VRB East Europe Ltd. (<http://www.vrbeasteurope.hu>)  
 Zelinsky et al., 2010, Heat tolerant NIMH batteries for stationary power, Battcon 2010 proceedings



# VINNOVAs publikationer

Mars 2012

För mer info eller för tidigare utgivna publikationer se [www.vinnova.se](http://www.vinnova.se)

## VINNOVA Analys

### VA 2012:

- 01 Impact of innovation policy - Lessons from VINNOVA's impact studies. *För svensk version se VA 2011:10*
- 02 Lösningar på lager - Energilagringstekniken och framtidens hållbara energiförsörjning
- 03 Friska system - eHälsa som lösning på hälso- och sjukvårdens utmaningar
- 04 Utan nät - Batterimarknadens utvecklingsmöjligheter och framtida tillväxt
- 05 Sveriges deltagande i sjunde ramprogrammet för forskning och teknisk utveckling (FP7) - Lägesrapport 2007 - 2011. *Finns endast som PDF*

### VA 2011:

- 01 Smart ledning - Drivkrafter och förutsättningar för utveckling av avancerade elnät
- 02 Framtid med växtverk - Kan hållbara städer möta klimatutmaningarna?
- 03 Life science companies in Sweden including a comparison with Denmark
- 04 Sveriges deltagande i sjunde ramprogrammet för forskning och teknisk utveckling (FP7) - Lägesrapport 2007-2010, fokus SMF. *Finns endast som PDF. För kortversion se VA 2011:05*
- 05 Sammanfattning Sveriges deltagande i FP7 - Lägesrapport 2007-2010 - Fokus SMF. *Kortversion av VA 2011:04*
- 06 Effektanalys av forskningsprogram inom material från förnyelsebara råvaror
- 07 Effektanalys av starka forsknings- & innovationssystem. *Finns endast som PDF. För kortversion se VA 2011:08*
- 08 Sammanfattning - Effektanalys av starka forsknings- & innovationssystem. *Kortversion av VA 2011:07*
- 09 Samarbete mellan Sverige och Kina avseende vetenskaplig sampublicering - aktörer, inriktning och nätverk. *Finns endast som PDF*
- 10 När staten spelat roll - lärdomar av VINNOVAs effektstudier. *För engelsk version se VA 2012:01*

## VINNOVA Information

### VI 2012:

- 02 Så blir Sverige attraktivare genom forskning och innovation - VINNOVAs förslag för ökad konkurrenskraft och hållbar tillväxt till regeringens forsknings- och innovationsproposition
- 03 Idékatalog - Sociala innovationer för äldre
- 04 Innovation i offentlig upphandling - Ett verktyg för problemlösning
- 05 Årsredovisning 2011
- 06 Färdplaner för framtidens fordon och transporter - Strategiska milstolpar framtagna av myndigheter och fordonsindustrin inom samverkansprogrammet FFI

### VI 2011:

- 01 Framtidens personresor - Projektkatalog
- 02 Miljöinnovationer - Projektkatalog
- 03 Innovation & Gender
- 04 Årsredovisning 2010
- 05 VINN Excellence Center - Investing in competitive research & innovation milieus
- 06 VINNOVA Sweden's Innovation Agency
- 07 Challenge-driven Innovation - VINNOVA's new strategy for strengthening Swedish innovation capacity. *För svensk version se VI 2011:08*
- 08 Utmaningsdriven innovation - VINNOVAs strategi för att stärka svensk innovationsförmåga och skapa nya hållbara lösningar för näringsliv och offentlig verksamhet. *För engelsk version se VI 2011:07*
- 09 *UTGÅR, ersätts av VI 2012:02*
- 10 Projektkatalog - Innovationer för framtidens hälsa.
- 11 *UTGÅR, ersätts av VI 2012:06*
- 12 Projektkatalog Smartare, snabbare, konvergerande lösningar - inom området IT och data/tele-kommunikation i programmet Framtidens kommunikation
- 13 *UTGÅR, ersätts av VI 2012:04*

## **VINNOVA Policy**

### **VP 2011:**

- 01 Tjänstebaserad innovation - Utformning av insatser som möter behov hos företag och organisationer. *Finns endast som PDF*
- 02 Regeringsuppdrag Kina - "Föreslå områden för förstärkt långsiktigt forsknings-, innovations- och utbildningssamarbete med Kina" U2010/7180/F. *Finns endast som PDF*
- 03 Behov av kunskap och kompetens för tjänsteinnovationer
- 04 Utveckling av Sveriges kunskapsintensiva innovationssystem - Huvudrapport - Underlag till forsknings- & innovationsproposition
- 05 Utveckling av Sveriges kunskapsintensiva innovationssystem - Bilagor - Underlag till forsknings- & innovationsproposition

## **VINNOVA Rapport**

### **VR 2012:**

- 01 Utvärdering av Strategiskt gruvforskningsprogram - Evaluation of the Swedish National Research Programme for the Mining Industry
- 02 Innovationsledning och kreativitet i svenska företag
- 03 Utvärdering av Strategiskt stålforskningsprogram för Sverige - Evaluation of the Swedish National Research Programme for the Steel Industry
- 04 Utvärdering av Branschforsknings-program för IT & Telekom - Evaluation of the Swedish National Research Programme for IT and Telecom
- 05 Metautvärdering av svenska branschforsknings-program - Meta-evaluation of Swedish Sectoral Research Programmes
- 06 Utvärdering av kollektivtrafikens kunskapslyft. *Finns endast som PDF*

### **VR 2011:**

- 01 Hundra år av erfarenhet - Lärdomar från VINNVÄXT 2001 - 2011
- 02 Gender across the Board - Gender perspective on innovation and equality. *För svensk version se VR 2009:20*
- 03 Visioner och verklighet - Några reflexioner kring eHälsostategin för vård och omsorg. *Finns endast som PDF*

- 04 Hälsa genom e - eHälsorapporten 2010. *Finns endast som PDF*
- 05 Halvtidsutvärdering av branschforskningsprogrammet för skogs- & träindustrin - Mid-term evaluation of the Swedish National research programme for the forest-based sector
- 06 Leadership Mandate Programme - The art of becoming a better centre director. *För svensk version se VR 2010:18*
- 07 The policy practitioners dilemma - The national policy and the transnational networks
- 08 Genusvägar till innovation - Erfarenheter från VINNVÄXT. *Finns endast som PDF*
- 09 Att utveckla Öppna Innovationsarenor - Erfarenheter från VINNVÄXT.
- 10 White Spaces Innovation in Sweden - Innovation policy for exploring the adjacent possible
- 11 Etapputvärdering av centrumbildningen Virtual Prototyping and Assessment by Simulation - ViP. *Finns endast som PDF*
- 12 Tjänsteinnovationer i offentlig sektor - Behov av forskningsbaserad kunskap och konsekvens
- 13 Competences supporting service innovation - a literature review. *Finns endast som PDF*
- 14 Innovationsdrivande forskning i praktiken - Samverkan mellan forskare och praktiker för att skapa organisatoriska innovationer. *Finns endast som PDF*
- 15 Det offentliga stödsystemet för hantering av företags immateriella tillgångar - Kartläggning och analys
- 16 Innovative Growth through Systems Integration and Globalisation - International evaluation of the 2004 VINNVÄXT programme initiatives
- 17 Ready for an early Take Off? - International evaluation of the VINNVÄXT initiatives in early stages

**Produktion & layout:** VINNOVAs Kommunikationsavdelning

**Tryck:** Trosa Tryckeri AB, Trosa, [www.trosatryckeri.se](http://www.trosatryckeri.se)

Mars 2012

**Försäljning:** Fritzes Offentliga Publikationer, [www.fritzes.se](http://www.fritzes.se)

**Ett allt mer decentraliserat elnät, med en ökande andel intermittenta förnybara energikällor, kombinerat med begränsningar i det befintliga kraftnätet ställer höga krav på nya energilagringstekniker. Förmågan att kunna lagra energi kommer därför att vara kritiskt i de elnät som nu växer fram i världen. Den här rapporten analyserar hur den framväxande marknaden för energilagringlösningar ser ut, vilka tekniker som kommer att slå igenom och vilka tillämpningar som kommer att växa.**

ISBN 978-91-86517-62-5, ISSN 1651-355X



---

VERKET FÖR INNOVATION SYSTEMS – SWEDISH GOVERNMENTAL AGENCY FOR INNOVATION SYSTEMS

VINNOVA, SE-101 58 Stockholm, Sweden Besök/Office: Mäster Samuelsgatan 56  
Tel: +46 (0)8 473 3000 Fax: +46 (0)8 473 3005  
VINNOVA@VINNOVA.se www.VINNOVA.se