

Energilagring

Teknik för lagring av el

IVA-projektet *Vägval el*



ORDLISTA

AA-CAES – adiabatiskt tryckluftslager (adiabatic compressed air energy storage)	MW – megawatt
AEC – alkalisk elektrolys	MWh – megawatttimme
CAES – tryckluftslager (compressed air energy storage)	m³ – kubikmeter
CH₄ – metangas	Nm³ – normalkubikmeter
CT – förbränningsturbin	NaS – natriumsvavel
DoE – Amerikanska energidepartementet	UPS – kontinuerlig kraftkälla (uninterrupted power supply)
EEA – Europeiska ekonomiska zonen	PEM – polymeriskt elektrolysmembran (polymer electrolyte membrane/proton exchange membrane)
GW – gigawatt	SMES – magnetisk energilagring med hjälp av supraledare (Superconducting Magnetic Energy Storage)
GWh – gigawatttimme	VRB – Vanadin redox-batteri
H₂ – vätgas	Wh – wattimme
kW – kilowatt	
kWh – kilowatttimme	

KUNGL. INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN (IVA) är en fristående akademi med uppgift att främja tekniska och ekonomiska vetenskaper samt näringslivets utveckling. I samarbete med näringsliv och högskola initierar och föreslår IVA åtgärder som stärker Sveriges industriella kompetens och konkurrenskraft. För mer information om IVA och IVAs projekt, se IVAs webbplats: www.iva.se.

Utgivare: Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademien (IVA), 2015
Box 5073, SE-102 42 Stockholm
Tfn: 08-791 29 00

IVA-R 482
ISSN: 1102-8254
ISBN: 978-91-7082-901-7

Författare: Anna Nordling, Ronja Englund,
Alexander Hembjer & Andreas Mannberg
Projektledare: Anna Nordling, ÅF
Redaktör: Camilla Koebe, IVA
Layout: Anna Lindberg & Pelle Isaksson, IVA

Denna studie finns att ladda ned som pdf-fil
via IVAs hemsida www.iva.se

Innehåll

Sammanfattning	4
1. Inledning	5
2. Energilagring inom elområdet	6
Tillämpning	9
3. Tekniker för energilagring	11
Pumpvattenkraft	11
Lagring av komprimerad tryckluft	12
Batterier	14
Power to Gas	17
Svänghjul (Flywheel)	18
Magnetisk energilagring med hjälp av supraledare	19
Superkondensatorer	19
4. Jämförelse mellan olika lagringstekniker	20
5. Bilaga	21
Fotnoter	21
Litteraturlista	22

Sammanfattning

Behovet av energilagring ökar i takt med ökad andel icke planerbar elproduktion i energisystemet. Beroende på vilken typ av elproduktion som används och hur behovet ser ut krävs olika typer av lagringsteknik. De vanligast förekommande teknikerna för energilagring är idag pumpvattenkraft, batterier, tryckluft och svänghjulslagring.

De vanligaste drivkrafterna och användningsområdena för energilagring listas nedan:

- Utnyttjande av prisdifferenser (arbitragemöjligheter)
- Balansering av energi/elbalans
- Uppstart vid black-out
- Stabilisering av konventionell elproduktion
- Lagring för ö-drift och icke anslutna system
- Förskjutning av investeringar (T&D deferral)
- Kapande av effekttoppar inom industrin
- Energilagring för bostäder

Olika tekniker för energilagring har olika möjligheter att tillämpas i energisystemet. Kapacitet, kostnader, energitäthet (energy density), effektivitet och teknisk respektive ekonomisk livslängd är faktorer som bestämmer i vilka sammanhang teknikerna är mest lämpliga att använda. Pumpvattenkraft och tryckluft

är till exempel båda användbara för effektbalansering, medan batterier passar bäst som reservkraft och för ö-drift och icke anslutna system. Men större batterianläggningar kan i framtiden komma att användas även för andra ändamål. Geografiska förutsättningar är exempel på ytterligare faktorer som man måste ta hänsyn till vid applicering av pumpvattenkraft och tryckluftslager.

Det är troligt att samtliga lagringstekniker i framtiden kommer att tillämpas i någon form, men den teknik som i dag utvecklas snabbast är batterier. En anledning till detta är att batterier kan tillämpas i liten skala i hushåll och bilar, men också kan tillämpas i större skala genom att flera moduler sätts samman. Den senaste utvecklingen av Teslas batterier indikerar även att kostnadsnivån kommer att sjunka snabbare än förväntat. Eftersom batterier kan produceras småskaligt blir tröskeln väldigt låg till utbredd kommersialisering.

Pumpvattenkraft förväntas få den största tillväxten i Kina och Indien där det finns tillräckligt med geologiska förutsättningar för att bygga effektiva anläggningar. Andra länder måste överväga övriga okonventionella tekniska pumpvattenkraftslösningar, såsom till exempel pumpande av sjö/havsvatten samt lagring i underjordiska grottor.



Tryckluftstekniken kommer troligen att bli mest använd i USA där ett antal lämpliga platser redan valts ut för tryckluftsanläggningar. Projekt planeras även inom EU där man för närvarande utvecklar de första adiabatiska tryckluftslösningarna.

Energilagring i EU är för närvarande fokuserad kring tre olika områden: småskalig användning, arbitrage och minskande av kapacitetstoppar¹. Drivkrafter för lagringsmarknaden i Europa är:

1. Användning i micro-grids som är isolerade från elnätet.²
2. Batterier i hemmet i kombination med solceller (främst i Tyskland för tillfället).³

Det finns fortfarande legala barriärer för energilagring och definitionen av energilagring och reglerna kring ägarskap är inte tydliga. Enligt det svenska regelverket får elnätsföretagen äga energilager, men de får endast använda dem om det syftar till att täcka nätförluster eller tillfälligt ersätta utebliven el vid elavbrott. Det vill säga – energilager får bara användas i nödfall. Detta måste justeras i Ellagen om energilager ska bli en attraktiv affär för nätbolagen.

I Sverige förväntas batterier öka sin andel i det framtida energisystemet, dels i hemmen och dels som en del av det framtida eldrivna transportsystemet. Även andra former av ellagring kommer att utvecklas i Sverige. Prisutvecklingen avgör vilka det kommer att bli.

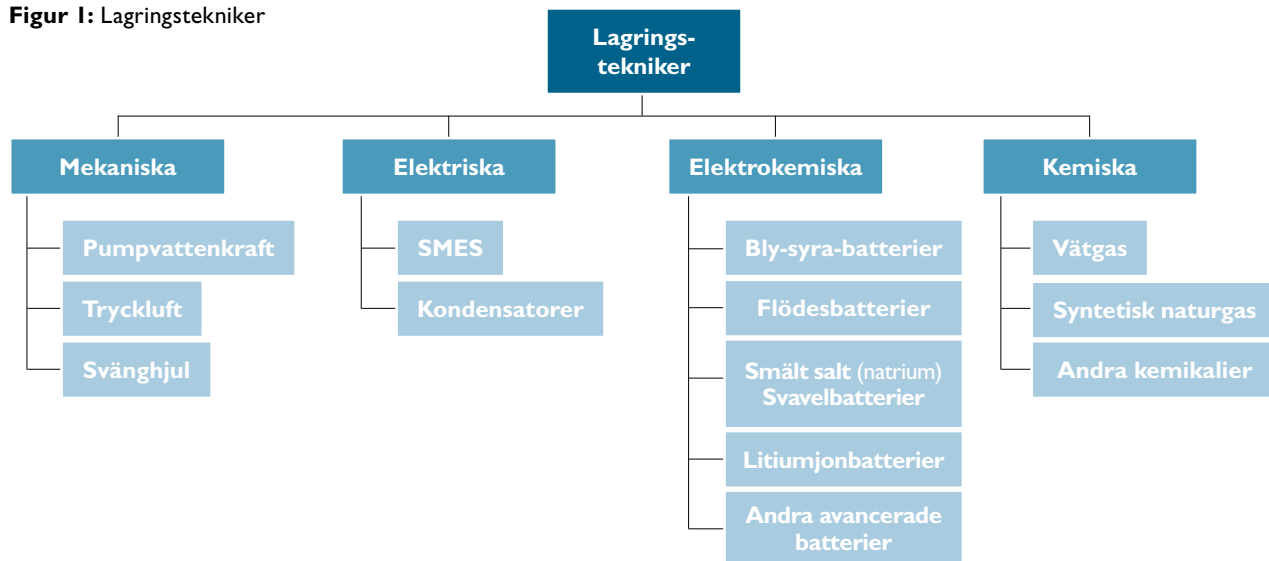
I. Inledning

Elsystemet måste ständigt vara i balans, dvs. elproduktion och elbehov måste matchas i varje sekund. När elproduktionen inte kan styras och inte naturligt sammanfaller med behovet av el uppstår behovet av energilagring (ellagring). Genom att kunna lagra den överskottsenergi som produceras för att senare använda den då behovet är större än utbudet kan energisyste-

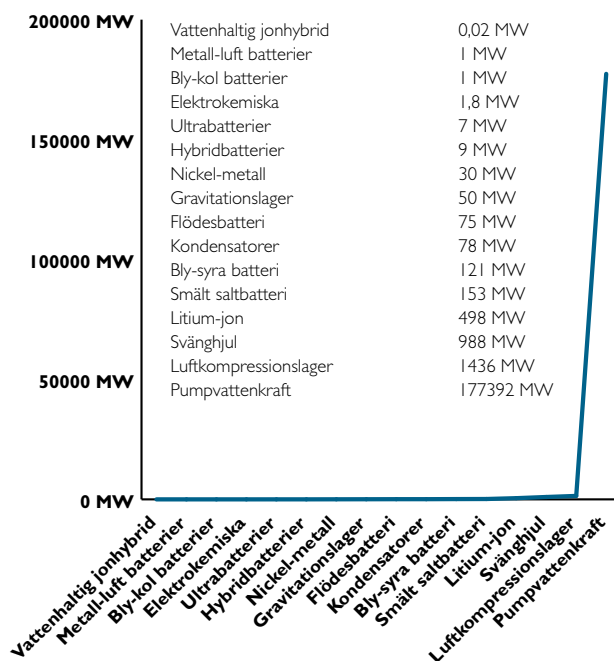
met hållas i balans utan ständig matchning av produktion och konsumtion. Denna rapport sammanfattar kunskaperna från en rad rapporter avseende energilagring. Fokus i denna rapport är energilagring genom mekanisk, elektrisk, elektrokemisk och kemisk lagring. Listan på rapporter och övriga källor som rapporten täcker återfinnes i litteraturförteckningen.

2. Energilagring inom elområdet

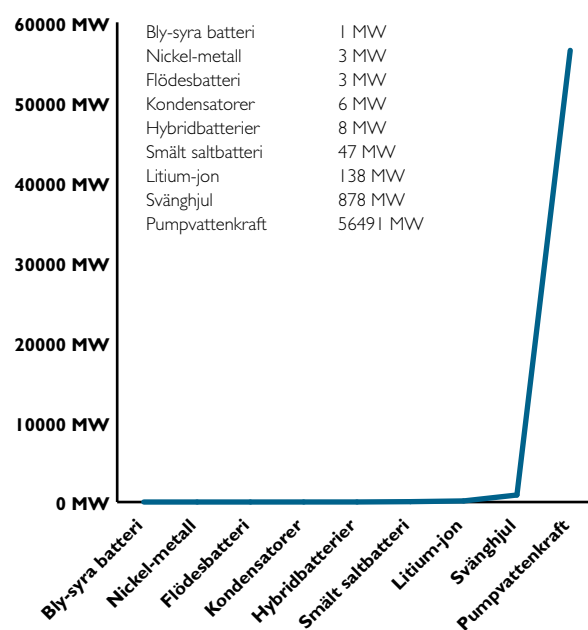
Figur 1: Lagringstekniker



Figur 2: Global installerad lagringseffekt, MW.⁴



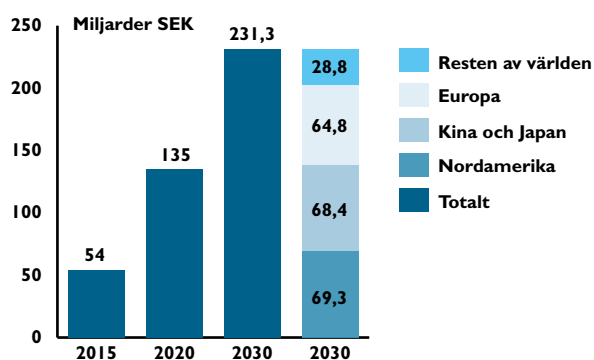
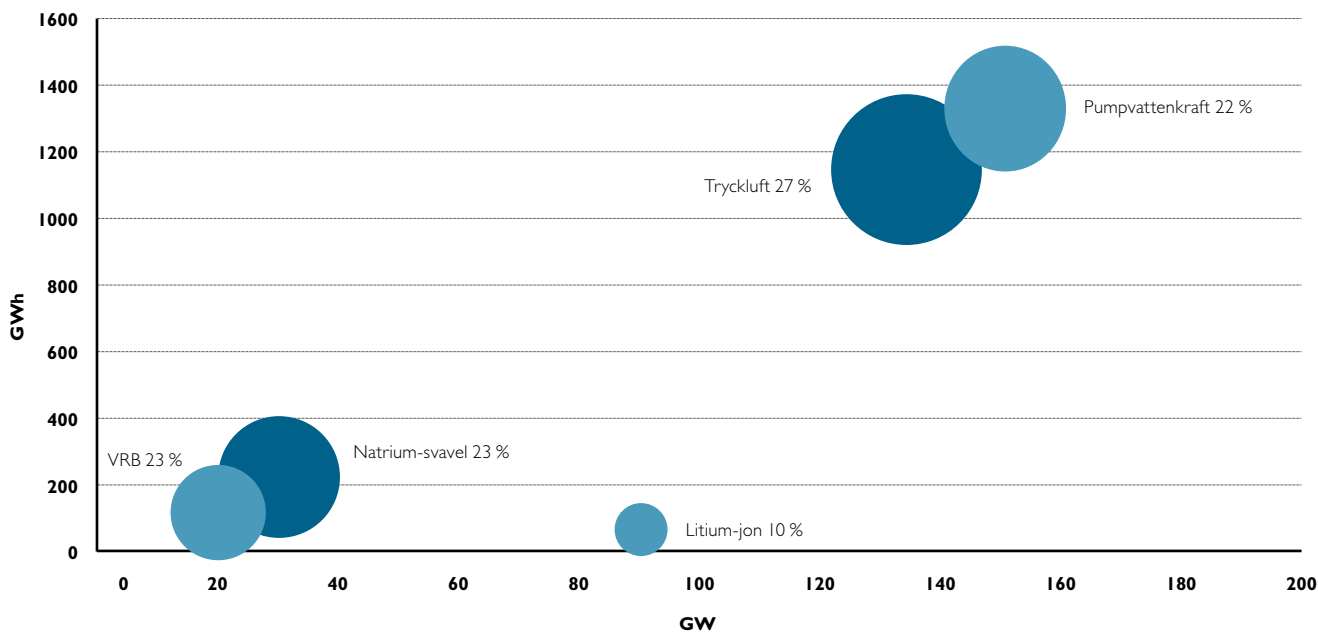
Figur 3: Installerad lagringseffekt i EEA, MW.⁵



Behoven av att kunna lagra energi i energisystemet kommer att öka i betydelse i takt med att andelen icke planerbar elproduktion ökar i energisystemet. Figur 1 visar en schematisk bild av olika tekniker för energilagring (el) uppdelat på huvudsaklig fysikalisk energiomvandlingsteknik/lagringsteknik. Rapporten behandlar inte lagring av värme.

Marknaden för energilagring är ännu relativt

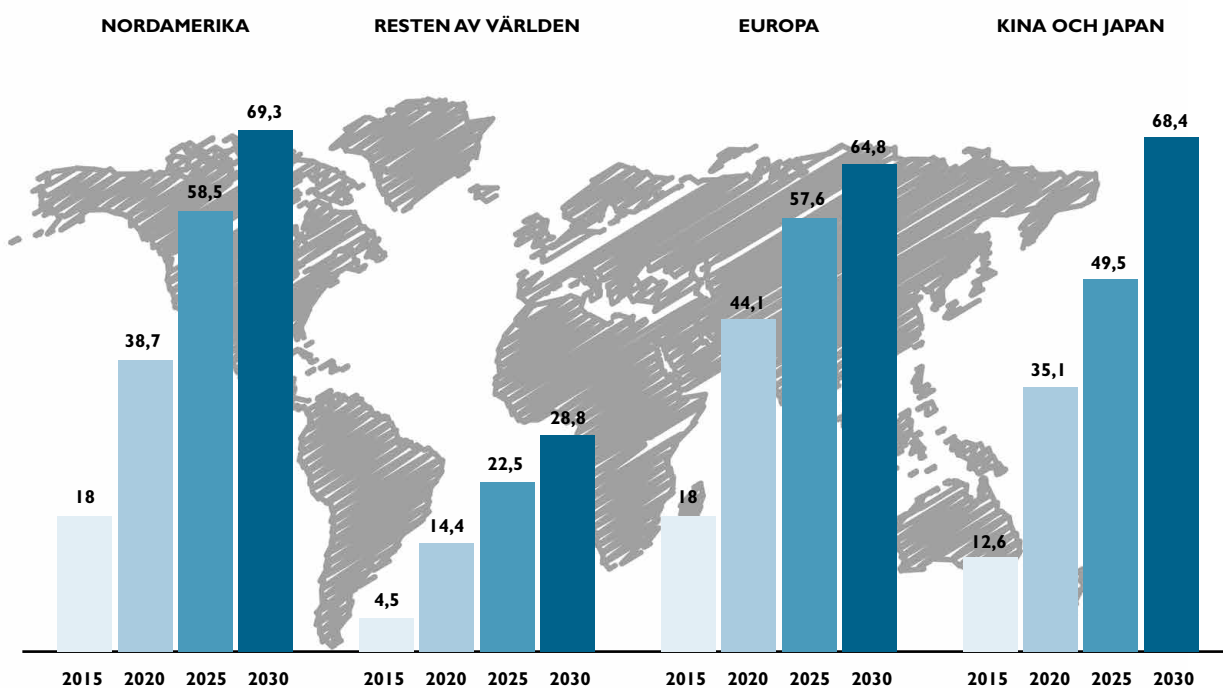
begränsad och ett fåtal tekniker har uppnått kommersiellt stadium i större skala. Figur 2 och 3 visar existerande, planerad och kapacitet under uppbyggnad (2014) av mekaniska och elektrokemiska lager. Uppgifterna bakom dessa diagram har hämtats från databasen för energilagring hos amerikanska energidepartementet (DoE). De olika lagringsteknikerna som visas i figur 2 beskrivs närmare i kapitel 3.



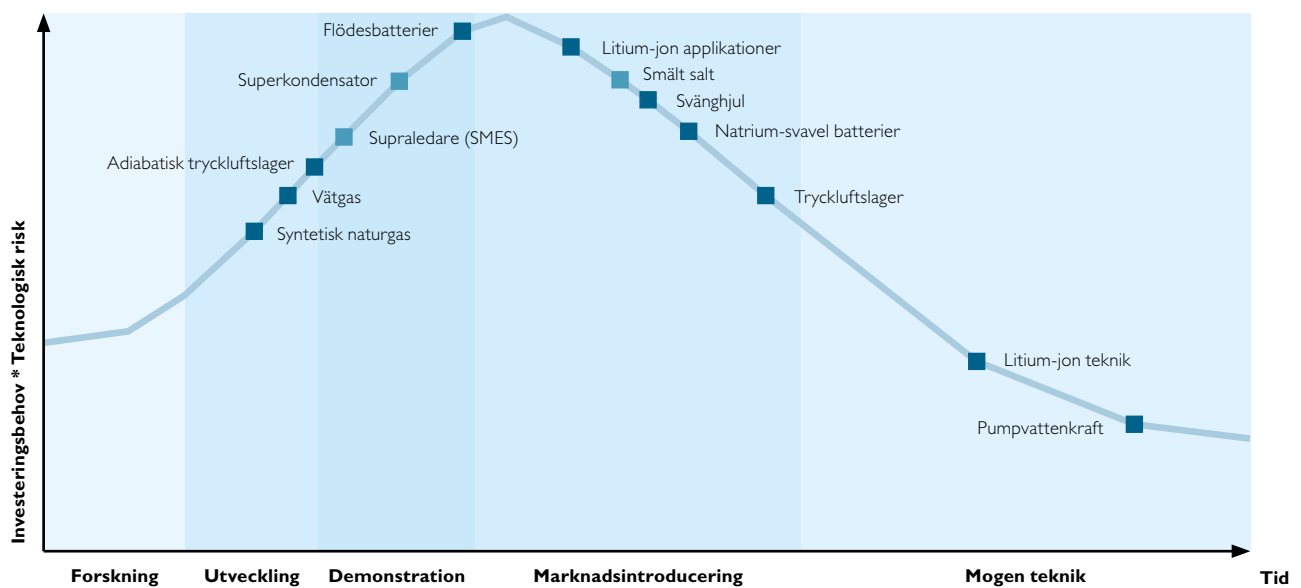
Figur 4 (ovan): Potential för olika ellagringstekniker i världen 2030.⁶

Figur 5 (vänster): Förväntad utveckling av marknaden för energilagring.⁷

Figur 6 (nedan): Marknadsutveckling energilagrar i miljarder SEK.⁸



Figur 7: De olika lagringsteknikernas mognadsgrad.⁹



Tabell 1: Tillämplighet av energilager.¹⁰

Del i energisystemet				
Funktion		Transmissionssystemet och central lager (nationell och Europeisk nivå)	Distributionssystemet och regional lager (stads- och områdesnivå)	Konsument (byggnad- och hushållsnivå)
	Balans mellan utbud och efterfrågan	- Säsong/vecko/dygns/timvariationer - Stora geografiska obalanser - Stora variationer på grund av intermittent elprodukten	Dagliga/timvariationer	Dagliga variationer
	Distribution (flytt av energi)	- Spänning och frekvensreglering - Ytterligare peak-produktion - Effektmarknad - Internationell marknad	- Spänning och frekvensreglering - Effektmarknad	Aggregering av små lager för att avhjälpa distributionsbehov (kapacitetsproblem och reduktion av förluster)
	Energi-effektivisering	Bättre energieffektivitet i den globala energimixen	Last- och lagringskontroll för bättre effektivitet i distributionsnätet	Lokal produktion och konsumtion, förändring i beteende, ökat värde av lokal produktion

Tabell 2: Olika lagringsteknikers applikationsområden.

- Passande teknologi för applikationen
- Mer teknikutveckling eller ytterligare kostnadsreduktion behövs
- Icke passande teknologi för applikationen

	Elkvalitet och stabilitet	Lokal energioptimering	Flytt av energi i tiden (dagar eller längre)	Skjuta upp investeringar inom T&D	Reservkraft/ UPS
Pumpvattenkraft	■	■	■	■	■
Tryckluft	■	■	■	■	■
Bly-syra batteri	■	■	■	■	■
Litium-jon batteri	■	■	■	■	■
Natrium-svavel batteri	■	■	■	■	■
Flödesbatteri	■	■	■	■	■
Superkondensatorer	■	■	■	■	■
SMES	■	■	■	■	■
Svänghjul	■	■	■	■	■

I Revisiting Energy Storage¹¹ beskriver Boston Consulting Group (BCG) uppskattad marknadspotential för olika tekniker, detta beskrivs i Figur 4. Batterier förväntas stå för ungefär hälften av energilagringen av elektrisk energi. I termer av elektrisk effekt förväntas pumpvattenkraft respektive tryckluftsteknik vara dominerande på marknaden år 2030. Pumpvattenkraft och tryckluftsteknik förväntas successivt ersättas av vätgaslagring från år 2020. De tekniker för batterilagring som förväntas dominera på marknaden är Natriumsvavel-batterier (NaS), VRB (Vanadinredox-batteri) och Litiumjon-batterier.

Grafen ovan visar en syn på marknaden, men den kan komma att ändras på grund av den snabba prisutvecklingen av batterier, se figur 11.

BCG uppskattar vidare att försäljning av lagringstekniker kommer nå 54 miljarder kronor under 2015, 135 miljarder kronor 2020 och 234 miljarder kronor 2030 (figur 5). Den största utvecklingen förväntas ske i Nordamerika, Kina, Japan och Europa.¹²

Figur 6 beskriver den förväntade utvecklingen uppdelat på de olika marknaderna.

Som tidigare nämnts befinner sig de olika lagringsteknikerna i olika marknadsrelaterade mognadsskeden. Figur 7 visar var de olika teknikerna befann sig i mognadsskalan år 2013.

Tillämpning

Olika energilagringstekniker har olika möjligheter och begränsningar vad gäller tillämpning. Tabell 1 visar på olika funktionalitet i olika delar av energisystemet.

Europa fokuserar på integrering av intermittent elproduktion i energisystemet, medan USA satsar mer på olika sätt att kompensera svagheter i elsystemet. Tabell 2 visar på användningsområden som är mest tillämpliga för respektive teknik givet ovan.

Reservkraft

Lagrad energi kan användas som reservkraft. Nedan ges en förklaring till olika typer av reservkraft.

ROTTERANDE RESERVKRAFT

Kapacitet som är on-line och som kan ha en responstid inom 10 minuter för att kompensera för avbrott i elproduktion eller transmission. Frekvensstyrd roterande reservkraft har en responstid på 10 sekunder i syfte att bibehålla systemets frekvenskrav. Roterande reservkraft är den första typen av anläggning att gå in när underskott uppstår.

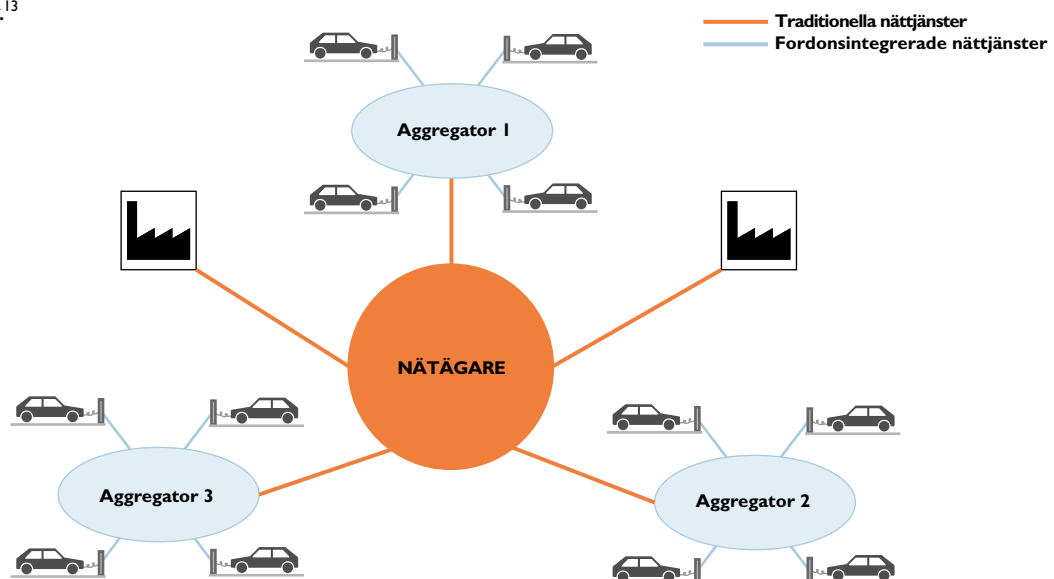
KOMPLETTERANDE RESERV

Kapacitet för elproduktion som kan vara off-line eller som består av ett block av kontrollerbar och/eller frånkopplingsbar last och som kan vara frånkopplingsbar inom 10 minuter. Till skillnad från roterande reservkraft, så är kompletterande reservkraft inte synkroniserad med nätets frekvens. Kompletterande reservkraft används efter det att all roterande reservkraft är on-line.

RESERVFÖRSÖRJNING

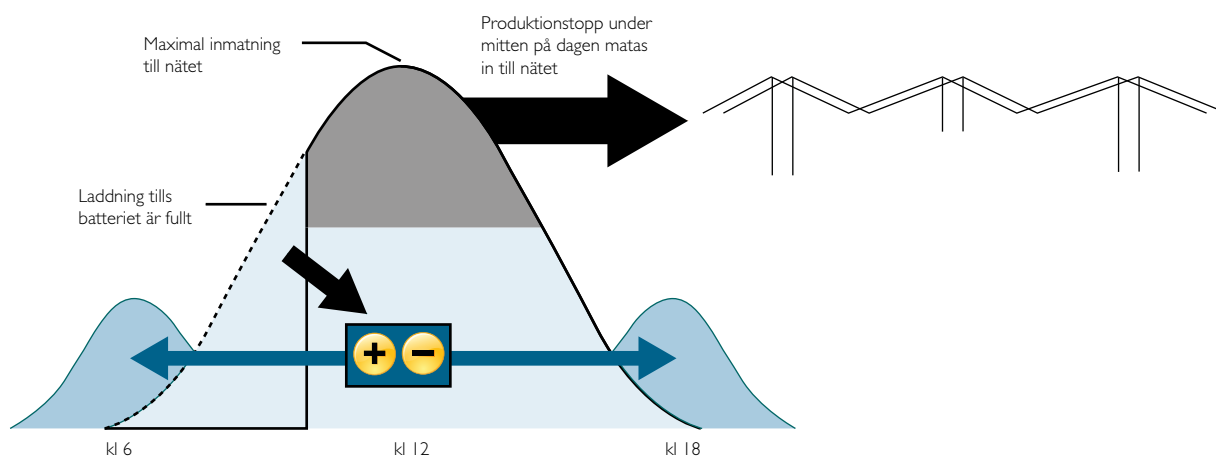
Reservkraft som kan sättas in inom en timme. Huvudsakligen utgör denna en backup för reserverna. Reserverna kan också användas som kommersiella reserver och försäljning.

Figur 8: Bilbatterisystem via aggregatorer.¹³

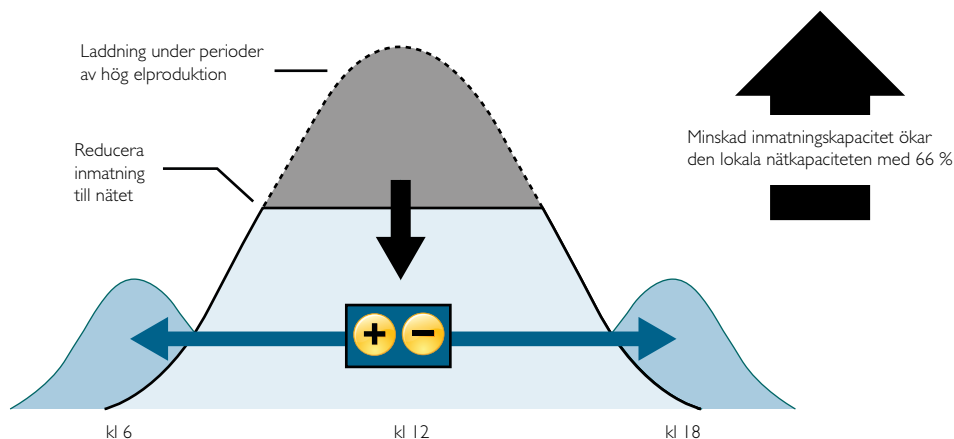


Figur 9: Vanligt energilagringssystem i jämförelse med ett optimerat energilagringssystem.¹⁴

VANLIG ENERGILAGERLÖSNING



OPTIMERAD ENERGILAGERLÖSNING



Elbilar

Eftersom elbilar skulle kunna fungera som små distribuerade energilager kan de med smart teknik och styrning potentiellt fungera som ett aggregerat energilager. Elbilens batteri skulle kunna användas som ett distribuerat element i energisystemet genom en aggregator (tjänstemäklare). Funktionen av ett sådant system illustreras i Figur 8.

Solceller och batterilager

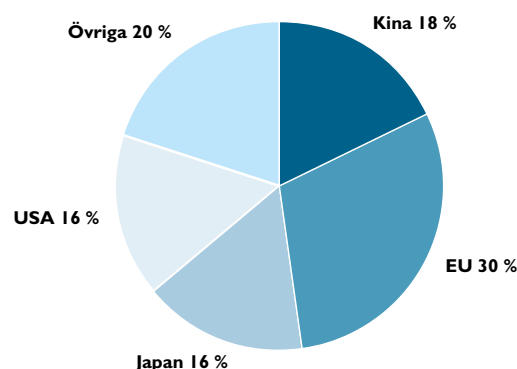
Genom att kontrollera laddningen av batterier och inmatningen av sol-el till nätet kan stora effektiviseringsvinster erhållas. Figur 9 jämför ett vanligt lager med ett nät-optimerat lager.

Ellagen

Det finns fortfarande legala barriärer för energilagring och definitionen av energilagring och regler kring ägarskap är inte tydliga. Enligt det svenska regelverket får elnätsföretagen äga energilager, men de får endast använda dem om det syftar till att täcka nätförluster eller tillfälligt ersätta utebliven el vid elavbrott. Det vill säga – energilager får bara användas i nödfall. Detta måste justeras i Ellagen om energilager ska bli en attraktiv affär för nätbolagen.¹⁵

Tabell 4: Tekniska data för pumpvattenkraftverk.¹⁸

Pumpvattenkraftverk	
Används för	Effekt- och energitoppar; minutreserv
Användningstid	1 till 24 timmar
Kapacitet	Upp till 5000 MW beroende på dammstorlek och höjddifferens
Energidensitet	0,35–1,12 kWh/m ³
Verkningsgrad	65–85 %
Förluster	0–0,5 % per dygn
Start-upp tid	Sekunder till minuter
Livslängd	50–100 år
Produktionsfas	Kommersiellt tillgänglig
Investeringskostnad	4500–32400 SEK/kW (beroende på lokalisering)
Geografiska krav	Höjddifferens

Figur 11: Geografisk fördelning av pumpvattenkraftverk

I Sverige har Fortum två pumpvattenkraftverk; Letten och Kymmen. Dessa två anläggningar beskrivs i tabell 3.

Pumpvattenkraften har störst potential i Kina och Indien, där lämpliga geografiska områden finns för effektiva anläggningar. Övriga länder i världen måste överväga mer okonventionell design som till exempel pumpvattenkraft med saltvatten samt användande av underjordiska vattenmagasin i berggrum.¹⁹

Globalt fanns det år 2011 280 stycken anläggningar med en sammanslagen effekt på 132 GW. Runt 40 av dessa anläggningar har kapacitet på mellan 50 till 2100 MW.²⁰ Dessa anläggningar fördelade sig enligt figur 11.

Pumpvattenkraftanläggningar har kort responstid vilket medför att dessa anläggningar på ett likvärdigt sätt kan svara för spännings- och frekvensstyrning, roterande och icke-roterande reservkraft, såväl som utnyttjande av arbitragemöjligheter och systemkapacitetsupport.²¹

Faktarutorna ovan visar tekniska data för pumpvattenkraftverk.

Lagring av komprimerad tryckluft

System baserat på tryckluftsteknik, Compressed Air Energy Storage (CAES), använder el (när tillgång är större än efterfrågan) för att komprimera luft i en reservoar, antingen i underjordiska grottor/akvifärer, i kärl eller rörledningar ovan jord. Vid tillfällen då efterfrågan på elektricitet istället är högre än tillgången, hettas

den komprimerade luften upp, expanderar, och leds via en expander alternativt genom en konventionell turbin-generator för att producera elektricitet. Figur 12 är en schematisk bild av en CAES-anläggning med underjordisk lagring i form av en grotta i en saltgruva/täkt.

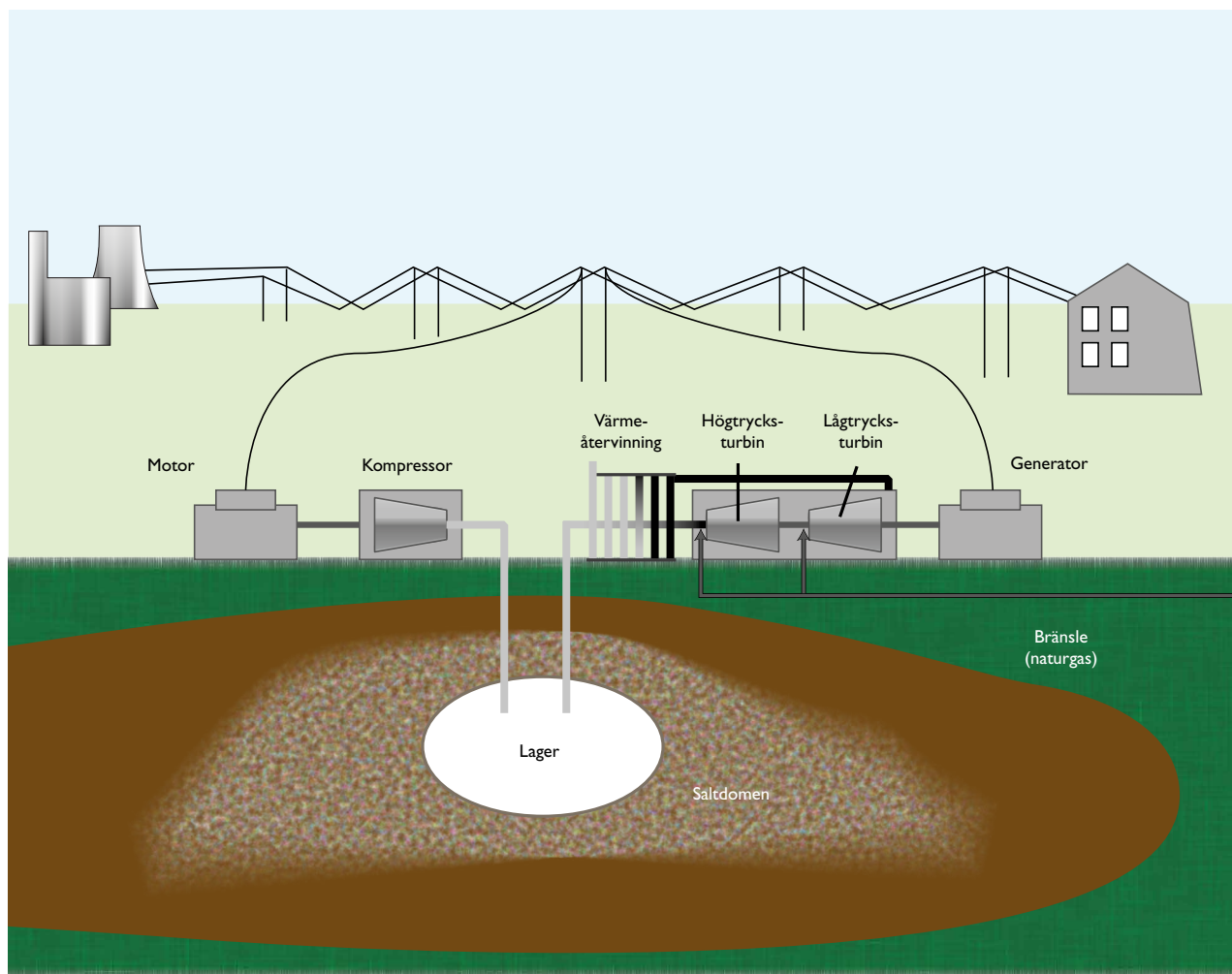
Vid kompression avgår dock stora mängder värme och utan återvinning av denna värme har CAES en låg verkningsgrad (42–54 procent). Nuvarande generationens CAES återvinner inte denna värme, och utmaningen för nästa generation CAES är de mycket höga temperaturerna som kan uppgå till 650°C eller mer, vilket ställer krav på materialval i värmeväxlare.

CAES är den enda kommersiellt gångbara storskaliga lagringstekniken vid sidan om pumpvattenkraft. I nuläget finns en anläggning i Tyskland (290 MW) och en i Alabama, USA (110 MW). Ytterligare projekt är under utveckling. CAES-tekniken förväntas bli mest använd i USA, där ett antal platser redan valts ut för anläggningar med denna teknik. Inom EU förväntas också vidare utveckling av CAES-teknik, särskilt om den första adiabatiska-CAES-teknik-anläggningen, ADELE, visar sig framgångsrik.²²

ADELE är ett projekt där avancerad adiabatisk-CAES-teknik (AA-CAES) används (så kallad andra generationens tryckluftsteknik). Med adiabatisk menas här att värmen som genereras vid kompression används för att öka energieffektiviteten. Målet är att öka energieffektiviteten till en nivå på 70 procent. ADELE är en demonstrationsanläggning som förväntas sättas i drift år 2016.²³

Andra generationens CAES-teknik har potential

Figur 12: Schematisk bild av ett tryckluftslager med tillhörande anläggning för elproduktion.²⁴



Tabell 5: Tryckluftsteknik.²⁵

Tryckluftsteknik	
Används för	Effekt- och energitoppar; minutreserv
Användningstid	1 till 24 timmar
Kapacitet	Beroende på lagringsstorlek
Energidensitet	0,5–0,8 kWh/m ³ (60 bar; energidensiteten beror på trycket)
Verkningsgrad	Vanlig tryckluftsteknik: 42–54 %, Avancerad adiabatisk tryckluftsteknik: upp till 70 %
Förluster	0–10 % per dygn
Start-upp tid	Minuter Efter 3 minuter är 50 % av kapaciteten tillgänglig Efter 10–14 minuter är 100 % av kapaciteten tillgänglig
Livslängd	25–40 år
Produktionsfas	Vanlig tryckluftsteknik: kommersiellt tillgänglig Avancerad adiabatisk tryckluftsteknik: utvecklingsfas
Investeringskostnad	6000 (vanlig CAES)–9600 (AA-CAES) SEK/kW
Geografiska krav	Nära en salt dom, tomt gasfält eller akvifär

till lägre installationskostnader, högre effektivitet, och kortare byggtid jämfört med första generationens CAES-teknik. I en typ av andra generationens CAES-teknik används en naturgaseldad förbränningsturbin (CT) för att generera värme under expansionsprocessen. I dessa anläggningar genereras ungefär två tredjedelar av den producerade elenergin från expansionsturbinen och en tredjedel från förbränningsturbinen (CT). Ny kompressor-design och ett avancerat turbo-aggregat leder också till förbättrade produktionsförhållanden i CAES-system baserade på teknik utan förbränningsturbin.

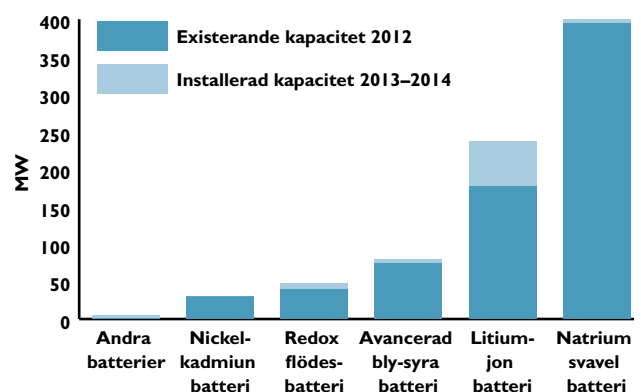
CAES-anläggningar med lagring av komprimerad luft ovan jord är typiskt mindre i storlek jämfört med anläggningar som utnyttjar lagring under jord. Kapaciteter för små anläggningar ligger ofta i intervallet 3–50 MW och med en uttömningstid på 2–6 timmar.²⁶

CAES-anläggningar ovan jord placeras på lämpliga platser, men är dyrare att bygga (räknat per SEK/kW) än anläggningar med underjordisk lagring. Mest kostnadseffektiva är CAES-anläggningar med underjordisk lagring med lagringskapacitet på upp till 400 MW och med uttömningstider på mellan 8–26 timmar. Placering av dessa anläggningar omfattar exploatering och verifiering av lagringsmöjligheter baserat på geologisk information som anger lämplighet för CAES-anläggningen i området.²⁷ Den adiabatiska CAES-tekniken är delvis en mogen teknik, främst för storskaliga centraliserade tillämpningar.

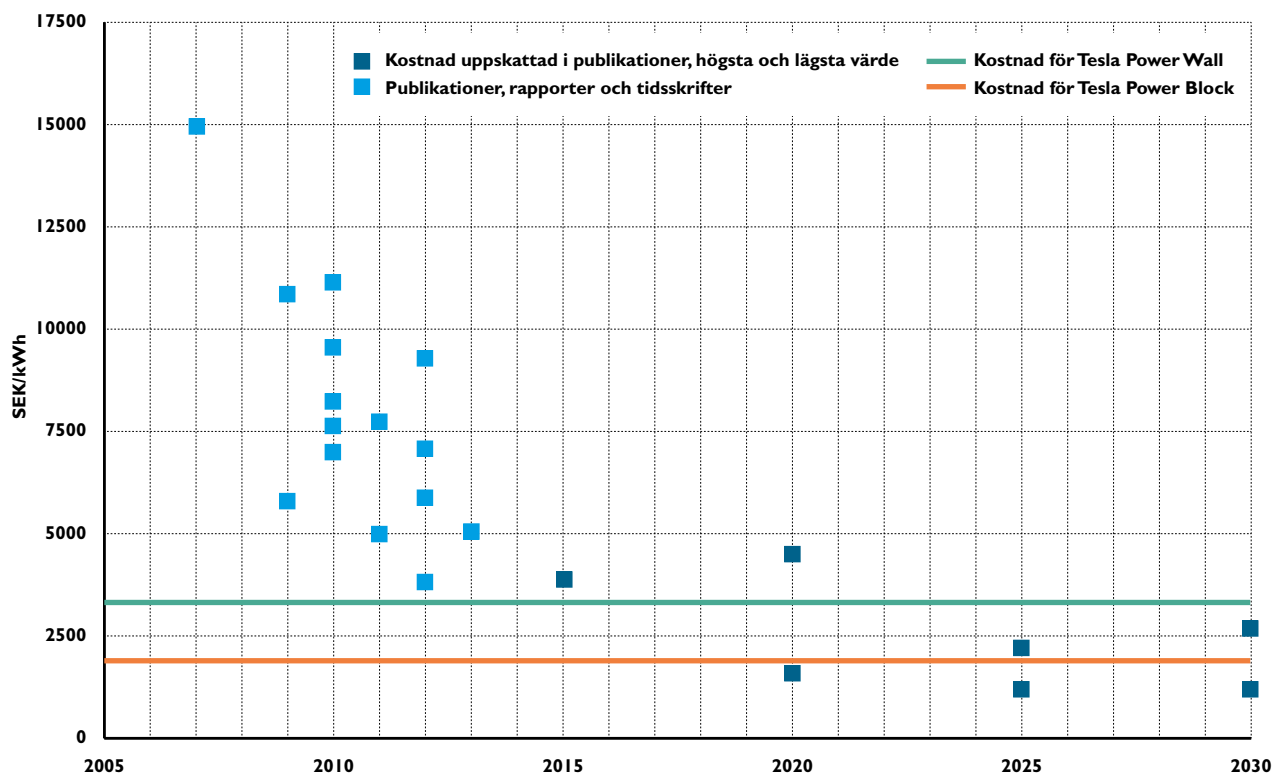
Batterier

Många olika typer av batterier är under utveckling idag. En sammanställning av vilka typer av batterier som finns och deras marknadsandel illustreras i Figur 13. Orsaken till den stora ökningen av Litiumjon-batterier under 2014 är den dramatiska prisutvecklingen.

Figur 13: Olika typer av batterier och dess uppskattade installerade kapacitet (MW) i världen 2014.²⁸



Figur 14: Kostnadsutveckling för Litium-jonbatterier.²⁹



Kostnader

Den största utmaningen för batterier är kostnaden, även om denna förväntas minska kraftigt inom de närmaste tio åren, dels på grund av skalfördelar och dels på grund av teknisk innovation. I Figur 14 illustreras den nuvarande kostnaden och den förväntade kostnadsutvecklingen för Litium-jonbatterier i eldrivna bilar. Notera även kostnadsnivån för de nya Tesla-batterierna som just kommit ut på marknaden.

Figur 15 visar olika typer av storskaliga Litiumjonbatterier och förväntad kostnadsutveckling.

Figur 16 visar en kostnadsjämförelse mellan olika batterityper, nuvarande och förväntad.

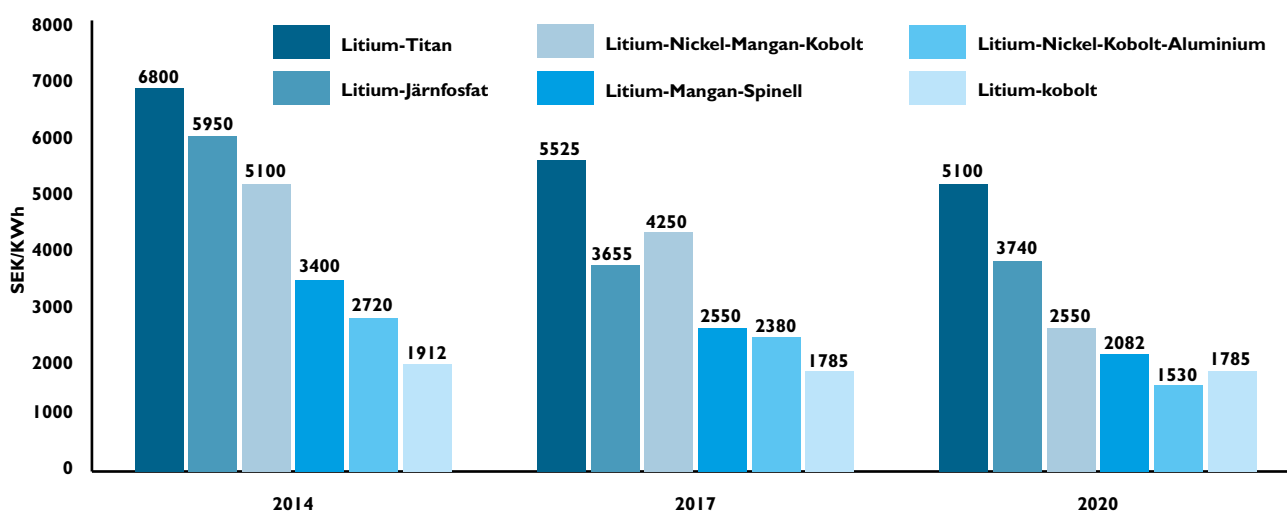
Kostnadsprediktioner för batterier är dock ständigt

under förändring. Företaget Tesla Motors har till exempel nyligen (1 maj 2015) lanserat sitt hemmabatteri Tesla Powerwall och industriella batteri Tesla Power block. Dessa batterier säljs för 3500 USD (motsvarande ungefär 30 000 kronor) och har lagringskapaciteten 10 kWh.³⁰ Detta motsvarar ett pris på 350 USD/kWh och dessutom för ett småskaligt system. Det industriella batteriet säljs för 250 USD/kWh, vilket motsvarar ungefär 2000 SEK/kWh.

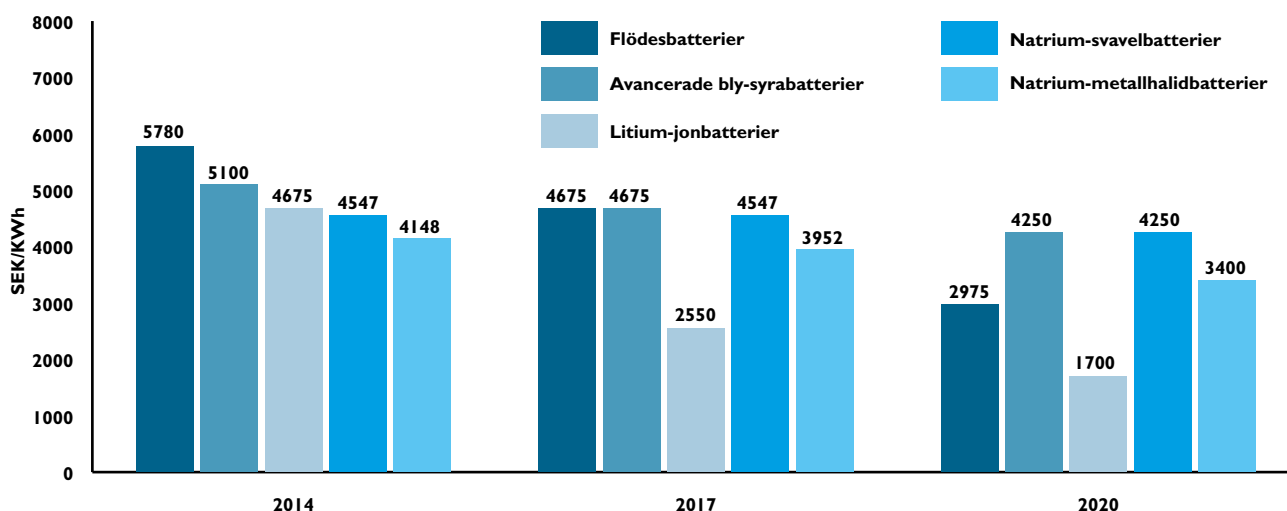
Marknad

Boston Consulting Group uppskattar den ökade totala marknadspotentialen för lagringstekniker till ytterligare 300 GW utöver de redan befintliga 100 GW.

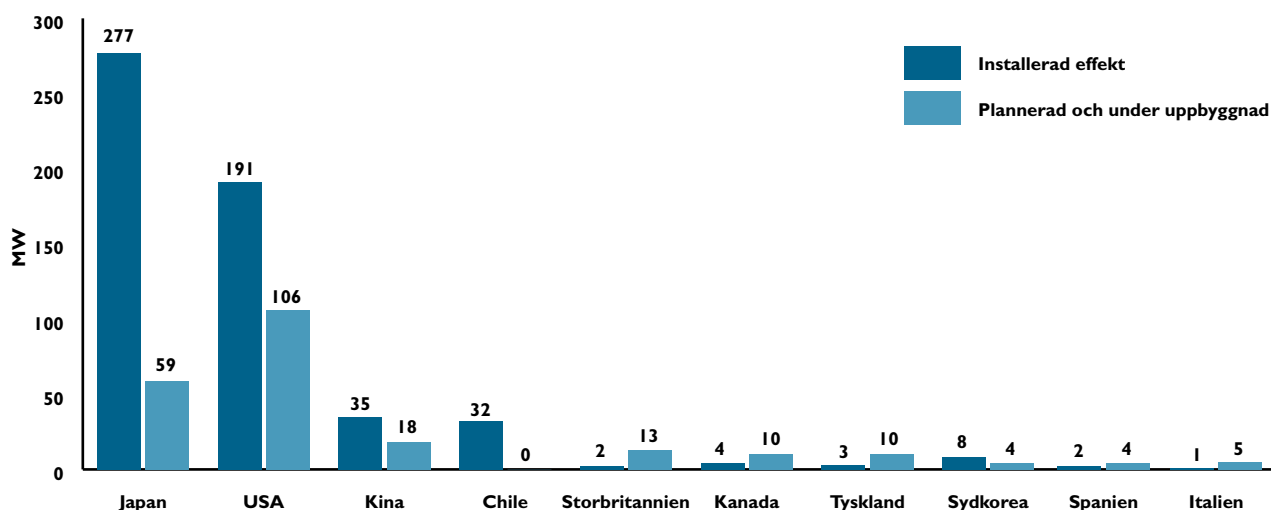
Figur 15: Nuvarande kostnad och framtida förväntad utveckling av olika typer av Litium-jonbatterier.³¹



Figur 16: Kostnad för storskalig batterilagring, jämförelse av nuvarande och förväntad.³²



Figur 17: Geografisk spridning av nuvarande och förväntad installerad batterikapacitet.³³



Batterier förväntas stå för nästan 50 procent av den totala investeringen i marknaden 2030. Batterier förväntas dock att stå för en liten del av den totala installerade lagringskapaciteten. Följande marknadsandelar förväntas för 2030.³⁴

- **Natrium-svavel:** 23 procent av marknaden, 582 miljarder SEK
- **Vanadium redox (VRB):** 18 procent av marknaden, 448 miljarder kronor
- **Litium-jon:** 10 procent av marknaden, 258 miljarder kronor

Totalt förväntas investeringar i batterimarknaden motsvara 1280 miljarder kronor.

Marknadsandelarna uppskattade av Boston Consulting Group ovan kan dock ifrågasättas då andra marknadsprediktioner anger att Litium-jon batterier förväntas dominera marknaden när det gäller elektro-kemiska energilager.³⁵

Figur 17 visar den nuvarande installerade batterikapaciteten och den planerade.

Batteritekniker

Nedan följer en mer detaljerad beskrivning av några av de olika batteriteknikerna.

Viktiga parametrar för ett batteris användbarhet är urladdningshastighet (hur fort batteriet kan laddas ur), urladdningsdjup (hur mycket av totalkapaciteten man utnyttjar i cyklisk drift, det vill säga hur djupt batteriet laddas ur; om urladdningsdjupet är 20 procent innebär det att batteriet levererar 20 procent av sin totala kapacitet) och antalet urladdningscykler under en livstid.

NATRIUMSVAVEL (SMÅLT SALT-BATTERIER)

Natrium svavelbatterier består av flytande natrium och svavel. Denna batteriteknik är mogen och har en systemverkningsgrad på 80 procent.³⁶ Den förväntade livslängden är 15 år eller 4500 cykler.³⁷

Energidensiteten av denna typ av batterier är cirka 60 wh/kg och kostar cirka 4800 SEK/kWh 2014.³⁸

BLYSYRA

Denna batteriteknik är också mogen. Dess livslängd varierar stort beroende på applikation, urladdningshastighet och antalet urladdningscykler.

Blysyrabatterier används mycket utbrett tillsammans med småskalig förnybar energiproduktion. Under 1995–2009 installerades till exempel 50 000 sol-batterisystem för hemmet i Marocko, och Bangladesh har 3,5 miljoner hem sol-batterisystem.³⁹

Det största problemet för många blysyrabatterier är att de fortfarande har ett lågt urladdningsdjup (mindre än 20 procent), lågt antal livscyklar (mindre än 500) och kort livslängd (3–4 år).

Energidensiteten är cirka 50 wh/kg vilket generellt är lägre än för Litium-jonbatterier. Nya versioner av blysyrabatterier har dock visat på betydligt bättre egenskaper som 2800 cykler, 50 procent urladdningsdjup och en livslängd på 17 år.⁴⁰

LITIUMJON

Litium-jonbatterierna har en hög energidensitet och urladdningshastighet jämfört med andra batterier. Detta gör att de är yteffektiva och detta förbättras även kontinuerligt. De har också en hög verkningsgrad; 80–90 procent.

Litium-jonbatterier består av en rad olika kemiska

Tabell 6: Data för litium-jonbatterier.⁴¹

Litium-	Katod	Anod	Elektrolyt	Energidensitet (Wh/kg)	Antal cykler	2014 SEK/kWh
Järnfosfat (LJF)	LJF	Grafit	Litium-karbonat	85–105	200–2000	3850–5950
Manganoxid (LMO)	LMO	Grafit	Litium-karbonat	140–180	800–2000	3150–4900
Titanoxid (LTO)	LMO	LTO	Litium-polymer	80–95	2000–25000	6300–15400
Koboltoxid (LKO)	LKO	Grafit	Litium-karbonat	140–200	300–800	1750–3500
Nickel-Kobolt-Aluminium (NKA)	NKA	Grafit	Litium-karbonat	120–160	800–5000	1680–2660
Nickel-Mangan-Kobolt (NMK)	NMK	Grafit, Silikon	Litium-karbonat	120–140	800–2000	3850–5250

sammansättningar, alla med unika egenskaper och kostnad. Tabell 6 visar en sammanställning av de olika typerna av Litiumjonbatterier som finns och tekniska data.

En av de största utmaningarna för Litiumjonbatterierna är säkerhet. Hög energidensitet, litiums brännbarhet och innehållet av syre gör att de kan överhettas och börja brinna.⁴²

FLÖDESBATTERIER

Ett flödesbatteri har, till skillnad från andra batterier, flytande elektroder. De flytande elektroderna kan lagras utanför battericellen och genom detta möjliggörs stor lagringsvolym. Denna egenskap är en av flödesbatteriernas fördel och en annan är att de har kort reaktionstid. Flödesbatterier har även lång livslängd på grund av de flytande elektroderna. Nackdelen med dessa typer av batterier är att de har låg energidensitet och att de på grund av sin storlek inte passar i mobila applikationer.

Power to Gas

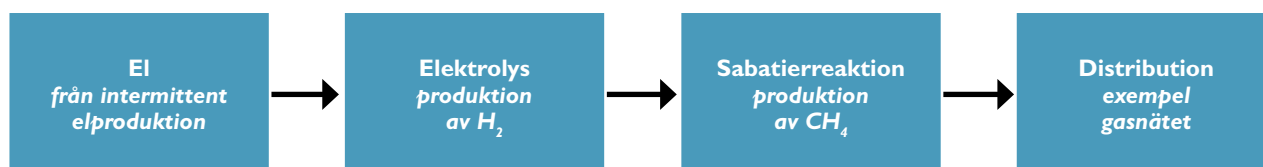
Power to Gas är en metod för att storskaligt kunna lagra elenergi i form av gas. Kort kan begreppet beskrivas som att el används för att producera vätgas genom elektrolys.

Tekniken kan exempelvis användas för att ta tillvara överskottsel från intermittent elproduktion så som vind- och solkraft. Producerad vätgas kan exempelvis användas för att öka biogasproduktion, alternativt utnyttjas direkt eller lagras i gasnät. I en sabatierreaktion kan även producerad vätgas användas för direkt framställning av metangas.

I figur 18 ges en schematisk beskrivning av produktionsprocessen för vätgas (H_2) och vidareproduktion av metangas (CH_4).

Tabell 7 och 8 visar information om power to gas i de två fallen då vätgas (H_2) och metangas (CH_4) produceras.

Generellt sett är tekniken mycket flexibel i termer

Figur 18: Produktionsprocessen för vätgas (H_2) och vidareproduktion av metangas (CH_4)

Tabell 7: Power to gas, H₂ produktion.⁴³

AEC: Alkali elektrolys PEM: Polymer Electrolyte Membrane/Proton Exchange Membrane

Power to gas, H ₂ produktion	
Används för	Långvarig lagring, balansering av elnätet
Användningstid	Sekunder till månader
Kapacitet	kW-GW
Energidensitet	3 kWh/Nm ³
Verkningsgrad	62–82 %
Förluster	0–1 % per dygn
Start-upp tid	AEC: minuter, PEM: sekunder
Livslängd	AEC: Degraderar till 75 % över 10 år, PEM: 5–10 år
Produktionsfas	AEC: kommersiellt tillgänglig, PEM: prototyp
Investeringskostnad	6300–9900 SEK/kW
Geografiska krav	Inga

Tabell 8: Power to gas, CH₄ produktion.⁴⁴

Power to gas, CH ₄ produktion	
Används för	Långvarig lagring, balansering av elnätet
Användningstid	Sekunder till månader
Kapacitet	kW–GW
Energidensitet	9,81 kWh/Nm ³
Verkningsgrad	49–56 %
Förluster	0–1 % per dygn
Start-upp tid	Minuter till timmar
Livslängd	20 år
Produktionsfas	Kommersiellt tillgänglig
Investeringskostnad	21 600 SEK/kW
Geografiska krav	Inga

av kapacitet och särskilt lämplig för decentraliserade applikationer. Inga särskilda geologiska förutsättningar krävs. År 2025 förväntas lagringskostnader (räknat som LCOE – levelized cost of energy) för 180 cykler per år bli 1,3 SEK/kWh, och för 360 cykler per år ungefär 1,15 SEK/kWh.⁴⁵

En stor mängd forsknings bedrivs för att ta fram teknik för vätagaslagring med ett antal olika metoder.

Svänghjul (Flywheel)

Ett svänghjul lagrar energi i form av kinetisk energi. En rotor med hög massa spinner snabbt och motståndsfritt med hjälp av magnetiska kullager. Genom

att bromsa motorn kan man hämta ut energi, och genom att tillföra energi till motorn spinner motorn snabbare och lagrar således energi.

För de flesta moderna svänghjulstekniker är rotor-systemet inneslutet av säkerhets- och effektivitetsskäl. Inneslutningen består oftast av ett skyddande stålhölje som kapslar in rotorn, motor/generator och andra roterande delar. Inneslutningen skyddar samtidigt från att skador uppstår på personal och kringliggande utrustning vid ett eventuellt rotorhaveri. Inneslutningen har också positiv inverkan på verkningsgraden. Rotorn körs ofta med vakuum i inneslutningen, alternativt är inneslutningen fylld med gaser med låg friktion som till exempel helium.

Svänghjulstekniken har en hög energidensitet vilket

innebär att den kräver lite plats för att lagra en relativt hög effekt. Svänghjulstekniken har också en mycket kort responstid, ofta 4 millisekunder eller kortare, och kan sättas in under korta perioder upp till en timme. Ett svänghjul kan dimensioneras mellan 100 kW och 1650 kW och de har en hög effektivitet på runt 93 procent, med en uppskattad livslängd på cirka 20 år.⁴⁶

Tack vare den korta responstiden är ett typiskt tillämpningsområde för svänghjul så kallade UPS-anläggningar (uninterrupted power supply, avbrottsfri kraftförsörjning).⁴⁷

Beacon Power har utvecklat storskaliga svänghjuls-lösningar, exempelvis en anläggning med kapacitet på 20 MW (200 enheter om 100 kW, cirka 25 kWh) som används framförallt för frekvensregling i New York. Svänghjulstekniska lösningar som används för spänningskvalitetsapplikationer förväntas öka starkt över en tioårsperiod.⁴⁸ Försäljningen förväntas öka starkt i Europa och Asien, samtidigt förväntas USA kvarstå som den största marknaden fram till år 2021.⁴⁹

Magnetisk energilagring med hjälp av supraledare

SMES – Superconduction Magnetic Energy Storage är en form av magnetisk energilagring med hjälp av supraledare. SMES har en hög effektivitet på över 90 procent och bygger på momentana laddnings-/urladdnings-cykler vilket gör SMES ytterst lämpad för lösningar avseende elkvalitetsstöd. SMES-lösningar är

generellt sett småskaliga med nuvarande maxkapacitet på cirka 10 MW lagringskapacitet. Den fysiska storleken på spolen utgör en begränsande faktor för denna teknik. Då magnetsystem är utomordentligt tunga sätter det naturliga begränsningar på uppskalning, SMES i större skala är i princip omöjliga att bygga och implementera. Ökad tjocklek i de supraledande trådarna medför större värmeutveckling och minskad effektivitet. Vidare har man ännu inte utförligt analyserat effekterna av magnetfälten kring anläggningen.

SMES är den teknik som är mest etablerad bland de tekniska lösningarna för högspänning i installationer i Europa, Japan och i USA. USA förväntas bli en viktig marknad för SMES-teknik tillsammans med Tyskland och Japan, men dock inte på en motsvarande nivå som de snabbväxande marknaderna för svänghjuls- och superkondensator-teknikerna.⁵⁰

Superkondensatorer

Den huvudsakliga fördelen med superkondensatorer är dess höga energidensitet, effektivitet och antalet möjliga urladdningscykler under en livstid – möjligheter att ladda respektive ladda ur över 1 miljon cykler.

Superkondensatortekniken håller för tillfället på att slå igenom på marknaden för lagringslösningar i elnäten. USA, Korea och Japan förväntas bli de största marknaderna för superkondensatorer.⁵¹

En jämförelse av SMES, svänghjul och superkondensatorer visas i Tabell 9.

Tabell 9: Jämförelse mellan SMES, svänghjul och ultrakondensatorer

	Verkningsgrad	Livslängd	Urladdningshastighet	Energidensitet (Wh/kg)
Svänghjul	95 %	20 år	0,1–20 minuter	200
SMES	90 %	30–50000 cykler	1–8 sekunder	40–60
Superkondensatorer	95 %	1000000+ cykler	0,001–3 sekunder	1–30

4. Jämförelse mellan olika lagringstekniker

Som tidigare påpekats finns det olika fördelar och nackdelar med de olika lagringsteknikerna. Tabellen nedan visar en jämförelse mellan de olika typerna av lagringsteknik presenterade i denna rapport.

Energilagringsslag	Kapacitet (MW)	Användningstid	Verkningsgrad (%)	Start-upp tid
Pumpkraftverk	< 5000	1–24 h	65–85	s-min
Tryckluftsteknik	Beroende på lagringsstorlek	1–24 h	42–54 (vanlig) 70 (avancerad adiabatisk)	min
Blybaserade batterier	0,001–50	s–3 h	60–95	-
Litiumbaserade batterier	0,001–0,1	min–h	85–99	-
Flödesbatterier Vanadin Redoxbatterier	0,03–7	s–10 h	85	ms
Flödesbatterier Zink Bromidbatterier	0,05–2	s–10 h	70–75	ms
Natriumsvavelbatterier	0,5–50	s–h	85–90	-
Power to gas, H ₂ produktion	kW–GW	s–månader	62–82	s-min
Power to gas, CH ₄ produktion	kW–GW	s–månader	49–56	min–h
Svängjul	0,002–20	s–min	95	s-min
SMES	0,001–10	s	90	ms
Superkondensatorer	0,01–1	ms–s	95	ms

5. Bilaga

FOTNOTER

1. Normark, B., et al, How can batteries support the EU electricity network?, Insight Energy, November 2014.
2. Normark, B., et al, How can batteries support the EU electricity network?, Insight Energy, November 2014.
3. Normark, B., et al, How can batteries support the EU electricity network?, Insight Energy, November 2014.
4. Normark, B., et al, How can batteries support the EU electricity network?, Insight Energy, November 2014.
5. Normark, B., et al, How can batteries support the EU electricity network?, Insight Energy, November 2014.
6. Boston Consulting Group, *Revisiting Energy Storage – There Is a Business Case*, 2011.
7. https://www.bcgperspectives.com/content/articles/energy_environment_solar_pv_plus_battery_storage_poised_for_takeoff/
8. https://www.bcgperspectives.com/content/articles/energy_environment_solar_pv_plus_battery_storage_poised_for_takeoff/
9. SBC Energy Institute, Electricity Storage, September 2013.
10. DG ENER Working Paper, The future role and challenges of Energy Storage, European Commission.
11. Boston Consulting Group, *Revisiting Energy Storage – There Is a Business Case*, 2011.
12. https://www.bcgperspectives.com/content/articles/energy_environment_solar_pv_plus_battery_storage_poised_for_takeoff/
13. Normark, B., et al, How can batteries support the EU electricity network?, Insight Energy, November 2014.
14. IRENA, Battery storage for renewables: market status and technology outlook, January 2015.
15. POWER CIRCLE, Energilager i energisystemet, September 2014.
16. Boston Consulting Group, Electricity Storage-Making Large – Scale Adoption of Wind and Solar Energies a Reality, 2010.
17. DG ENER Working Paper, The future role and challenges of Energy Storage, European Commission.
18. INTiS GmbH, Power to Gas, NEND, May 2013.
19. Visiongain, The Energy Storage Technologies (EST) Market 2011–2021, 2010.
20. Visiongain, The Energy Storage Technologies (EST) Market 2011–2021, 2010.
21. Electric Power Research Institute, Electricity Energy Storage Technology Options – A White Paper Primer on Applications, Costs and Benefits, 2010.
22. Visiongain, The Energy Storage Technologies (EST) Market 2011–2021, 2010.
23. RWE, <http://www.rwe.com/web/cms/mediablob/en/391748/data/235554/1/rwe-power-ag/company/Brochure-ADELE.pdf>
24. DG ENER Working Paper, The future role and challenges of Energy Storage, European Commission.
25. INTiS GmbH, Power to Gas, NEND, May 2013.
26. DOE/EPRI, Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA, 2013.

27. DOE/EPRI, Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA, 2013.
28. IRENA, Battery storage for renewables: market status and technology outlook, January 2015.
29. Nykvist, B., Nilsson, M., Rapidly falling cost of battery packs for electric vehicles, nature climate change, 23 march 2015.
30. <http://teslaclubsweden.se/tesla-powerwall/>
31. IRENA, Battery storage for renewables: market status and technology outlook, January 2015.
32. IRENA, Battery storage for renewables: market status and technology outlook, January 2015.
33. IRENA, Battery storage for renewables: market status and technology outlook, January 2015.
34. Boston Consulting Group, Revisiting Energy Storage – There Is a Business Case, 2011.
35. Hanson, M., et al., Energilagring i Energisystemet, Power Circle, September 2014.
36. Electric Power Research Institute, Electricity Energy Storage Technology Options – A White Paper Primer on Applications, Costs and Benefits, 2010.
37. Electric Power Research Institute, Electricity Energy Storage Technology Options – A White Paper Primer on Applications, Costs and Benefits, 2010.
38. IRENA, Battery storage for renewables: market status and technology outlook, January 2015.
39. IRENA, Battery storage for renewables: market status and technology outlook, January 2015.
40. IRENA, Battery storage for renewables: market status and technology outlook, January 2015.
41. IRENA, Battery storage for renewables: market status and technology outlook, January 2015.
42. IRENA, Battery storage for renewables: market status and technology outlook, January 2015.
43. INTIS GmbH, *Power to Gas*, 2013.
44. INTIS GmbH, *Power to Gas*, 2013.
45. Boston Consulting Group, Electricity Storage-Making Large – Scale Adoption of Wind and Solar Energies a Reality, 2010.
46. Electric Power Research Institute, Electricity Energy Storage Technology Options – A White Paper Primer on Applications, Costs and Benefits, 2010.
47. Electric Power Research Institute, Electricity Energy Storage Technology Options – A White Paper Primer on Applications, Costs and Benefits, 2010.
48. Visiongain, The Energy Storage Technologies (EST) Market 2011–2021, 2010.
49. Visiongain, The Energy Storage Technologies (EST) Market 2011–2021, 2010.
50. Visiongain, The Energy Storage Technologies (EST) Market 2011–2021, 2010.
51. Visiongain, The Energy Storage Technologies (EST) Market 2011–2021, 2010.

LITTERATURFÖRTECKNING

VINNOVA, *Lösningar på Lager – Energilagringstekniken och framtidens hållbara energiförsörjning*, 2012

Boston Consulting Group, *Revisiting Energy Storage – There Is a Business Case*, 2011

Visiongain, *The Energy Storage Technologies (EST) Market 2011–2021*, 2010

Boston Consulting Group, *Electricity Storage-Making*

Large-Scale Adoption of Wind and Solar Energies a Reality, 2010

INTIS GmbH, *Power to Gas*, 2013

Electric Power Research Institute, *Electricity Energy Storage Technology Options – A White Paper Primer on Applications, Costs and Benefits*, 2010

DOE/EPRI, *Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA*, 2013

ESA, http://www.electricitystorage.org/technology/technology_applications/spinning_reserve

RWE, <http://www.rwe.com/web/cms/mediablob/en/391748/data/235554/1/rwe-power-ag/company/Brochure-ADELE.pdf>

ÅF, *Green Advisor Report 2013:01*, 2013

KTH, *På väg mot en elförsörjning baserad på enbart förnybar el i Sverige*, 2013

EscoVale Consultancy Services, *Electrical Energy Storage*, 2010

prognos, *The significance of international hydropower storage for the energy transition*, 2012

Bradbury, K., *Energy Storage Technology Review*, 2010

Hirth L., et.al, *Energy Storage in a System Perspective Interim Report*, 2010

McKinsey & Company, *Storage in the European power sector – Game changer or hype?*, 2013

INSIGHT_E, *Policy Report 1 – How can batteries support the EU electricity network?*, november 2014

IRENA, *Battery storage for renewables: market status and technology outlook*, january 2015

HSBC Global Research, *Energy Storage – Power to the People*, september 2014

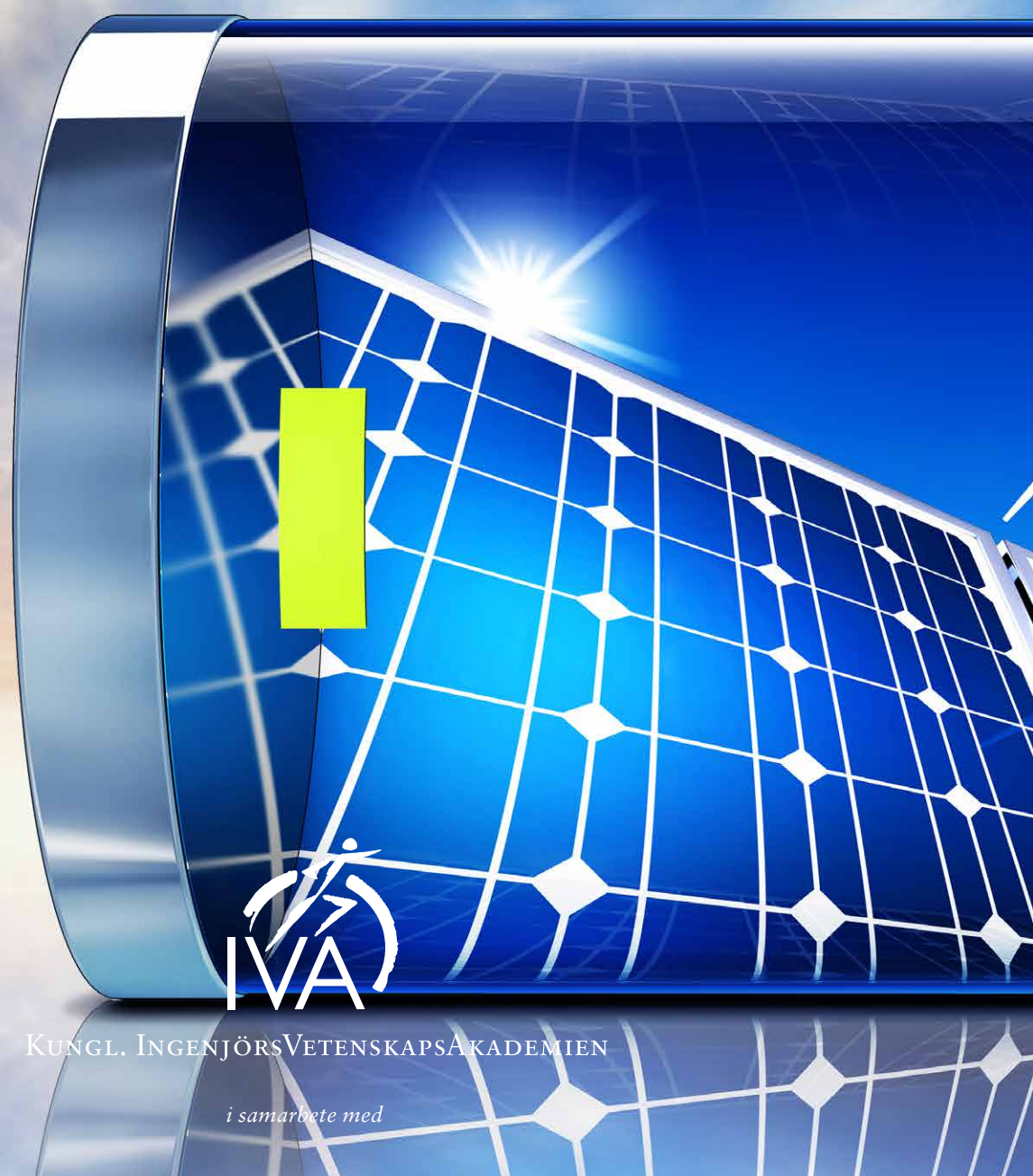
T&D World Magazine, *SDG&E Integrates EVs and Energy Storage into California's Energy and Ancillary Service Markets*, 24 february 2015

Nykvist, B., Nilsson, M., *Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles, nature climate change*, 23 march 2015

SBC Energy Institute, *Electricity Storage*, September 2013.

POWER CIRCLE, *Energilager i energisystemet*, September 2014

Jernkontoret, www.energihandbok.se/lagring-av-elektrisk-energi/



KUNGL. INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN

i samarbete med

ABB

e-on

 **Energimyndigheten**

 **Fortum**

 **IFMETALL**

 **INDUSTRIRÅDET**

 **PAPPERS**

SIEMENS

SKGS

**SVENSKO
energi**

 **Svensk Fjärrvärme**

 **SVENSKA
KRAFTNÄT**

 **SVENSKT NÄRINGSLIV**

 **Sveriges Ingenjörer**

**swede
gas**

 **Teknikföretagen**

VATTENFALL



 **FORSK**