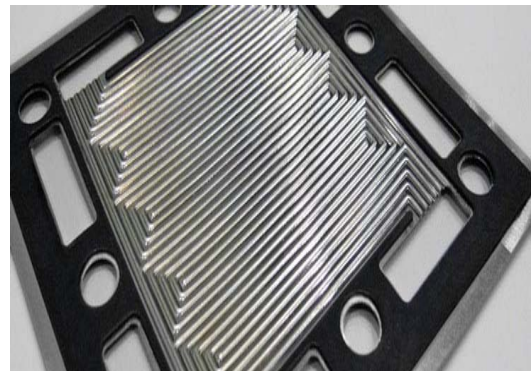


Kostnadsutveckling hos batterier och bränsleceller fram till 2025 en sammanställning



25 juni 2013

Sten Bergman, StonePower AB
Helena Berg, Libergreen AB
Peter Georén, KTH

Detta projekt har genomförts på uppdrag av FFF-utredningen under perioden mars-juni 2013.

Innehållsförteckning

1. SYFTE MED STUDIEN.....	5
1.1 UPPDRAGET.....	5
1.2 AVGRÄNSNINGAR I UPPDRAGET.....	5
2 SAMMANFATTNING.....	7
3 LI-JONBATTERIER OCH BRÄNSLECELLER, ÖVERSIKT OCH UTVECKLINGSPOTENTIAL.....	10
3.1 DEFINITION AV BATTERISYSTEM.....	10
3.1 EFFEKT- OCH ENERGIPRESTANDA.....	12
3.2 LIVSLÄNGD.....	13
3.3 SÄKERHET.....	13
3.4 UTVECKLINGSPOTENTIALER FÖR LI-JONBATTERIER.....	14
3.4.1 CELLUTVECKLINGEN HISTORISKT SETT.....	15
3.5 BRÄNSLECELLER.....	18
3.5.1 Utvecklingen av bränslecellsystem.....	18
3.5.2 Introduktionsplaner.....	19
4 KOSTNADSANALYSER LI-JONBATTERISYSTEM.....	20
4.1 CELLMATERIAL.....	21
4.2 SYSTEMDESIGN.....	22
4.3 PRODUKTIONSMETODER.....	22
4.4 STANDARDISERING.....	23
4.5 ÅTERANVÄNDNING/RE-MANUFACTURING.....	24
4.6 ÅTERVINNING.....	26
4.7 MARKNADSFAKTORER.....	26
4.8 FÖRÄDLINGSKEDJAN.....	29
4.9 BILTILLVERKARNAS STRATEGIER.....	29
4.10 SAMMANSTÄLLNING KOSTNADSUPPSKATTNING LI-JONBATTERIER.....	31
5 KOSTNADsutveckling FÖR BRÄNSLECELLER.....	33
5.1 TEKNISKA FAKTORER.....	34
5.2 MARKNADSFAKTORER.....	35
6 KOSTNADSMODELLER OCH BEDÖMNING AV OSÄKERHETER.....	36
6.1 KOSTNAD FÖR ENERGIPTIMERADE BATTERIER.....	36
6.1.1 Osäkerheter i bedömningar.....	37
6.2 KOSTNAD FÖR EFFEKTOPTIMERADE BATTERIER.....	39
6.2.1 Osäkerheter i bedömningar.....	40
6.3 KOSTNAD FÖR BRÄNSLECELLER.....	40
6.4.1 Osäkerhet i bedömningar.....	41
7 SLUTSATSER.....	42
8 REFERENSER.....	43

1. Syfte med studien

Utredningen om fossilfri fordonstrafik (FFF-utredningen N 2012:05) har uppdrag att redovisa hur den svenska fordonsflottan ska bli fossiloberoende till år 2030 och i stort sett fossilfri eller klimatneutral 2050. Avsikten är att presentera konkreta förslag till åtgärder och styrmedel samt etappmål för t.ex. 2020, 2030 och 2040.

1.1 Uppdraget

Som underlag för bedömning av behovet av styrmedel och andra åtgärder avseende elektrifiering av fordon behöver FFF-utredningen få en bild av nuvarande och förväntade framtida kostnader för batterier och bränsleceller av typer som är eller kan bli aktuella för användning i vägfordon. I uppdraget ingår att med referens till olika källor (forskare och expertorganisationer men också företag) ange hur kostnadsbilden ser ut idag och hur den kan komma att utvecklas fram till ca 2020-2025 under antagande om fortsatt teknisk utveckling och växande produktionsserier. Rapporten bör så långt möjligt ange vilka ingående komponenter (material och tillverkningskostnad) som dominerar kostnadsbilden och hur kostnaden för dem (helst var för sig) kan förändras över tid. Om spridningen i kostnadsbedömningar skulle visa sig vara stor kan det vara bra att notera om beräkningarna är av överslagsmässig natur eller om de är detaljerade.

I uppdraget ingår att belysa vilka de största utmaningarna tekniskt/ekonomiskt är för att få ner kostnaden för batterier respektive bränsleceller till nivåer som gör dem konkurrenskraftiga vid dagens europeiska nivåer för priset (inkl. punktskatter) på diesel, bensin och lågspänd el.

En viktig faktor som behöver belysas är förväntad livslängd hos batterierna och bränslecellerna. Risken för att de måste bytas innan fordonet är moget för skrotning bör så långt möjligt anges. Beträffande batterier är det viktigt att bedöma åldringseffekter för olika batterityper av frekvent snabbladdning. Det är viktigt att genomgående också redovisa om osäkerheten i bedömningarna är liten, måttlig eller stor.

1.2 Avgränsningar i uppdraget

Batteriutveckling omfattar många kemier och många tillämpningsområden. Idag produceras årligen ca 1 miljard Li-jonbatterier (av typ 18650, dvs cylindriska standardbatterier). I denna studie tas dessa inte med utan koncentrationen görs kring batterier för fordonstillämpningar, det vill säga celler som är anpassade för både tunga och lätta fordon (HEV, PHEV och EV). Tekniska landvinningar inom området för standardceller torde dock snabbt slå igenom även för de fordonsanpassade celler.

Tillgången till råmaterial har analyserats i olika studier. Då materialkostnaderna utgör en stor andel av produktkostnaden torde materialfrågan vara en synnerligt avgörande parameter för prisutvecklingen. Litiumtillgångar i Sydamerika, Tibet, Australien m.fl. kan av geopolitiska

förändringar starkt komma att påverka prisbilderna. Denna studie gör dock inga ansatser att bedöma hur stora dessa "politiska" risker skulle kunna vara.

I fall där ett batterisystem avses så definieras dessa som en enhet som kan integreras i ett fordon utan extra komponenter. Det vill säga att batterisystemet innefattar celler, anordning för kylning, kontaktorer, säkringar, skyddsanordning samt elektronik och styrenhet(er).

Snabbladdning är en parameter som påverkar livslängden, och är starkt kopplad till körbetingelser, omgivningstemperatur och hälsotillståndet för batteriet. Detta är ett stort pågående forskningsområde för att utreda vad som sliter och varför. Därför behandlas inte detta ingående i denna rapport.

Den viktigaste faktorn när det gäller kostnadsutvecklingen för fordonsbatterier är onekligen fordonsmarknaden och dess tillväxthastighet. Om denna finns många bedömningar, hypoteser och prognoser samt önskemål. Denna studie försöker inte göra någon egen prognos om elbils- eller bränslecellsfordonens marknadsutveckling utan baseras på de antaganden som de flesta analytiker vi refererat gjort.

Elbilar och bränslecellsfordon är vidare beroende av en utbyggd laddningsinfrastruktur som är anpassad till fordonsflottornas lokalisering och omfattning. En väl utbyggd infrastruktur skulle kunna få positiva effekter på utvecklingen av fordonsmarknaderna och därmed också indirekt på kostnadsutveckling av både fordon och batterier/bränsleceller. På samma sätt kan underutbyggd infrastruktur fördröja marknaden och då hålla kostnader kvar på högre nivåer.

Uppskattningen är att infrastrukturen kan komma att kosta ca 5 % av den totala fordonsparkens kostnad; gäller både elbilar och bränslecellsfordon. Studien behandlar dock inte denna aspekt om infrastrukturens påverkan.

2 Sammanfattning

Utredningen om fossilfri fordonstrafik (FFF-utredningen N 2012:05) har som uppdrag att redovisa hur den svenska fordonsflottan ska bli fossiloberoende till år 2030 och i stort sett fossilfri eller klimatneutral 2050. Avsikten är att presentera konkreta förslag till åtgärder och styrmedel samt etappmål för t.ex. 2020, 2030 och 2040.

Som underlag för bedömning av behovet av styrmedel och andra åtgärder avseende elektrifiering av fordon behöver därför FFF-utredningen få en tydligare bild av nuvarande och förväntade framtida kostnader för batterier och bränsleceller av typer som är eller kan bli aktuella för användning i vägfordon. I uppdraget ingår att med referens till olika källor (forskare och expertorganisationer men också företag) ange hur kostnadsbilden ser ut idag och hur den kan komma att utvecklas fram till ca 2025 under antagande om fortsatt teknisk utveckling och växande produktionsserier.

Denna rapport beskriver översiktligt vad som karakteriserar batteri- och bränslecellsystem för fordon baserat på om de är energioptimerade eller effektoptimerade, dvs avses för batteribilar eller hybridfordon. Faktorer som material, kemi, celltillverkning/packtillverkning, livslängd och säkerhet behandlas. Marknadsaspekter berörs, liksom frågor som berör återanvändning, återvinning och vikten av standardisering av både batterier och batteriprovning. Utvecklingspotential och forskning för nya batterityper (och nya batterikemier) diskuteras översiktligt.

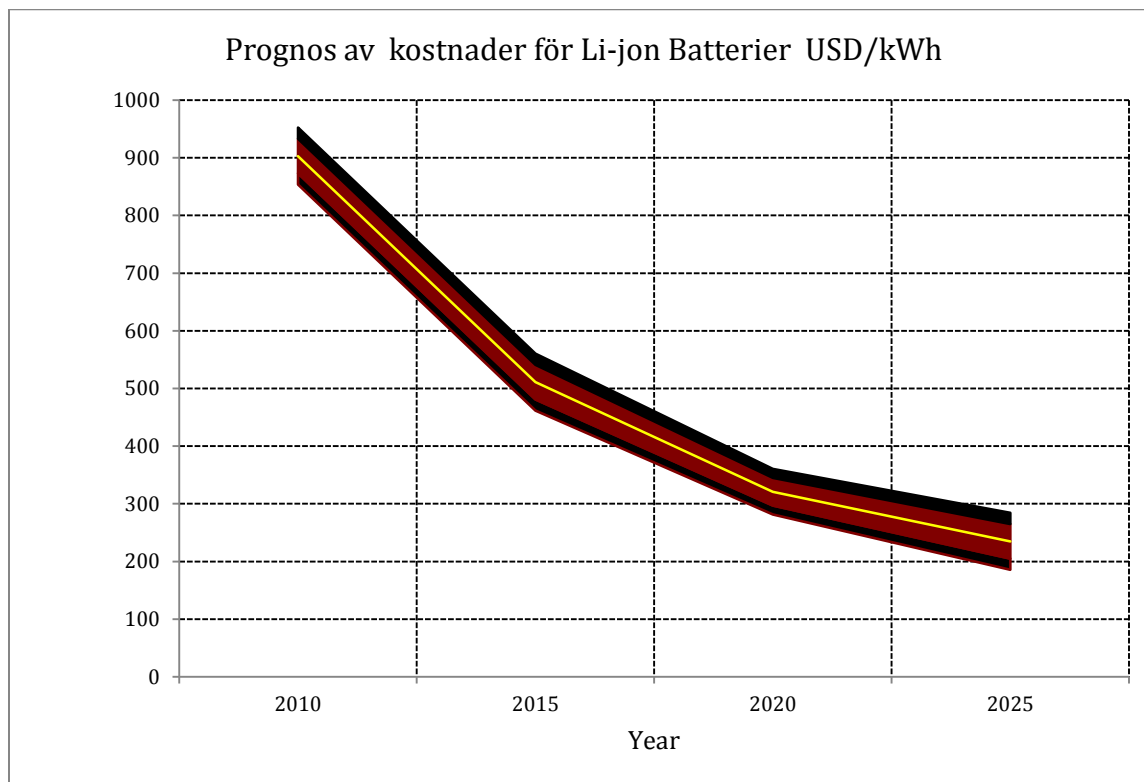
Rapporten bygger på litteraturstudier och information från konferenser/workshops och öppna källor. Likaså kombinerar denna studie kostnadsanalyser från olika typer av aktörer: Forskare och forskningsorgan, Analytiker/Konsulter och batteriexperter, batteritillverkare och fordons-tillverkare.

En viktig faktor i batteriutvecklingen är batterilivslängden, som i regel anges i både kalendertid och antal djupcyklningar. Här skiljer sig energi- och effektoptimerade batterier åt högst avsevärt. Medan ett energioptimerat batteri utvecklas för ca 3 000-6 000 cykler (dvs 10-15 års daglig användning) krävs av effektoptimerade batterier att dessa klarar 10 000 -100 000 cykler utan nämnvärd degradering. Stora insatser läggs idag på att utveckla batterier som har längre livslängd än fordonen.

Medan många batteritillverkare hävdar att snabbbladning inte har någon negativ effekt på batteriet kan man dock befara att regelbunden frekvent snabbbladning tär på cyklingsbudgeten och därmed minskad livslängd som följd.

Vår bedömning är att sannolikheten är mycket hög för att kostnaderna när det gäller Litium-jonbatterier och bränsleceller kommer att sänkas avsevärt (mer än 50 %) under den kommande 10-15 årsperioden.

Baserat på analyser från flera olika källor beskrivs kostnadsutvecklingen för energioptimerade Litium-jonbatterier bäst i figuren nedan.



Figur2. 1: Prognos för kostnadsutveckling av energioptimerade litium-jonbatterier

När det gäller **energioptimerade batterier** uppskattar vi att från dagens nivåer på ca 600-800\$/kWh, är sannolikheten hög att vi år 2025 hamnar kring 200-400 \$/kWh.

De **effektioptimerade batterierna** kommer sannolikt att vara mellan 10-75 % dyrare än de energioptimerade beroende på användningsområde. (PHEV respektive HEV /tungt fordon). Beroende på framförallt de tekniska kraven, behovet av vätskekyllning, annan konstruktionsteknik och i regel att de byggs med cylindriska celler.

Beträffande bränsleceller pågår nu en stark utveckling och de första "för-kommersiella" systemen börjar nu marknadsföras. Kostnadsbedömningarna här är mer osäkra och underlaget ganska litet. Enligt DOE i USA ser man dock ytterligare kostnadssänkningar från dagens ca 47 \$/kW till nivåer ner till 30\$/kW fram till 2017. Detta innebär en nästan 90 % kostnadssänkning från 2002 års nivå.

Bland rapportens övriga slutsatser kan nämnas följande:

- Den främsta drivkraften till kostnadssänkningar av litium-jonbatterier för fordonstillämpningar är avgjort hur stor marknaden är och hur snabbt den förväntas växa.

- Cellkostnaderna som utgör ca 40 % av batteripackkostnaderna är starkt beroende av tillverkningsvolymerna och kostnadsminskningar på upp mot 25 % kan uppnås om volymerna ökar en faktor 4 eller mer. Detta är ett troligt scenario.
- För att nå en kostnad på ca 325 \$/kWh för fordonsanpassade celler måste tillverkningskostnaden maximalt uppgå till 20% av totala batterikostnaden vilket ställer stora krav på sänkta tillverkningskostnader genom t.ex. automatiserad produktion och testning.
- En halvering av elektrodmaterialpriser förväntas ge 25 % billigare celler och 13 % billigare batterisystem. En halvering av kostnaden för systemintegration ger däremot 20 % lägre batterisystemkostnad.
- Standardiserade celler torde kunna ge en kostnadsreduktion på 5-10 % för ett batterisystem.
- Investeringar gjorda i batterifabriker innebär att endast inkrementella förändringar kan ske i batterikonstruktion och produktion till dess fabriks investeringskostnad (enligt Siemens ca 20 M€ per fabrik) är återbetald.
- Bland de forskningsområden för inkrementella förbättringar som man just nu satsar på kan nämnas nya katodmaterial vilka möjliggör högre spänning, stabilare elektrolyter som är kompatibla med ökad spänning samt nya anodmaterial (tex kisel) vilket möjliggör högre kapacitet.

Utvecklingspotentialen för litiumbatterier är hög och idag forskas intensivt på nya kemier med Svavel, Luft etc. samt på bipolära batterier med utspänning kring 400 V. Sannolikheten att dessa hinner kommersialiseras före 2025 bedöms dock som mycket låg

3 Li-jonbatterier och bränsleceller, översikt och utvecklingspotential

Batterisystem i fordon skiljer sig åt beroende på fordons- och drivlinetyp. Man kan dela in fordon i tre typer: tunga fordon, såsom lastbilar och bussar; lätta fordon, såsom personbilar; samt ultralätta fordon, såsom lättviktsbilar, motorcyklar/mopeder och cyklar. Vidare kan varje kategori indelas i tre huvudtyper av drivlina: hybriddrivlina (HEV) som endast tankas med bränsle och bromsenergi; plug-in hybrid drivlina (PHEV) som även laddas från eluttag; samt renodlade elfordon (BEV) som endast kan laddas upp elektriskt.

Utifrån denna klassificering tog vi fram följande matris av fordonstyp (fordonsslag + drivlina) och kravparametrar för att skilja på batterier med olika kravprofil. Detta resulterade i en indelning i fyra huvudtyper av fordonsbatterier för xEV, baserat på effektkrav: *Very High Power (VHP)* ; *High Power (HP)*; *High Energy (HE)*; och *Low Cost (LC)*.

Tabell 3.1 Jämförelse av olika batterityper/behov för olika fordonstyper

Fordonstyp	El-Effekt (kW)	El-Energi (kWh)	Cykeltid	Antal cyk	Livslängd (år)	Batt Typ
HEV Lastbil/Buss	100-250	20-30	0,5-1 min	100k-1M	5-10	VHP
PHEV Buss	150	50-100	30 min	20k-100k	5-10	HP/HE
SWAP eBuss	150	200	1-2h	5k-10k	5-10	HE
HEV Bil	50	2	1 min	50k-500k	10-15	VHP/HP
PHEV Bil	50	2-6	15-30 min	10-20k	10-15	HP/HE
BEV Bil	30	30	1h	10k	10-15	HE
UltraLätt-fordon	1-5	0,5-5	1h	2k-5k	5	HE/LC

3.1 Definition av batterisystem

Förutom celler innehåller ett batterisystem flera komponenter för att säkerställa driftsparametrar, temperatur och säkerhet.

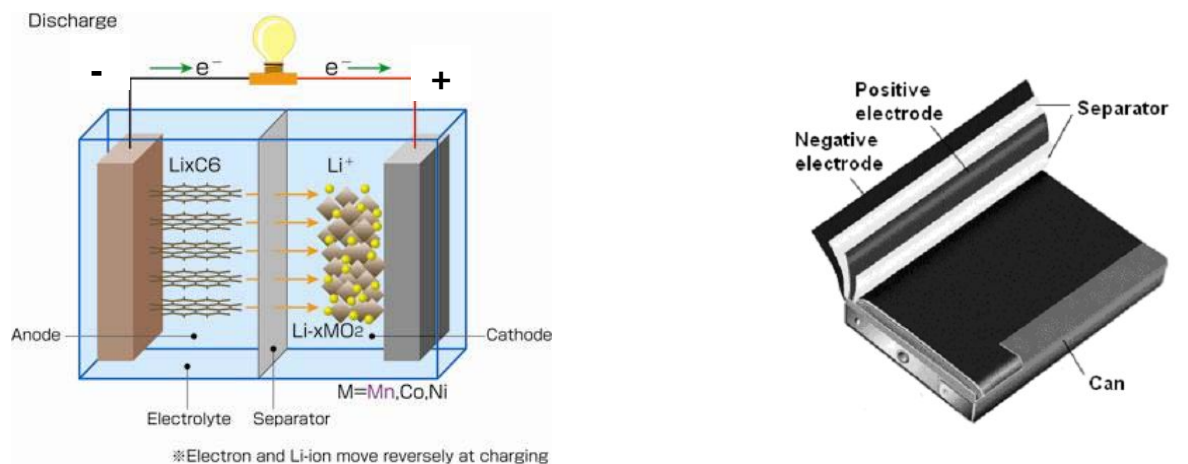
- **Batterimoduler med celler:** Ett batterisystem består av ett antal celler i serie (för att uppnå önskad spänningsnivå) och parallellt (för att uppnå önskad kapacitet). Vanligtvis bygger man moduler av celler och sedan sammanfogar ett antal moduler till ett system.
- **Battery Management System (BMS):** en eller flera styrenheter som övervakar och kontrollerar cellerna, med avseende på bl.a. spänning och temperatur, och hela systemet i termer av laddningstillstånd (SOC), hälsotillstånd (SOH) och ur ett säkerhetsperspektiv. BMS är även den enhet som kommunicerar med drivlinan/fordonet.
- **Kraftelektronik:** för att distribuera strömmen för att effekt kan levereras/tas emot. Även ett antal säkerhetsanordningar finns så som säkringar, reläer, kontaktorer och säkerhetsfrånkopplare.
- **Kablage:** för att koppla samman olika övervakningsenheter för varje modul med huvudstyrenheten.

- **Struktur:** för att bära upp cellerna: en plast- eller metallstruktur som håller cellerna tillsammans. Om cellerna är vätskekylda är denna struktur mer komplex för att även innefatta kylmedium och cirkulation av denna.
- **Temperaturreglering:** för att värma, kyla cirkulera kylmediet (t.ex. fläktar och pumpar). Kylning kan vara antingen aktiv eller passiv. Att hålla batterisystemet vid en optimal temperatur är väsentligt för att erhålla prestanda och livslängd. Temperaturen begränsande och t.ex. redan vid 10 °C är laddningsbetingelserna för Li-jonbatterier starkt reducerade.

Det finns tre huvudtyper av celler vilket definieras av inkapslingen: cylindrisk, prismatisk och "pouch-cell". De två första har en hård metallkapsel som innesluter cell-sandwichen, antingen rullat (cylindriskt) eller hopvikt (prismatisk). "Pouch-cell" (påscell) är däremot en cellsandwich som "vakumpackas" i en påse som försluts. Påsen formas därmed runt cellen och ger inget större mekaniskt skydd.

Den totala energin (kWh) i ett system är spänningen multiplicerad med kapaciteten. För de flesta Li-jonbatterier är cellspänningsintervallet ca 2,5-4,2 V, men man anger ofta medelspänningen under urladdningen, nominell spänning, som typiskt är 3,2-3,7V, beroende på kemi. Kapaciteten (Ah) varierar mycket beroende på applikation och celldesign; mer Ah ger större och tyngre cell. Det finns praktiska gränser för kapacitet i en enskild cell både uppåt och neråt, som beror på säkerhets- och produktionsaspekter. Energiinnehållet anges i kWh och är den integrala produkten av spänning och ström under en urladdning. Typiskt för fordonsceller är att de ligger mellan några få kWh upp till 100 kWh.

I ett Li-jonbatteri under urladdning frigörs litiumjoner från anoden och rör sig i elektrolyten till katoden där den tas upp. Detta ger en transport av en elektron per överförd Li-jon i den yttre kretsen (applikationen) som utför nyttigt arbete. Litiumjoner träder in och ut i elektrodmaterialen via interkalationsprocesser, där litiumjonen reversibelt förs in eller ut ur en värdstruktur, som tex grafit eller metalloxider, utan att värdstrukturen ändras. Under drift i ett Li-jonbatterier sker det enligt följande principskiss.



Figur 3.1. Till vänster visas litiumcellens arbetsprincip och till höger uppbyggnad av prismatisk cell.

Det vanligaste anodmaterialet är grafit, vilket har en teoretisk kapacitet på ca 370 Ah/kg. Katodmaterialet utgörs idag antingen av en litium-metalloxid eller litium-järnfosfat och är den komponent som begränsar cellens kapacitet och energiinnehåll mest. För närvarande används katodmaterial med ca 200Ah/kg vilket ger cellkapaciteter i kommersiella celler begränsad till ca 160 Ah/kg, eller energiinnehåll begränsat till ca 600Wh/kg.

Elektrodmaterialen är belagda på strömtilledare av tunn (0,01-0,1mm) metallfolie: aluminium för katoden och koppar för anoden. Elektrolyten är en vätska, en polymer eller en gel, i vilken ett litiumsalt (vanligtvis LiPF_6) är löst. Olika additiver tillsätts till elektrolyten för att förbättra prestandan, livslängden och/eller säkerheten. Vid höga cellspänningar (vid uppladdade celler) är elektrolyten instabil och kan orsaka oönskade sidoreaktioner. Forskning pågår för att öka elektrolytens stabilitetsfönster. Vanligtvis är elektrolyten innesluten i en separator. Separatoren är tillverkat av ett porös och inert material, som förutom förhindrar en intern kortslutning, möjliggör jonledningen. Separatoren kan även agera som en intern säkerhetsfunktion. Till exempel finns det separatorer där porerna sluts vid förhöjda temperaturer och vilket förhindra fortsatt laddning/urladdning. Om man använder en fast polymer som elektrolyt kan man utesluta separatoren.

Forskning fokuserar på att utveckla nya material som har en högre kapacitet och är säkrare, samt att öka nyttjandegraden av de aktiva materialen och att utveckla nya material med högre kapacitet och/eller högre spänning.

Att leverera energi och effekt är batteriets huvudfunktioner, men batterisystemet måste även uppfylla andra funktionella krav i fordonsapplikation, och alla är relaterade till totalkostnaden för batterisystemet.

3.1 Effekt- och Energiförändring

Den *användbara* energin för ett specifikt fordon definieras som det energibehov för en tänkt räckvidd/bränslebesparing. Den totala *installerade* energin i ett batterisystem är alltid högre då hela "fönstret" av energi inte kan användas. Till största mån vill man undvika höga och låga laddningsnivåer (State of Charge, SOC) på grund av följande:

- Begränsad effektförmåga vid höga och låga SOC. Vid låga SOC är urladdningseffekten lägre och vid höga SOC är laddningseffekten låg.
- Undvika höga SOC för att förhindra säkerhetsrisker som kan uppkomma vid överladdning.
- Livslängd. Ett begränsat "SOC-fönster" är generellt bättre för lång livslängd än ett brett. Vissa material genomgår strukturella förändringar vid höga och/eller låga SOC-värden, som är irreversibla och försämrar livslängden.

Vanligtvis är SOC-fönstret för en BEV ca 8 0% av batteripackens nominella kapacitet och för en PHEV ca 70 %. För en HEV är SOC-fönstret betydligt lägre, vanligtvis 5-30 %, eftersom HEV-batterier måste tåla betydligt fler upp- och urladdningar. Ju mer effektkrävande applikation desto mindre bör SOC-fönstret vara då det är svårt att möta effektbehoven vid låga SOC-nivåer.

Effekt är ett mått på hur snabbt ett batteri kan leverera den inneboende energin, och beror på de kemiska egenskaperna och varierar över SOC-fönstret. Vanligtvis definieras effektprestandan för några typiska tidsintervall: 1) momentan topp effekt, 2) medeleffekt under 10 sekunder, 3) under 2 minuter, och 4) medeleffekt vid fullständig urladdning.

För att under drift kunna säkerställa att tillräcklig effektprestanda i PHEV- och HEV-applikationer styrs SOC-fönstret för att matcha effektbehovet. Detta ökar kravet på bra batteristyrning. För en ren BEV är detta inte lika uttalat.

För en BEV dimensioneras batterisystemet så att tillräcklig räckvidd erhålls. Det medför ofta att batteriets effektprestanda är högre än vad som krävs, dvs effekt/energi-förhållandet är lågt. I en HEV är det motsatt: förhållande effekt/energi är högt. Det betyder att batteriet urladdas med höga hastigheter, och detta medför högre krav på termisk styrning. Det gör att olika celler måste användas i de olika applikationerna vilket medför olika prisbilder per kWh. De celler som är optimerade för BEV-applikationer är i regel billigare per kWh än de för HEV.

3.2 Livslängd

En cell degraderar även om den inte används – dvs. cellen har en *kalenderlivslängd*. Åldrandet beror på kemiska sidoreaktioner, både önskade och oönskade, som sker mellan elektroderna, elektrolyten och andra tillsatser. Åldringsmekanismerna går inte att stoppa, men genom rätt förfarande kan hastigheten minskas, t.ex. genom att lagra vid en optimal temperatur och SOC-nivå. Åldrandet resulterar i en ökning av impedansen och förlust av kapacitet.

- Ett batteri har även en *cyklingslivslängd*, dvs. att upp- och urladdningsförfarandet påverkar livslängden. Cyklingslivslängden anges i antal cykler av upp- och urladdning.
- Kalenderlivslängden anges vanligtvis i år och cyklingslivslängden i antalet cykler inom ett angivet SOC-fönster med bibehållen prestanda.

Vilken livslängdsparameter som är viktigast beror på tillämpningen, dvs vilket typ av fordon som avses. En personbil står parkerad största delen och blir kalenderlivslängden blir begränsande. En buss eller taxibil används under största delen av dygnet och cyklingslivslängden dominerar.

3.3 Säkerhet

För alla batterisystem i alla applikationer är säkerhet en viktig fråga. Detta eftersom batteriet innehåller mycket energi som snabbt kan frigöras. Det finns flera mekanismer som kan leda till allvarliga fel i en Li-joncell, och några kan leda till 'thermal runaway' som i sin tur kan resultera i batteribrand.

En 'thermal runaway' kan starta genom en intern kortslutning eller på grund av överhettning av cellen. Intern kortslutning kan uppstå efter viss tid eller efter olämplig användning, tex genom att litium deponeras på anoden istället för att interkaleras. Deponering av litium på ytan av anoden är mycket reaktiv och kan ske vid felaktig laddning av Li-jonbatterier, särskilt vid låga temperaturer.

Föroreningar i elektroder och separator från produktionen kan också orsaka intern kortslutning i en cell i ett senare skede i batteriets liv då de kan växa till under cykling. Därför är det viktigt att cellproduktionen sker i en ren och torr miljö, vilket gör att produktionskostnaderna ökar avsevärt. Av de ingående materialen är det framför allt elektrolyten som är brandfarlig eftersom den oftast består av organiska lösningsmedel. Säkerheten och konsekvenserna av en 'thermal runaway' beror även på vilken typ av batterikemi som använts; framför allt katodmaterialet, som kan katalysera vissa oönskade sidoreaktioner.

Fordonsindustrin har lagt mycket stort fokus på säkerhetsaspekter för batterisystem för fordon, och använder säkerhetskrav på flera nivåer: från cell till system. Det betyder att det finns bra säkerhetsfunktioner i dagens fordonsbatterier, alltifrån inbyggda kortslutningsskydd i cellerna till skyddsmekanismer för högspänningselektroniken i systemet. Dagens batterier är vanligtvis designade för lägre laddningshastigheter och högre urladdningshastigheter för att minimera säkerhetsriskerna vid uppladdning.

3.4 Utvecklingspotentialer för Li-jonbatterier

Flertalet batterikemier har utvecklats för xEV, och den hittills mest använda är NiMH i Toyota Prius. Dock har det visat sig att det är energitätheten som är den mest dominerande faktorn för batteri-design för elbilar, vilket har lett till att Li-jonbatterier har blivit den dominerande kemin. Li-jonbatterier är en hel familj av batterikemier och olika kemikombinationer är mer lämpade för att matcha olika prestandakrav: effektuttag, temperaturegenskaper, etc.

De celler som är mest lämpade för fordonstillämpningar har vanligtvis en energitäthet på 100-180 Wh/kg och med en kapacitet på 4-40 Ah/cell. Dessa celler förväntas ha en livslängd av minst 10 år under förutsättning att både temperaturen och driftsförhållandena noggrant styrs och kontrolleras.

Valet av batteri beror även på vilken typ av fordon som avses. En viktig faktor som styr kostnadsbildningen är förhållandet effekt/energi. Viktigt att ha i åtanke är att det inte samtidigt går att optimera en battericell för både effekt och energi. Nedan följer en översikt över dagsläget vad gäller cellkemi och designparametrar för de olika typbatterierna.

Tabell 3.2 Klassificering av olika batterityper och karakteristika

Batterityp	Very High Power	High Power	High Energy	Low Cost
Cellkemi	NiMH LTO	LTO NMC LFP	NMC MnO	LFP NAC
Kritiska designparametrar för batteripack	Vätskekylning Kraftel Kablage	Kylning Kraftel	BMS Mekanisk kapsling Låg vikt	Enkelhet

Utvecklingsfokus inom fordonsbatterier har skiftat under de senaste fem åren från materialutveckling mot implementeringsaspekter, såsom packdesign, säkerhetsaspekter och BMS.

3.4.1 Cellutvecklingen historiskt sett

Den första kommersiella uppladdningsbara Li-jonbatteriet såldes i Japan 1991. Denna cell hade en katod av LiCoO_2 (LCO) och en anod av 'hard carbon'. Sedan dess har prestandan och kostnadsbilden förbättrats avsevärt.

För samma cellformat, 18650, har kapaciteten sedan början på 90-talet ökat från 0,8 Ah till dagens 2,6 Ah; en ökning med mer än tre gånger och beror på materialutveckling, reducering av icke-aktiva material och förbättrade produktionsmetoder. Motsvarande energitäthet har ökat från ca 90 Wh/kg till 200 Wh/kg. Kostnaden för 18650-celler har reducerats kraftigt och största faktorn är den ökade produktionsvolymen. Denna celltyp är dock inte lämplig för fordon, och kostnadsreduktionen för små celler kan inte direkt översättas till stora celler. Största skillnaden är kvalitetskontrollen.

Dagens batteriteknologier är både för dyra och för skrymmande för att verkligen göra BEV konkurrenskraftiga för fordon jämfört med en drivlina med förbränningsmotor. Fokuserade R&D-insatser förväntas leda till förbättrade, lättare och billigare batterilösningar, både på cell- och systemnivå.

Utveckling av nya material sker inom två viktiga områden: aktiva och passiva material. Med passiva material menas alla material i en cell som inte bidrar med laddningskapacitet, tex. separator, bindemedel, additiv och förpackning. Dessa har fått ökad uppmärksamhet under de senaste åren eftersom de är väsentliga för säkerhet men också för produktionen. Utveckling sker både i stora företag såsom BASF, Hitachi Chemicals, NEC Energy Devices, Celgard, JSR Corporation, och i små företag som Envia Systems samt i traditionell akademisk miljö såsom Argonne Nat. Lab, LBNL, etc, såväl som vid svenska universitet.

Alltsedan introduktionen av Li-jonbatteriet 1991 så har kapaciteten i batteriet begränsats av katodmaterialet. Där finns idag nya katodmaterial under provning/utveckling som möjliggör en högre cellspänning på ca. 4,8V och som har hög kapacitet (250-300 mAh/g), vilket kan resultera i

batterisystem med en energitäthet omkring 200 Wh/kg inom 10-15 år. En annan aspekt av dessa nya material är att katodmaterialen har en billigare materialsammansättning, med mer mangan och mindre andel dyr kobolt. På anodsidan däremot går utvecklingen av energitätare material mot dyrare lösningar. Totalt sett borde dessa nya batterier behålla kunna kostnadsnivån, men få upp till dubbel kapacitet och prestanda inom 10-15 år.

Historiken för "akademiskt sett färdigutvecklade" katodmaterial ser grovt ut så här:

- Gen0(Sony 1991),= LiCoO_2 ,
- Gen 1a(NEC 1995)= LiMnO_2 ,
- Gen 1b(USABC 1998)= $\text{LiNi}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}_2$,
- Gen2(USABC 2001)= $\text{LiNi}_x\text{Co}_{1-x-y}\text{Al}_y\text{O}_2$ (NCA), LiFePO_4 , LFP (2001)
- Gen3(USABC 2007)= $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ (NMC)

Kapaciteten för dessa material har typiskt varit mellan 100-200 mAh/g och utvecklingsfokus har varit livslängd, säkerhet och kostnad.

Utvecklingen inom passiva material drivs i stor utsträckning av cellproducerande företag, som fokuserar med förbättringar inom både binder, separator, skyddande lager och produktionsprocess. Utvecklingen syftar till bättre säkerhet, livslängd och effektprestanda men också billigare produktionsprocess. Japan leder utveckling av cellproduktionsprocesser som kommer sänka produktionskostnader såsom snabbare torkprocesser, bättre kvalitetskontroll av ingående material.

Det forskas mycket inom elektrolyter, men val av material i kommersiella celler har mer eller mindre varit det samma de senaste 10 åren. Kommersiell utveckling är riktad mot materialkvalitet/renhet, vilket har visat sig vara helt avgörande för cellernas livslängd och säkerhet. Mycket hög renhet krävs för de ingående materialen i elektrolyten, det behöver vara minst 99,99 % renhet på lösningsmedel för god livslängd, gärna en 9 till i decimalerna. Den höga renheten är i sig kostnadsdrivande eftersom det kräver speciella processer. Även koncept där metalliskt litium används som anod vinner allt mer mark som en mycket lovande lösning för BEV-batterier. I Paris finns idag ca 2000 elbilar inom bilpoolskonceptet 'Autolib' där alla bilarna är utrustade med denna teknologi.

Frågan är hur länge det förväntas ta för ett nytt material från "färdigforskat" till kommersiell lansering i fordon. Fordonsbatteribranschen (t.ex. Ford/GM, Mitsubishi, Honda, NEC och AESC) är eniga om svaret: 3-5 år. Det gäller även att beakta tiden det tar från färdiga celler till det finns verifierade fordon för serieproduktion. Till denna tid bör produktutvecklingstiden för fordon läggas. Enligt Advanced Automotive Battery bör den teknologi som ska finnas i fordon 2020 redan 2013 finnas verifierad i serieproducerade celler.

Nyckelfrågeställningarna för forskning och utveckling inom cellmaterial listas här nedan, uppdelat i inkrementell utveckling och radikal .

Forskningsområden för inkrementella förbättringar:

- Nya katodmaterial som möjliggör högre energitäthet (kapacitet och spänning)
- Stabilare elektrolyter, inklusive fluorfria salter, som är kompatibla med högre cellspänning
- Nya anodmaterial (kiselbaserade) som möjliggör högre kapacitet

Forskningsområden för radikala förbättringar:

- Nya katodmaterial som möjliggör 2-elektronsreaktioner (högre kapacitet)
- Nya cellkoncept: Na-jon, Mg-jon, Li-S, Li-luft

Na-jonbatterier torde ge samma prestanda som dagens Li-jonbatterier, men till ungefär halva cellkostnaden.

De två sätt som har störst potential att lyckats vad det gäller att höja energitätheten är: material med högre kapacitet (mAh/g) eller utveckla material som ger en högre cellspänning. Denna utveckling torde kunna öka energitätheten för Li-jonbatterier till ca 300 Wh/kg. Dock återstår ett flertal fundamentala frågeställningar att lösa. Till exempel finns i dagsläget ingen kommersiell gångbar elektrolyt för 5V-batterier.

Det finns andra teknologier/koncept i forskningsstadiet som har potential att ge ökad batteriprestanda i termer av energitäthet. Framst är det Li-S och Li-luft, vilka har den högsta teoretiska energitätheten (>2500 Wh/kg) av de framtida koncepten. Den praktiska och användbara energitätheten är dock enbart 2-3 gånger högre än dagens Li-jonbatterier. Tyvärr finns en mängd fundamentala problem kvar att lösa och i dagsläget är det inte säkert att någon av dessa teknologier når fordonsmarknaden. Säkerheten och livslängden är idag de största frågeställningarna. Det bör noteras att även om energitätheten kan bli högre än för dagens Li-jonbatterier så är effekttätheten inte tillräcklig för att möjliggöra användning i effektkrävande applikationer, så som bussar och lastbilar.

Dr Yoshino från Asahi Chemical Corp, en av centralfigurerna bakom dagens Litium-jonbatteri presenterade batteriets historia vid ett seminarium på IVA under mars 2013. På frågan om vad han trodde skulle vara den största innovationen i nästa generation batterier svarade han att det troligen skulle röra sig om integrerade battericeller med en spänning mellan 300-400 V. Det vill säga man packar batterierna redan på cellnivå. Utmaningen ligger i cellbalansering och termisk övervakning. Utmaningen är stor men om den går att produktionsanpassa torde energitätheten kunna öka med 5-10 gånger.

Summering utvecklingspotential:

Dubbel energitäthet i batterisystem för fordon, till samma kostnad som idag, om 10-15 år. Utvecklingen dit kommer gå i flera steg. Sannolikheten är liten att någon av de nya koncepten är praktiskt användbara i fordon innan 2030, och den dominerande teknologin för xEV kommer vara vidareutvecklade Li-jonbatterier.

3.5 Bränsleceller

Bränsleceller är elektrokemiska konstruktioner som omvandlar den energi som finns lagrad i ett bränsle till elektrisk energi. Det direkta sättet vilket omvandlar energin i bränsleceller ger dess ungefär dubbla verkningsgraden jämfört med en explosionsmotor. Väte i bränslecellen kombineras med syre från omgivande luft och leder till värme respektive elproduktion. Restprodukten är vatten.

För traktionstillämpningar i fordon behövs bränsleceller med korta uppstarttider, hög effekttäthet och flexibel effektanpassning under drift. Idag passar dock bara en bränslecelltyp in på den beskrivningen, nämligen PEFC. På grund av sin konstruktion, med vattenmolekyler funktionellt inkorporerade i elektrolytmaterialet, arbetar de vid en förhållandevis låg temperatur, strax under kokpunkten för vatten (100 C). För effektanpassningens skull kombineras bränslecellen i Bränslecellsfordon (FCV) med mindre batteripack eller superkondensatorer, vilka absorberar snabba svängningar i effektbehovet.

3.5.1 Utvecklingen av bränslecellsystem

Dagens bränsleceller för fordon baseras på polymer-elektrolyt proton/membran utbyten (PEM) och drivs vid låga temperaturer. Katalysatorer av framförallt Platina-typ används för att stimulera syre/väte reaktionen. Förbättringar i stack-konstruktioners hållbarhet, specifik effekt och kostnader har kommit från nya metoder att bygga aktiva katalytiska ytor och från membranmaterialen, samt strukturen i stort. Man har nu t.ex. kunnat verifiera mer än 2 500 tim livslängd (svarande mot ca 100 000 km körsträcka) och med avancerade testprotokoll har livslängder för membranerna kunna uppvisa 7 000 tim eller längre.

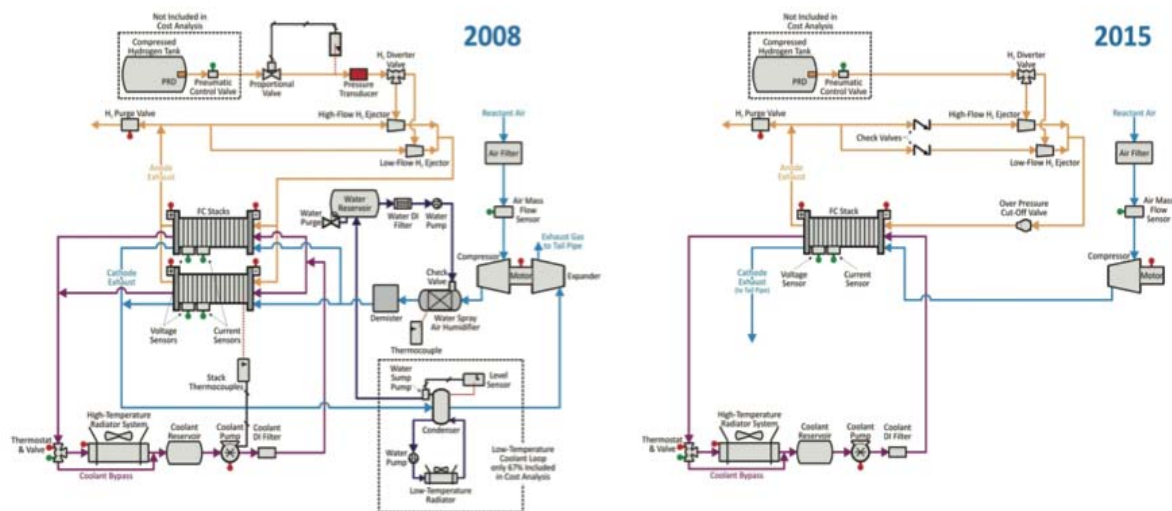
Bränslecellkonstruktionen har under den senaste 10-årsperioden gjort stora framsteg och många delar har förenklats avsevärt. I fig 3.3 kan man till exempel se hur konstruktionen kommer att ha förfinats mellan 2008 och 2015.



Eftersom vätgaslagringen i en FCV är relativt stor kan något nämnas om själva lagring ombord på fordonet. Idag används 35 MPa eller 70 MPa system. Tekniken är välbeprövad (Jorgensen, 2011). Materialet i tanken är kolfiberförstärkt komposit (CFRC). En tank för ca 5,6 kg vätgas och 70 MPa kostar ca \$3500. Fram till 2030 beräknas dock denna kostnad ha sänkts till \$ 2400. Dvs med ca 30 %.

Fig 3.2, Bränslecellsstack

Enligt National Petroleum Council i USA har bränslecellstekniken och FCEV utvecklats så starkt under det senaste decenniet att i jämförelse med konventionella bensinbilar bedömer de att från nästa generations bränsleceller är det endast kostnaderna som är det kvarvarande hindret för en snabb kommersialisering.



Figur 3.3 Konstruktionsförändringar enl. James et al (2010) mellan 2008 och 2015

3.5. 2 Introduktionsplaner

I Nyman (2013) finns en bra sammanfattning av bränsleceller från ett elektromobilitetsperspektiv. I denna rapport beskrivs både kommersiella satsningar som forskningsläget och aspekter kring produktion, distribution och lagring av vätgas.

Under 2006 gick Daimler, BMW, GM Europe, Ford och VW ut tillsammans med MAN och energibolagen Shell-Hydrogen samt Franska Total ut med information att inleda en kommersialisering av FCEV tekniken. Under 2009 publicerades sedan ett "Letter of Intent" undertecknat av bl.a. Daimler, Ford GM/Opel, Honda, Hyundai/Kia, Renault-Nissan samt Toyota där årtalet 2015 omnämns som introduktionstidpunkt. Ett mål som indikeras är att erbjuda prisvärda fordonsalternativ redan kring 2017, även om många experter pekar på årtal som 2025 eller senare.

Det ökande intresset kring bränslecellerna kan tyda på att industriaktörerna nu börjar betrakta bränsleceller som mogen teknik, färdig att lämna prototypstadiet. Fast på samma sätt som batterifordon är beroende av en väl utbyggd laddinfrastruktur är bränslecellsfordonen beroende av en väl utbyggd vätgasteknik (produktion, distribution, lagring, tankning etc.). Många tecken finns

nu att bränslecellsfordonen kan spela en viktig del i omställningen av EU's transportflotta fram till 2050.

De internationella forskningsinsatserna rörande bränsleceller har varierat kraftigt över åren. För ca fem år sedan bedömdes vätgas/bränslecellsfordon tillhöra en "avlägsen framtid". I mars 2013 indikerade dock DOE i USA att man återigen planerar stöd för bränslecellsutvecklingen med fokus på tunga fordon/bussar. I Tyskland driver ett antal aktörer frågan om utbyggnad av vätgasinфраstruktur och både Daimler och BMW har bränslecelldrivna fordon på agendan med sikte på normalkonsumenterna och fordonslanseringar före 2020.

I USA har Department of Energy (DOE) under senare år utvärderat över 180 bränslecellsfordon och 25 tankstationer för vätgas. På många håll i världen har olika demonstrationer genomförts avseende framförallt bränslecellsbussar.

I den sammanfattande översikten av bränsleceller beskriver Nyman (2013) bland annat de kommersiella aspekterna från ett antal fordonstillverkare. Produktionssiffrorna som nämns omfattar tillverkningen av några hundratusental fordon (över tiden), med start runt 2015 och att det idag finns industriöverenskommelser, produktionsmål och strategier för marknadsintroduktioner i länder som; Tyskland, Storbritannien, Japan, Kalifornien och även Skandinavien.

Sammanfattningsvis kan nämnas:

- Tyskland¹ tror på en flotta om 150 000 FCEV år 2020 och ca 1,8 miljoner år 2030
- Storbritannien² uppskattar att fler än 1,5 miljoner FCEV kan finnas på brittiska vägar 2030
- Japan³ har presenterat planer på försäljning av 2 miljoner FCEV till 2025
- I Kalifornien⁴ är FCEV en integrerad del av en politisk plan att nå 1,5 miljoner nollutsläppsfordon till 2025
- För skandinavisk⁵ del siktas det på 500 personbilar (samt 100 bussar och 500 specialfordon) till 2015.

4 Kostnadsanalyser Li-jonbatterisystem

Analysen av kostnadsparametrar och möjlig utveckling har gjorts i olika huvudområden: materialkostnader, systemkostnader, produktionsmetoder, standardisering, återanvändning och

¹ NOW GmbH, H.Butsch; *The fuel cells and hydrogen program in Germany*, <http://tinyurl.com/butch-stockholm-pdf>, 2013

² UK Government, *Future of hydrogen power cars mapped out*, <http://tinyurl.com/awbt2gn>, 2013

³ Fuel Cell & Hydrogen Energy Association, *International Developments on Fuel cell and Hydrogen Energy*; <http://fchea.org/index.php?id=25,2013>

⁴ Office of California Governor, *2013 ZEV Action Plan*, [http://opr.ca.gov/docs/Governor's_Office_ZEV_Action_Plan_\(02-13\).pdf](http://opr.ca.gov/docs/Governor's_Office_ZEV_Action_Plan_(02-13).pdf), 2013

⁵ Scandinavian Hydrogen, *The Scandinavian Hydrogen Highway Partnership*, <http://scandinavianhydrogen.org>, 2013

återvinning. Återanvändning är väsentligt eftersom det kan komma att påverka den totala kostnadsbilden för batterier i xEV-applikationer.

Potential för kostnadsreduktion finns längs hela kedjan från material, celler och till batterisystemet; inkluderar material- och investeringskostnader. Utöver detta finns det även utvecklingskostnader som påverkar prisbilden framöver, men dessa har inte inkluderats i analysen.

De dominerande faktorerna som påverkar kostnadsutvecklingen för Li-jonbatterisystem är:

- Cellmaterial. Förbättrade material som ger lägre kostnader och/eller högre energitäthet
- Systemdesign. Förenklade och välintegrerade batterisystem.
- Produktionsmetoder. Uppskalning av produktionen av stora celler och batterisystem
- Standardisering

4.1 Cellmaterial

Idag fokuseras FoU-resurser till att förbättra cellers energitäthet genom nya material. Med en ökad energitäthet kan antalet celler i ett batterisystem minskas, räckvidden förlängas, eller livslängden öka. Alla dessa gör att den totala batterikostnaden minskar.

Katodmaterialet står för största delen av cellmaterialkostnaden, och resulterar i cirka 20% av kostnaden för ett färdigt batterisystem. Katodmaterialtillverkare är en diversifierad marknad, men fyra bolag har tillsammans 40%: Nichia, Umicore, L&F och LG Chem.

Anodmaterial utgörs huvudsakligen av naturlig grafit (kostnadsdrivet), men ytmodifierad naturlig grafit (SMG) och syntetisk grafit vinner marknad. Tre stora bolag har 50 % tillsammans: BTR, Hitachi Chem, Shanghai Shaning. Inom elektrolytbranschen är det kostnadspress och hög kvalitet som gäller. Det är traditionell elektrolyt som dominerar med tillsatser av olika additiv. Fyra stora bolag tillverkar 50 % av volymen: Ziang, Mitsubishi, UBE och Panax. På separatorsidan är det nya kerambelagda membran som växer men standardmembran dominerar ännu. Fyra ledande har 70 %: ASAHI, Celgard, Toray och Xianxing.

Advanced Automotive Batteries (AAB) som bevakar batteribranschen presenterade nyligen nuläget och framtida kostnadsprediktioner för fordonsbatterisystem baserat på intervjuer av alla större fordonsindustrier, cell- och systemproducenter. Prestandan på cellnivå är i dagsläget 125-160 Wh/kg och ca 10 års livslängd (om temperaturen styrs till ett snävt intervall ca 30-40°C).

Kostnaden för ett batterisystem för BEV och PHEV är enligt AAB's analyser ca 500 \$/kWh för PHEV och 400 \$/kWh för BEV. Cellkostnaderna utgör ca 60 % av den totala kostnaden och återstående 40 % härrör från systemintegration och framförallt kostnaden för BMS och dess funktionalitet. Prediktionen av cellkostnad för år 2016 är ca 260 \$/kWh för BEV-celler samt 350 \$/kWh för PHEV-celler. Cellkostnadsmodeller presenteras i figuren nedan, utifrån en kostnadskalkyl i cellproduktionsled. Katodmaterialet står för ungefär hälften av cellmaterialkostnaden och övriga material (anod, separator, elektrolyt, metallfolier och inneslutning) står för andra halvan.

36-Ah EV Pouch Cell Price

1-GWh plant, 2016 timescale

NMC Cathode, Pouch Cell, 8 Million Cells / Year			
Component	\$	Per kWh	%
Materials	17.8	134	56%
Factory Depreciation	4.8	36	16%
Manufacturing Overhead	1.92	14	6.6%
Labor	1.30	10	4.4%
Un-yielded COG	25.8	194	83.7%
Scraps, 4%	1.08	8.1	3.4%
Yielded COG	26.9	202	87%
Company Overhead	4.7	36	15.0%
Burdened Cost	31.6	237	100%
Warranty & Profit	3.2	24	10%
Price	34.8	261	135%
Gross Margin	7.9		23%

25-Ah PHEV Cell Price

1-GWh plant, 2016 timescale

NMC Cathode, Metal Can, 10 Million 25Ah PHEV Cells / year			
Component	\$	Per kWh	%
Materials	15.6	169	53%
Factory Depreciation	5.3	58	18%
Manufacturing Overhead	1.78	19	6.1%
Labor	1.15	13	3.9%
Un-yielded COG	23.9	259	81.6%
Scrap, 4%	0.99	10.8	3.4%
Yielded COG	24.9	270	85%
Company Overhead	4.4	48	15.0%
Burdened Cost	29.2	318	100%
Warranty & Profit	2.9	32	10%
Price	32.2	350	135%
Gross Margin	7.3		23%

En slutsats man kan dra av detta är att en halvering av elektrodmaterialpriser kan förväntas ge 25 % billigare celler och 13 % billigare batterisystem. En halvering av kostnaden för systemintegration ger däremot 20 % lägre batterisystemkostnad.

4.2 Systemdesign

Kostnad för ett batterisystem (utöver celler) är relativt stor. AVL m.fl. har rapporterat om möjligheten till stora vidareutvecklingar av system mot lägre kostnader utan försämrad funktionalitet/säkerhet. Det är ännu mer oklart vad gäller kompetens inom systemdesign: här finns stora aktiviteter både hos OEM, Tier 1 och hos konsultbolag. Trenden är att OEM vill ha så stor inblick som möjligt i cell- och systemdesign i detta skede, men att man över tiden, när man vet att systemen är säkra nog, kommer out-sourca detta. AAB har kortfattat summerat marknadsläget inom fordonsbatterier enligt följande:

- "6 år in i nuvarande elbilsvåg" råder fortfarande oklarhet i värdekedjan/affärsmodell och marknaden är ännu omogen: vem tillverkar batterisystem? OEM, Tier 1, eller celltillverkare.
- kraftig konsolidering inom celltillverkare är att vänta (endast de ekonomiskt starka kommer överleva eftersom det är överetablering av celltillverkningsfabriker, med endast 17 % beläggning 2012)
- stor variation av systemdesign och val av cellkemi/typ hindrar standardisering och kostnadsskärning. Konsolidering/standardisering väntas ske inom de kommande 5 åren.

4.3 Produktionsmetoder

För att nå en kostnad på 325 \$/kWh för fordonsanpassade celler måste tillverkningsprocessen vara så effektiv att materialkostnaderna utgör minst 80 % av den totala produktkostnaden, enligt produktionsforskare vid RWTH Aachen och Fraunhofer Institutet. De tror att målet kan nås vid en årlig produktion av 10 miljoner celler.

Givetvis gäller det att finna högkvalitativa och billiga produktionsmetoder för de ingående materialen. Materialval kommer att bli avgörande för att sänka kostnaderna och till exempel genom rätt val av separator kan cellkostnaden minskas med över 25 %.

Cellkostnaden är även starkt kopplad till antalet producerade kWh, och enligt tyska M+W kan man nå en kostnadsminskning på 25 % genom att öka produktionsvolymen från 100 MWh/år till 1 GWh/år. Små tillverkare kommer att ha svårt att hävda sig i avseende på priset. Dock är det kvaliteten på de producerade cellerna som är ytterst avgörande – 'low-cost cells vs. high-quality cells of low cost'.

Personalkostnaderna har varit en av anledningarna till att man vill lägga produktionen i låglöneländer. Dock utgör lönekostnaderna 5-10 % av totalkostnaden för cellerna då produktionen blir mer och mer automatiserad för att öka kvaliteten. I vissa länder där lönekostnaderna är lägre kan till exempel energikostnaderna vara högre och produktionsutbytet lägre så att totalkostnaden ändå blir högre. Produktionskostnaden i Tyskland, Kina och Ryssland skiljer som mest 6 %, enligt M+W:s beräkningar. Tar man hänsyn till produktionsutbytet så blir skillnaden ännu mindre.

4.4 Standardisering

En av de mest kostnadsdrivande aspekterna, i negativ bemärkelse, är att fordonstillverkarna har mycket olika specifikationer på system och komponentnivå. Standardisering av celler är ett måste för att kostnaderna ska sänkas, både vad det gäller format och kapacitet (Ah) på celler, och på övriga delar i systemet.

En jämförelse gjord av franska Avicenne visar prisutvecklingen för 18650-celler, vilka inte är anpassade för fordonsapplikationer men som standardiserades tidigt i just formatet. År 2000 kostade en 18650-cell ca 2,6 \$/Wh, och 2012 endast 0,2 \$/Wh. Detta kan ses som ett mått på hur standardisering av cellformatet kan påverka cellkostnaden. Dock är överkapaciteten i produktionsvolymerna av 18650-celler som till största del pressar ner priserna. Även genom att standardisera många av kringkomponenterna i ett batterisystem kan kostnaderna minskas avsevärt.

Eftersom specifikationer skiljer inom branschen sker det mycket testning, både i producerande organisationer och i användande. Idag testar varje biltillverkare batterier på sitt eget sätt; och batteritillverkarna på ett annat. Alltså sker det en stor mängd test/verifiering och det är sällan resultaten är "översättningsbara" mellan olika batterier/tillverkare/användare. Detta förfarande är typiskt i tidiga skeden för nya produkter. Det krävs dock stora överenskommelser mellan olika parter för att nå standarder. METI/Japan tog upp detta för några år sedan som ett hinder för utvecklingen av billiga batterier och ett samarbete mellan USA och Japan om standardisering pågår sedan 2007.

Standardiserade celler torde ge en kostnadsreduktion på 5-10% för ett batterisystem för fordonsapplikationer.

4.5 Återanvändning/Re-manufacturing

Med andrahandsanvändning avses möjligheten att använda uttjänta fordonsbatterier (för framdrivning av el- eller hybridfordon), hela system eller delsystem, i nya applikationer; stationära eller mobila. Grundfrågan är hur fordonsbatterier beter sig vid "end of life" (EoL), dvs. då de är uttjänta som fordonsbatterier. Frågeställningen kan belysas ur tekniska och ekonomiska, så väl som ur ett hållbarhetsperspektiv. Det råder en kunskapsbrist både hos fordonstillverkare och andra aktörer om vad som händer vid EoL. Endast när denna kunskap finns kan affärsmässigheten i andrahandsanvändning diskuteras. Oftast definieras EoL som när ca 80 % av den initiala kapaciteten kvarstår. Denna definition härrör från blybatterier och är inte generellt lämpad för Li- och NiMH-batterier, där kapacitetsgenomströmning vore en bättre parameter. NiMH-batterier kommer att användas i fordonet tills det är dags för återvinning, på grund av deras karaktäristik med ett snabbt kapacitetstapp vid EoL. Inget andrahandsvärde finns mer än skrotvärdet. För Li-jonbatterier är läget ett annat, då kapaciteten gradvis minskar fram till EoL, och det är främst dessa system som är av intresse för andrahandsanvändning.

Idag betalar, enligt Menahem Andemann, biltillverkarna en premie till celltillverkarna för att ta hand om kommande hantering av defekta/uttjänta celler. Det betyder högre batterikostnad. Det är stor oklarhet om värdet på dessa uttjänta batterier. De kan ha betydande värde, som då tillfaller celltillverkare.

Dock uppstår en rad olika frågeställningar om hur andrahandsanvändning kan göras i större skala och med batterisystem från flertalet fordonstillverkare, då alla batterier till el- och hybridfordon är starkt applikationsanpassade. Systemen varierar kraftigt med avseende på cellkemi, cellernas utformning och kapacitet, modulsammansättning, kylningsanordning, mm. Matrisen av olika kombinationer blir snabbt stor och dessutom med skillnader från tillverkare till tillverkare och från marknad till marknad. Redan idag skiljer sig alla använda startbatterier från varandra och det är sannolikt med ett liknande scenario för el- och hybridfordonsbatterier. Därför krävs tillförlitliga metoder för att sortera och klassificera system/moduler/celler.

Diagnostik och prediktion av status och kvarvarande livslängd är forskningsfrågor av idag där vår brist på kunskap begränsar möjligheten till andrahandsanvändning. Omfattande testmetoder behövs; både diagnosverktyg och för statusbedömning av system. Med största sannolikhet kommer diagnosverktyg utgå från den historik som finns lagrad i batterisystemets styrenhet, för att bland annat säkerställa en hög säkerhetsnivå. Batterisystemets historia i termer av t.ex. krock och elfel kan då behöva beaktas vid andrahandsapplikationer. Ett troligt scenario är att mer avancerad elektronik än idag krävs för att säkerställa säkerheten, vilket gör att cellerna/modulerna/systemen bör vara förhållandevis billiga för att kompensera.

Prislappen för uttjänta fordonsbatterier, och tillhörande garantier, kommer vara starkt relaterad till kvarvarande prestanda och livslängd, och vilken den tänkta tillämpningen är. Detta torde leda till att både säljare och köpare efterfrågar djup kunskap och diagnostik om batterierna. Många förväntar sig och förutspår en kraftig nedgång i prisutvecklingen för Li-jonbatterier under de

kommande tio åren. I det perspektivet kan det vara mer ekonomiskt (och säkerhetsmässigt) fördelaktigt att köpa nya friska celler än att använda uttjänta fordonsbatterier där man inte känner historiken. Återigen, det ekonomiska incitamentet att återvinna batterier är en mycket avgörande faktor för att kunna avgöra om återanvändning är ekonomiskt lönsamt.

”Re-manufacturing” och rekonditionering av batterisystem för att återanvändas i fordon, samma eller annat, är ett sätt att öka användandet och förlänga förstahandsanvändningen. Konsumenterna kommer troligen att efterfråga denna typ av batterisystem, men inte vilja betala flera hundratusen kronor för ett nytt batterisystem. Om inte fordonstillverkarna tillhandahåller möjligheten så kommer andra aktörer in, och med risker i termer av sänkt säkerhet. Det finns en oro för vad som kommer hända inom en tioårsperiod, när fler och fler el- och hybridfordon kommer att säljas på begagnatmarknaden, speciellt om icke fackmän, t.ex. tonåringar ”mekar” med bilarna.

Den tyska konsultfirman P3 presenterade deras syn på "Secondary Use of Electrified Vehicle Batteries" den 30 maj 2012. P3 uppskattar att antalet batterier till laddfordon och HEV kommer öka från ca 6,4 miljoner kWh 2012 till ca 19,5 miljoner kWh 2017. Värdet på 19,5 miljoner kWh är ca 15 miljarder USD (ca 140 miljarder SEK) enligt 3P. Det tar 7-10 år innan nysålda batterier till laddfordon och HEV kommer ut på "Secondary battery application" marknaden. Enligt P3 så finns följande trender som möjliggör en andrahandsmarknad för batterier.

- Återköpningsprogram från bilföretagen. Bilföretagen undersöker möjligheterna att köpa tillbaka batterierna från sina kunder. Bilföretagen vill sänka priset för köpare av nya laddfordon.
- Större produktionsvolym av batterier.
- Batterierna blir säkrare, tillförlitliga och har längre livslängd.
- Mer tillgänglig kapacitet i batterierna.

Alla batterier kommer inte vara tillgängliga på andrahandsmarknaden, utan det beror på:

- Dålig kvalitet. En del batterier kommer ha använts olämpligt.
- Ingen kompatibilitet. Icke standardiserade format kommer göra att batterier är svåra att återanvända.
- Operationella problem. Ineffektiv återinsamling, klassificering och återlämning, men också avsaknad av återköpningsprogram för batterier.

P3 tror att OEM:erna är mest lämpade för att få en andrahandsmarknad på plats. De vill få fler kunder till sina laddfordon. Om marknaden för batteriers andra liv fungerar kan priset för fordonen sjunka. Bilföretagen äger patent och de har ett återförsäljningsnätverk som kan användas. Batteriföretag har mest att förlora på en andrahandsmarknad. De vill sälja nya batterier till alla tillämpningar. De vill inte konkurrera med andrahandsbatterier.

Andrahandsmarknaden för batterier till laddfordon har U.S. Department of Energy's (DOE) och National Renewable Energy Laboratory (NREL), tillsammans med California Center for Sustainable Energy (CCSE), påbörjade en studie förra året. I en sammanfattade presentation påstås det att

under fördelaktiga omständigheter kan en andrahandsmarknad göra så att priset för batterier till ett nytt laddelfordon kan sjunka med 12 % .

Om ett batteri har förlorat ca 20 % av sin kapacitet mätt som kWh, så kommer inte värdet av batteriet vara ca 80 % av originalvärdet. Det beror på att livslängden under batteriets andra liv kommer vara osäkert.

4.6 Återvinning

Idag måste alla batterier som säljs i Sverige återvinnas enligt producentansvaret. Dock har olika batteriteknologier olika ekonomiska förutsättningar. Att återvinna blybatterier är idag lönsamt och insamlingen och återvinningen fungerar. Även för NiMH-batterier finns det ett ekonomiskt värde i att återvinna. När det gäller Li-jonbatterier är det svårare att se något ekonomiskt värde och det är bara de Li-jonbatterier som är baserade på kemier med Co och Ni som är av intresse för återvinning. Vid återvinning av NiMH- och Li-jonbatterier tappar man förädlingsvärdet för de aktiva materialen, vilket också bidrar till lägre ekonomiskt återvinningsvärde. Idag är det billigare att bryta Li än att återvinna och det krävs stor mängd Li-jonbatterier för att erhålla någon nämnvärd mängd återvunnen Li då varje cell innehåller mycket lite Li. Däremot är Al och Cu, som används som strömuppsamlare i Li-jonbatterier, av intresse att återvinna. Till vilken renhetsgrad man måste nå vid återvinning beror på tänkt applikation – vanligtvis används återvunna metaller från batterier i stålproduktion.

Vid insamling av uttjänta och skadade fordonsbatterier blir hanteringen på ett säkert sätt påtagligt då mycket höga och därmed farliga kortslutningsströmmar kan uppstå vid felhantering. Transport av krockskadade elfordon och tillhörande batterisystem är idag ett problem då man inte får flytta fordonen hur som helst. I många fall är dessa fordonsbatterier klassade som farligt avfall och kan inte transporteras utan särskilda tillstånd. Den som sitter på skadade fordonsbatterier sitter idag med 'Svarte Petter'. Utbildning, hanteringsföreskrifter och information för alla som hanterar fordonsbatterier är ett högt prioriterat, men idag eftersatt område. Projektet *Räddningskedjan* (finansieras av FFI) är ett första steg mot en djupare förståelse, och belyser förloppet från en krock till räddningsinsatser upp till en timme efter krocken.

4.7 Marknadsfaktorer

En viktig faktor för kostnadsutvecklingen är marknads- och konkurrenssituationen, samt hur stor den totala marknaden för fordonsbatterier kommer att utvecklas. Borträknat blybatterier har batteriproduktionen ökat med en faktor tre mellan 2000 och 2010. Ökningen härrör främst från Li-jonbatterier, vilket beror på alla nya mobilapplikationer vi ständigt går runt och bär på. Under samma tidsperiod har försäljningen av Li-jonbatterier ökat med 25 % per år och NiMH med 4 %, medan NiCd-försäljningen minskat med 2 %.

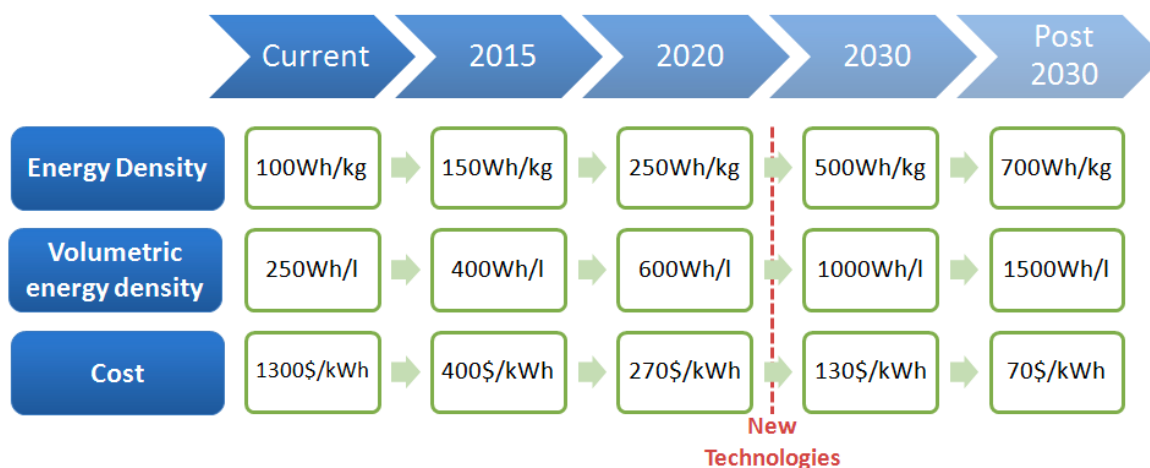
Marknadsandelen Li-jonbatterier för fordon är mycket liten: ca 5%, resterande volymen tillverkade celler går fortfarande till 4C-marknaden (Cordless tools, Cams, Cellphones, Computers). 4C-batterier är vanligtvis små och har inte så höga prestanda-, livslängds- och säkerhetskrav som fordonsbatterier. Små konsumentbatterier kostar under \$250/kWh, men detta är inte alls översättningsbart till fordonsbatterier pga. den tuffare kravbilden och ingenjörsutmaningen att tillverka större celler (både i kapacitet och i fysisk storlek). Och i vissa fall är det stora skillnader i den kemiska sammansättningen, pga. de olika kravbilderna.

Japan, som länge dominerat både Li-jon- och NiMH-marknaden, har tappat marknadsandelar till förmån för Kina och framförallt Korea. LG Chem och Samsung hade 2012 tillsammans över 40 % av marknaden för Li-jonbatterier i termer av kWh, och 35-40 % räknat i \$.

Enligt Siemens kostar det ca 20 M€ att bygga en batterifabrik, vilket gör att investeringarna är ett stort bidrag till höga cellkostnader. För att nå en cellkostnad under 250 €/kWh måste fabriksinvesteringen vara helt avbetald. Avicenne uppskattar investeringskostnaderna för batterisystem till 250 €/kWh vid en årlig produktion på 100 000 system.

Japanska och Amerikanska bedömningar

Japanska NEDO⁶ har sammanfattat trenden för utveckling av Li-jonceller för xEV (se Figur 4.1). Sammanfattningsvis kan noteras att förväntningarna på att nya teknologier och koncept når fordonsmarknaden innan 2030 är låga. Denna roadmap bygger på förutsättningarna att Li-jonteknologin utvecklas till sitt yttersta vad det gäller praktiskt användbar energitäthet. Detta nås genom utvecklingen av högvoltskatoder (ca 5 V). Dock finns det en rad betydande och fundamentala utmaningar att lösa innan dessa katoder når en kommersiell applikation. Till exempel är det att hitta en elektrolyt som är stabil vid dessa spänningsnivåer.

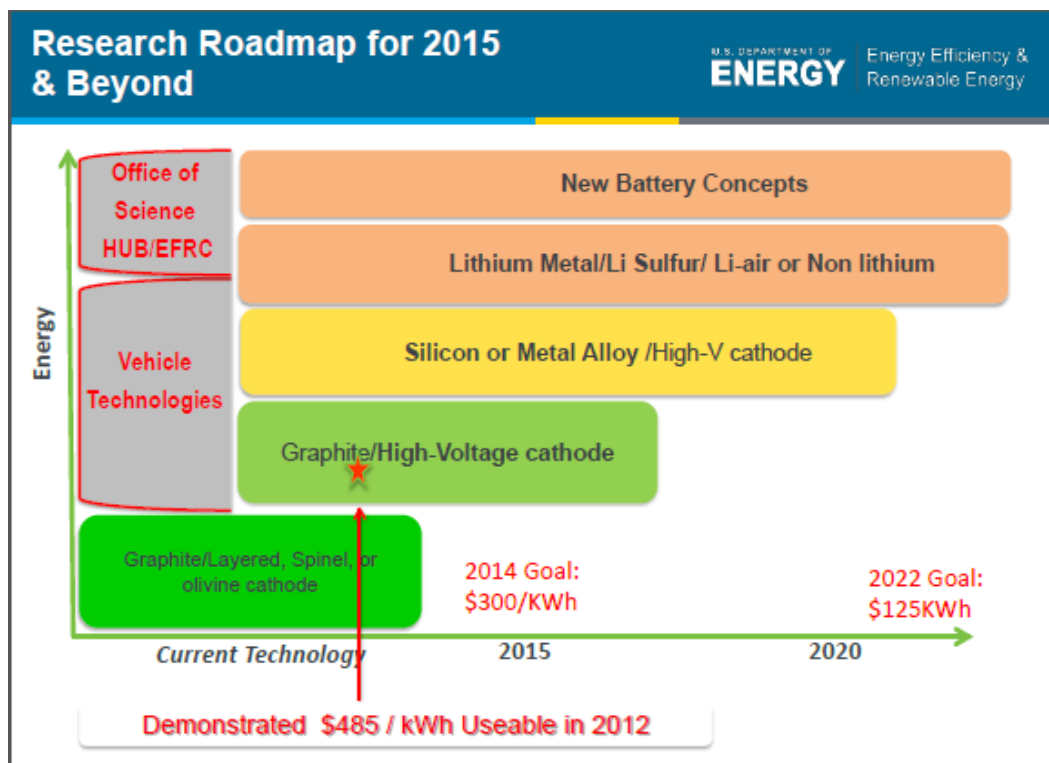


Figur 4.1: NEDO's Teknologi Roadmap fram till 2030

I USA presenterade nyligen (16/5-2013) Department of Energy (DOE) sin Roadmap för utveckling av batteriteknik för elfordon DOE satsar stora summor (88 MUSD 2012, 170 MUSD 2014) på

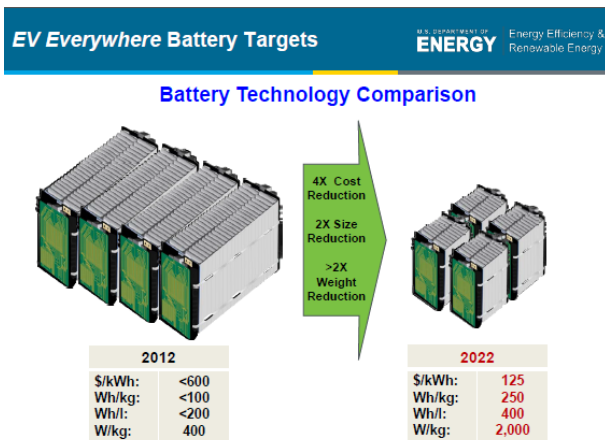
⁶ NEDO; New Energy Development Organization; www.nedo.jp; (2013-05-08)

batteriutveckling och finansierar omfattande R&D-program i USA. De använder en uppdelning mellan materialutveckling, celledesignutveckling och batterisystemutveckling, och menar att stora framsteg behövs inom alla tre områdena. I figuren nedan visas DOE's Roadmap avseende materialutveckling och dess påverkan på energiinnehåll och kostnad.



Figur 4.2 DOE's roadmap för utveckling av Li-jonbatterier

Sammanfattningsvis menar också DOE att inkrementell utveckling av dagens Li-jonteknologi kan leda till en prisnivå strax under 125 \$/kWh och en dubbling av energiinnehåll, summerat i bilden nedan.



Figur 4.3. Jämförelse batteripackning

4.8 Förädlingskedjan

Förädlingskedjan från råmaterial till färdigt batterisystem till fordon är omogen. Från råmaterial till producerad battericell finns det en tydlig aktörskedja med tillverkare av råvaror, halvfabrikat, produktionsutrustning och celler. Men efter cell och vidare till färdigt batterisystem är marknaden och aktörskedjan otydlig. I vissa fall är det biltillverkare som köper in celler och alla komponenter för att bygga batterisystemet själva, och i andra fall köper biltillverkaren in ett färdigt, "plug-and-play" batterisystem som passar direkt in i fordonet, inklusive BMS och ombordsystem som kylning. Detta påverkar kostnadsutvecklingen och marknaden negativt, med otydliga produkterbjudanden och ansvar.

Det finns också flera exempel på joint ventures mellan biltillverkare och battericellstillverkare. Ett exempel är AESC (Joint Venture mellan Nissan och NEC), där 40 % av världens BEV-batterier tillverkas och används i Nissan Leaf, Renault Fluence och i kommande modeller.

4.9 Biltillverkarnas strategier

Forskare vid Technische Universität Braunschweig har analyserat biltillverkarnas (OEM) strategier, utifrån patentportfölj och artiklar i det vanliga nyhetsflödet, vad det gäller att förädla batterisystemen och öka värdekedjan för fordonen. Det nämns inga tillverkarnamn, men det går att läsa mellan raderna vilka som åsyftas. De har utslutit kinesiska tillverkare och tillverkare som nyligen bytt ägare. OEM:erna delas in i fyra kategorier:

- **Full integrators:** har oftast Joint Venture med en celltillverkare och kontrollerar därmed hela kedjan från celltillverkning till packintegration, och kan även tänka sig att sälja system till andra fordonstillverkare. Vissa har även gett sig in i råvarumarknaden för att säkerställa framtida leveranser. Är mycket aktiva patentmässigt. I denna kategori torde Toyota och Nissan/Renault vara.

- **Waiting integrators:** jobbar med flera spår och till skillnad mot 'full integrators' har externa leverantörer en större roll i värdekedjan. Daimler räknas troligtvis in i denna kategori.
- **Packager:** köper celler från olika celltillverkare och på så sätt kan pressa priserna. De gör BMS själva och kan på så sätt vara mer flexibel för olika fordonsvarianter. I denna kategori befinner sig nog VW.
- **Purchaser:** köper hela system av underleverantör och har en försumbar roll när det kommer till patentportföljen. Anses som ett lågriskalternativ, men där marknadsandelar lätt kan gå förlorade.

Då det är batteriet, och användningen av batteriet, som utgör konkurrenskraften för en xEV gäller det att välja spår utifrån sina ambitionsnivåer. I en BEV utgör batteriet ca 50 % av 'added value'; cellerna står för 65 % och packintegrationen för 35 %. Detta ska jämföras med en konventionell drivlina som utgör ca 25 % av 'added value' (siffror enligt artikeln). Strategierna hur man ska navigera är en av nyckelfrågorna för OEM. Slutsatsen forskarna från Braunschweig drar är att det är 'Full integrators' som leder utveckling inom Electromobility, och 'Purchasers' spelar en obetydande roll och anses som en 'Follower'.

4. 10 Sammanställning kostnadsuppskattning Li-jonbatterier

Kostnadsuppskattningar för litium-jonbatterier har i litteraturen oftast angivits i form av \$/kWh oberoende vilken teknologi som avsetts. I några fall anger man om det är energi, effekt eller livslängdsfaktorerna som bedömts. I en studie från 2010 anger dock Gopalakrishnan et al (2011) en något modifierad modell för kostnadsutvecklingen. Resultatet ses nedan i figur 4.4.

Unsubsidised battery costs over time

Battery type	Specific Energy density in Wh/kg	Cost to OEM*
2012 lithium Mn Spinel	105 ± 5	€ 200 per battery + € 620 per kWh
2020 Li Mn Spinel (Battery 1)	125 ± 5	€ 180 per battery + € 310 per kWh
2020 Silicon lithium (Battery 2)	160 ± 5	€ 200 per battery + € 350 per kWh
2025 Silicon lithium (Battery 1)	190 ± 10	€ 180 per battery + € 185 per kWh
2030 Silicon Li-S (Battery 2)	300 ± 20	€ 200 per battery + € 200 per kWh

Cost of 20 kWh battery in 2012 will be € 200 + € 620 per kWh * 20 kWh or € 12,600.

These are manufacturer costs, no retail prices.

Figur 4.4 Batterikostnader enligt ICF

Den första faktorn torde vara det som härrör från produktionstekniken medan den andra är material/processkostnader.

Baserat på olika studier som genomförts under senare år kan en bild av förväntad kostnadsutveckling fås. I Tabell 4.1 nedan beskrivs prognos från ett antal analytiker, forskningsföretag och tillverkare hur man bedömer kostnadsutvecklingen för Li-jonbatterier fram till 2020. Tabellen 4.1 har vidare kompletterats med uppgifter ur olika artiklar och presentationer. (Referensmaterialets ursprung kan därför vara något oklart).

Tabell 4.1 Sammanställning av kostnadsprognoser för olika batterityper

Företag/Org	Prognosår	Batterityp	2010	2013	2015	2020	2025	2030
Deutsche Bank	2009	EV PHEV	650	400-650 900-1000	500-600	325 400-500		
Avcienne	2013	EV HEV				270-350 625		
Boston Consulting Group	2012	EV	990-1220	1200		360-440		
USABC	2011	EV		1100		200		
University of Delft, ICF	2011			809		435	244	273
LG Chem	2012	EV		1000		200		
Roland Berger	2012	EV		600		180-200		
Mc Kinsey	2012	EV		500-600		200	160	
Lux Research	2012	EV				600		
Pike Research	2012	EV		940		470		
Volkswagen	2012	EV		1000	650	350	280	
DOE/NRC	2012	EV		500	405	375-508		130
AAB	2013	EV PHEV HEV		500-700		330-380 450-550 850		
Argonne National Lab.	2012	EV PHEV				150-200 200-400		
NEDO	2010	EV PHEV HEV	1300		400	270	200	130
Electric Coalition	2009	EV	600		550	225		

5 Kostnadsutveckling för bränsleceller

PWC genomförde under 2007 en världsomspännande analys rörande den industriella utvecklingen av bränsleceller (PWC (2007)). Man påpekade då på den snabba tillväxten inom området där försäljningen ökat från \$353 miljoner 2005 till \$387 miljoner 2006, samtidigt som forskningen inom området ökat från \$796 miljoner till \$829 miljoner. Antalet sysselsatta inom bränslecellsutvecklingen hade samtidigt ökat med hela 22 % från 7074 till 8647 år 2006.

Marknaden enligt PWC dominerades av Proton Exchange Membrane (PEM) tekniken som stod för över 50 % av insatserna och av den totala marknaden svarade fordonsdrifter för närmare 20 %. Av den totala marknaden svarade USA för 44 %, Japan 24 % och Tyskland för 10 %, dvs $\frac{3}{4}$ av världsmarknaden.

I en stor europeisk studie genomförd 2010 av McKinsey & Co (2012) med ett trettiotal deltagande fordonstillverkare, energibolag, myndigheter och andra intressenter påtalas att för att nå utsläppsmålen fram till 2050 erfordras främst en elektrifiering av transportsektorn och att alla teknologier behövs. Man påpekar att bränslecellsteknologin är bäst lämpad för medelstora bilar med körsträckor över medlet och att denna sektor representerar närmare 50 % av alla bilar och står för 75 % av koldioxidutsläppen.

I en studie från UC Davies 2012 (Burke et al 2012) jämförs ekonomin för olika fordonstyper givet bensin och vätgaspris. I kostnadsjämförelsen som använde 2007 års baspris så kom HEV ut bäst med ett 'break even-pris' på 2,5-3 USD/gallon räknat på fem års återbetalning och en körsträcka på 12 000 miles per år samt en ränta på 4%. Ekonomin för elbilar med 100 miles elektrisk körsträcka visade att en BEV med batterikostnad på \$300-700/kWh ger break-even vid ett bensinpris mellan \$4-5/gallon.

För bränslecellsfordon med bränslecellskostnader mellan \$30-50/kWh och med 10 års livslängd så är dessa kostnadseffektiva som HEV och ICE för vätgaspriser⁷ mellan \$2,5 – 3 /kg H₂.

Under 2001 etablerades i Japan Fuel Cell Commercialization Conference of Japan⁸. Idag består detta konsortium av fler än 100 företag och 15 organisationer. Bland medlemmarna kan räknas Honda, Nissan och Toyota, Osaka Gas GM Asia Pacific, Cosmo Oil, Japan Energy Corporation, Mercedes Benz Japan m.fl.

FCCJ arbetar för att lämna förslag till test och demonstrationer, utveckling av vätgasinfrastruktur, identifiering av tekniska utvecklingsmöjligheter samt utvecklar olika former av Road Maps, förutom att arrangera regelbundna konferenser om bränsleceller m.m. FCCJ beskrev under 2008 ett kommersialiseringsscenario för bränslecellsfordon i fyra steg.

- Steg 1: - 2010: Ett teknologidemonstrationsprogram
- Steg 2: 2011-2015: Teknologi & marknadsdemonstration
- Steg 3: 2016- 2025⁹ Tidig kommersialisering
- Steg 4: 2025- : Full kommersialisering

⁷ Se kap 5.1 ang drivmedelskostnad för vätgas

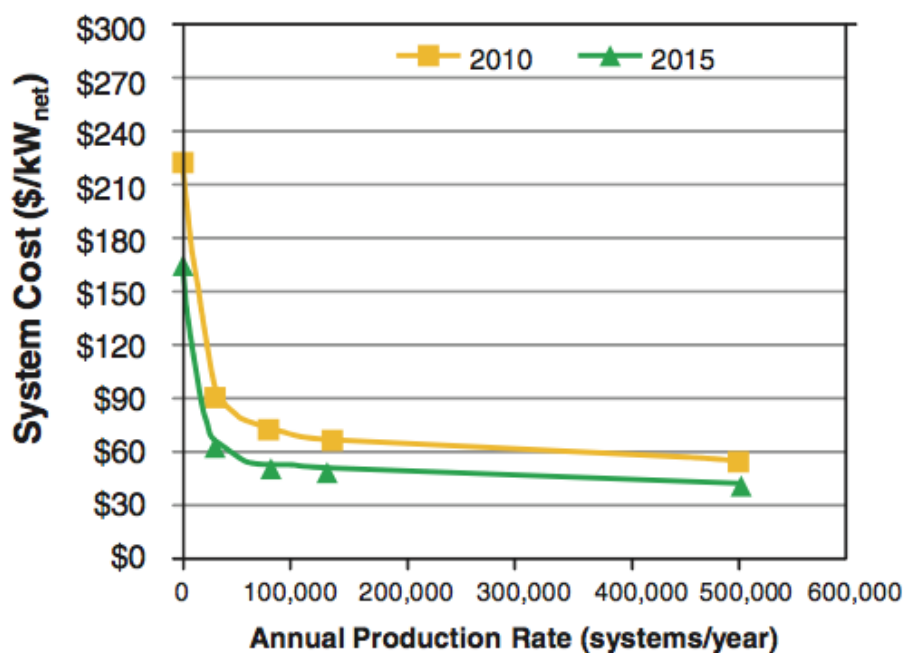
⁸ <http://fccj.jp>; (2013-05-02)

⁹ Artikel författaren har inte angivit exakt årtal, "2025 är rapportförfattarnas gissning."

Under steg 2 ser man en försiktig tillväxt som i början på steg 3 tar fart då framförallt utbyggnaden av vätgastankställen påbörjas. I början av 20xx ser man att massproduktionen av FCEV kommer igång samtidigt som utbyggnaden av tankstationer för vätgas också accelererar.

Sedan 2002 har kostnaden för bränsleceller enligt DOE reducerats med mer än 80 %. Från ca 275 \$/kW år 2002 till ca 47 \$/kW år 2012. Vissa "prognoser" tyder på ytterligare kostnadsänkningar ner till 30 \$/kW fram till 2017 är möjliga. Åtminstone har detta satts som ett utvecklingsmål för industri och forskarvärld.

Enligt NRC (2013), uppgår stacken till ca 50-60 % av bränslecellsystemkostnaden och är mycket volymberoende. Ett exempel visas i fig 5.1 nedan. NRC studien visar också att historiskt har bränsleceller uppskattas att kosta mer än dubbelt vad som nu prognosticeras för stora volymer. Projektioner för 2030 talar \$20-\$30 per kW medan man för ca 10 år sedan talade om \$80 per kW.



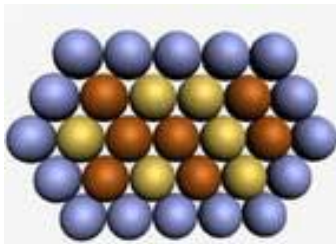
Figur 5.1 Kostnaden hos bränsleceller som funktion av produktionsvolym

Tekniska faktorer

En av svårigheterna med att använda PEM-celler effektivt i bilar är att temperaturen måste hållas omkring 80 °C. Blir det varmare torkar membranet, som skiljer väte och syre åt, och slutar fungera. Just nu pågår mycket forskning för att försöka höja temperaturen för PEM-celler med ungefär 40 °C. Man måste kyla bort värme, och det är svårt att göra vid 80 °C. Vid 120 °C kan man använda samma typ av kylsystem som finns i fordon i dag. Höjer man temperaturen kan man dessutom få reaktionerna i cellen att gå snabbare. Dock kan minusgrader skapa

bestående skador i membranet som orsakas av att membranet spricker då vattnet i membranet fryser.

I dagens bränsleceller används ofta nano-partiklar av platina som katalysator. Platinat påskyndar den kemiska reaktionen som omvandlar vätgas till elektricitet och klarar dessutom den sura miljön i bränslecellen. Haken är att platina är dyrt. Stora forskningsmedel har satsats genom åren för att finna alternativ. Till exempel bedriver forskare vid Chalmers aktiviteter inom området.



För att nämna ett internationellt genomslag har forskare vid Insitute of Bioengineering and Nanotechnology (IBN), i Singapore nyligen utvecklat ett billigare alternativ. Deras nya katalysator har en kärna av en guld- och kopparlegering som täcks av ett tunt lager platina. Enligt forskarna femfaldigas därmed den katalytiska förmågan: nano-kompositen sägs kunna producera en elektrisk ström på minst 0,57 ampere per milligram platina, att jämföra med 0,11 ampere per milligram platina i dagens teknik. Det nya katalysatormaterialet är dessutom mer stabilt.

5.1 Marknadsfaktorer

Sedan länge pågår omfattande forsknings och utvecklingsverksamhet inom bränslecellsområdet. Energy Efficiency & Renewable Energy Department/DOE i USA redovisade i mars 2013 framstegen inom bränslecellsforskningen i USA. Bland annat påpekas här insatser för att sänka kostnaderna och öka livslängden/tåligheten hos bränslecellerna. DOE har även studerat de senaste årens kommersialisering av forskningsinsatserna. Från 2007 har snabbt ett antal nya teknologier kommit till industriell användning.

Kostnaderna för bränslecellsstackar har sjunkit drastiskt under senaste åren. Nissan minskade exempelvis kostnaderna för sina bränslecellsstackar mellan 2005 och 2011 med över 80 % medan man samtidigt ökade effekttätheten med 250 %. Detta kunde ske genom minskad mängd platina. Kostnadsreduktionerna som hittills åstadkommit är centrerade kring ett antal nyckelområden inklusive hållbara membranteknologier med låga platinainnehåll.

Drivmedelskostnad för vätgas

Idag finns inte kommersiellt drivna vätgastanksstationer i någon större omfattning, så det är svårt att säga om vad drivmedelskostnaden för en bränslecellsbil kommer att bli. Det beror framförallt på hur vätgasen produceras, distribueras och lagras. Man kan dock säga att i snitt är vätgas ca 2,5 ggr så effektivt som bensin. Toyotas bränslecellfordon FCHV lär gå 68 miles på ett kg vätgas¹⁰, detta lär då svara mot en bränslekostnad om 0,13 kr/km eller 1,30 SEK/mil om vi antar ett vätgaspris på 14 SEK/kg.

¹⁰ www.h2carb.com/p?=461 (24-06-2013)

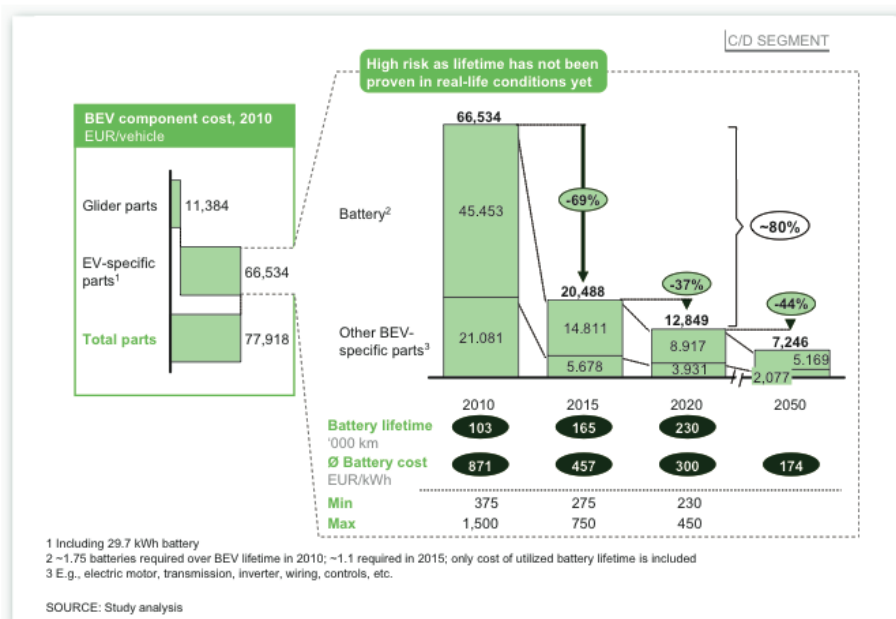
6 Kostnadsmodeller och bedömning av osäkerheter

Kostnader redovisas i detta kapitel för tre generiska batterityper och en generisk bränslecell. Kostnaderna avser vad som gäller för packnivå och inte enskilda battericeller. I huvudsak avses här fordonsbatterier av prismatisk natur. Det bör dock påpekas att för energioptimerade batterier anges kostnaden i regel som \$/kWh, medan kostnader för effektoptimerade batterier och bränsleceller oftast anges i \$/kW.

6.1 Kostnad för energioptimerade batterier

I det genomgångna underlaget finns olika ansatser och bedömningar kring kostnadsutvecklingen av Li-jonbatterier. McKinsey (2012) har redovisat typkostnaden för en BEV till 77.918 € för 2010. Av denna kostnad hänförs 66.534 € från EV-specifika kostnader [se fig nedan].

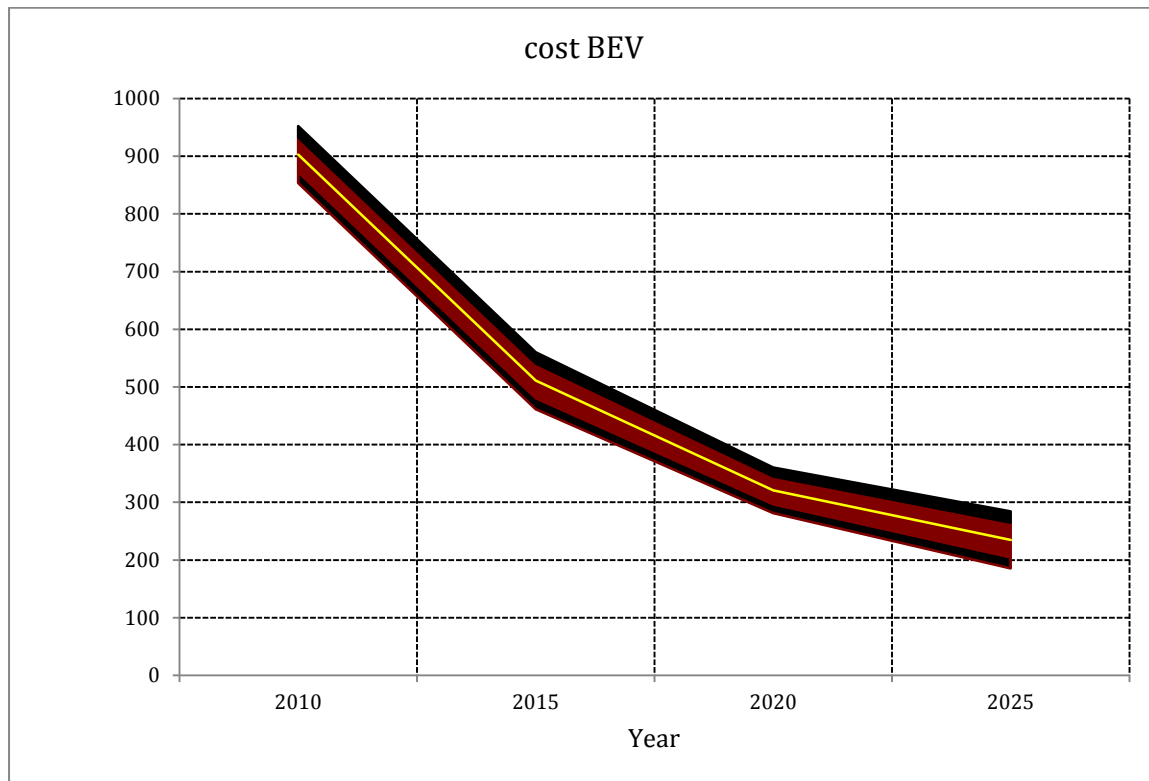
Av de EV-specifika kostnaderna utgör batterisystemet 45.453 €, som antas ha en kapacitet på 29,7 kWh. Det gör en kostnad på 1530 €/kWh. Fram till 2015 bedömer McKinsey att batterikostnaden för en BEV sjunker till 14.811 € (>65% kostnadsreduktion), och fram till 2020 till 8.197 € och 2050 uppskattas batterikostnaden till 5.169 €. Även batteriets livslängd förväntas öka från 103 000 km år 2010 till 230 000 km år 2020. McKinsey menar att år 2010 erfordrades 1,75 batterier för en BEV's livscykel medan det endast åtgår 1,1 batterier redan år 2015. Fram till 2020 kommer således batterikostnaden att sjunka med närmare 80 %. Även osäkerheterna i batterikostnader redovisades. För åren 2010, 2015 och 2020 anges respektive maxvärden till: 375;1500, 275;750 respektive 230;450 €/kWh. För år 2050 anges en medelkostnad av 174 €/kWh dock utan angivande av vad som ingår i osäkerheterna.



Figur 6.1 Kostnadsutveckling enligt McKinseys studie 2010.

Sammantaget den information som redovisades i Tabell 4.1 i kap 4 och antagande att osäkerheterna är jämt fördelade, fås en aggregerad bild av vad som idag är tillgänglig öppen information från olika professionella analytiker, utredare och företag.

En uppskattning av medelvärden och standardavvikelser, baserade på data ur Tabell .1 ger en kostnadsutveckling enligt figur 6.2 nedan. Vad som kan observeras är dock att spridningen i de olika prognoser som redovisas är anmärkningsvärd hög för år 2020.

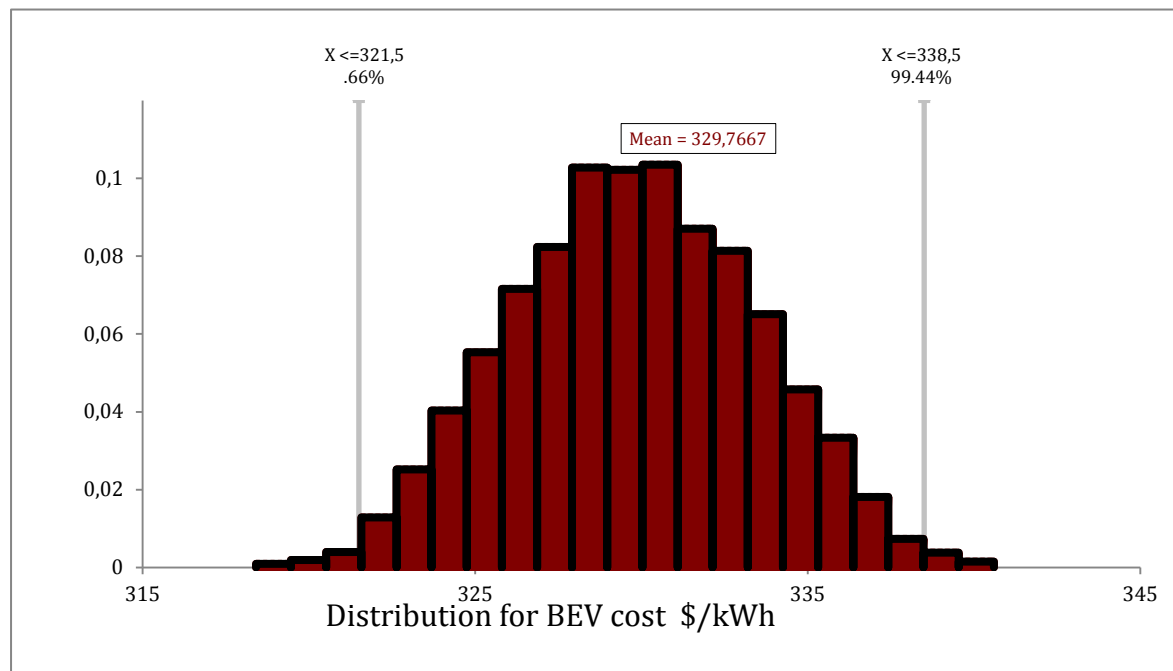


Figur 6.2 Prognos av kostnadsutveckling baserad på information från Tabell 6.1

6.1.1 Osäkerheter i bedömningar

Osäkerheten i bedömningarna kan betraktas på olika sätt. Dels som faktiska osäkerheter hos ingående material, tekniker, processer och volymer. Till detta skall läggas osäkerheter också tidsmässigt. En annan form av osäkerhet är att betrakta de olika prognoserna rent statistiskt och anta att de på något sätt är oberoende och okorrelerade.

Från uppgifter som inhämtats och visas i Tabell 4.1. kan ett prognosmedelvärde studeras. Givet att ingående osäkerheter (där dessa angivits) är Rektangulärfördelade (Uniformly distributed) kan exempelvis ett mått på hur osäkerheten är i utsagan att energioptimerade BEV batterier år 2020 kostar \$329 /kWh. Givet de ingående värdena är sannolikheten då 99% att kostnaden ligger mellan \$322 och \$339 per kWh.



Figur 6.3 Kostnadsfördelning baserat på 15 olika prognosmodeller ur Tabell 4.1

En viktig fråga är hur olika faktorer inverkar på batterikostnaden. Vilka faktorer har störst inverkan på kostnadsutvecklingen?

Man kan till exempel konstatera från McKinsey-studien (2012) att spridningen år 2010 är 150 €/kWh, år 2015 ca 80 €/kWh och 2020 närmare 50 €/kWh och dessutom inte likformig. Att osäkerheten minskar framöver är dock något förbryllande. En plausibel förklaring är dock att initialvärdena (dagsläget) är relativt okända medan man gör prognoser för det som vore önskvärt. Bland de faktorer som kan ha störst inverkan på kostnadsutvecklingen kan nämnas:

- Försäljningsvolym
- Materialkostnader (råmaterial inkl. transport)
- Produktionskostnader inkl. utvecklings och kapitalkostnader
- Vinstmarginal

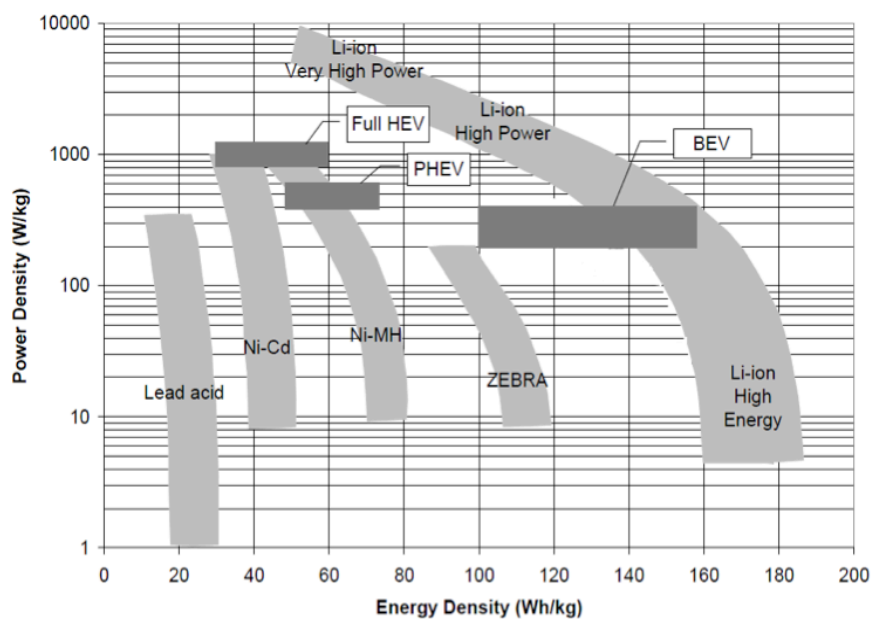
Försäljningsvolymerna har definitivt den största inverkan på kostnaderna, tätt följt av materialkostnaderna. Variationerna idag kommer snarast från prisdumpning eller överkapacitet i produktionen. Vid ökande volymer kan dessa få motsatt verkan, dvs. priser ökar. Utvecklings- och kapitalkostnader skrivs i regel av på 5 år så troliga scenarier är att prissänkningar kommer att ske i femårsstycken när investeringar har återbetalats. Detta kan mycket väl ske synkront med tekniska framsteg i framförallt packningstäthet.

Det bör också påpekas att standardiserade batterier och standardiserade tester kan få stort genomslag på kostnadsutvecklingen.

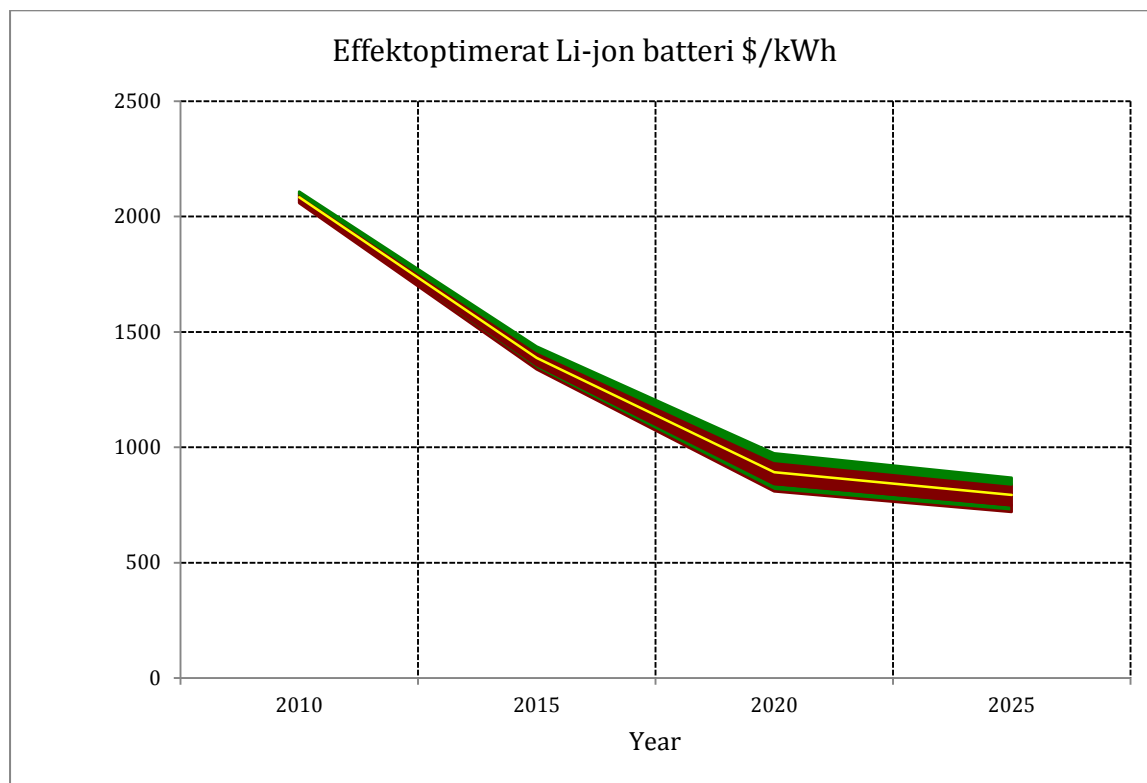
6.2 Kostnad för effektoptimerade batterier

Det är förhållandet effekt/energi som är avgörande för priset. Enligt tyska VDA uppskattar man att kostnaderna för effekt är 20-25 \$/kW år 2020 vid en produktion av 3 miljoner celler per år, och för energi 200 \$/kWh år 2020 vid en produktion av 18 GWh per år.

Kostnader för effektoptimerade batterier skiljer sig från energioptimerade i det hänseendet att dessa batterier premierar höga effektnivåer snarare än stora energinivåer och cellkonstruktionen skiljer sig från energioptimerade batterier. Vissa rapporter anger exempelvis att ett effektoptimerat batteri är ca 10-75% dyrare än ett energioptimerat batteri räknat enbart på jämfört av energiinnehåll.



Figur 6.3. Energi vs effekt för olika batterikemier



Figur 6.4 Prognos av kostnadsutveckling PHEV/HEV batterier baserad på information från Tabell 4.1

6.2.1 Osäkerheter i bedömningar

När det gäller effektoptimerade batterier är det statistiska underlaget mycket mer begränsat, än vad som är fallet med energioptimerade batterier. Spridningen är mindre vilket kan innebära att alla referenser möjligen relaterar till samma källa?

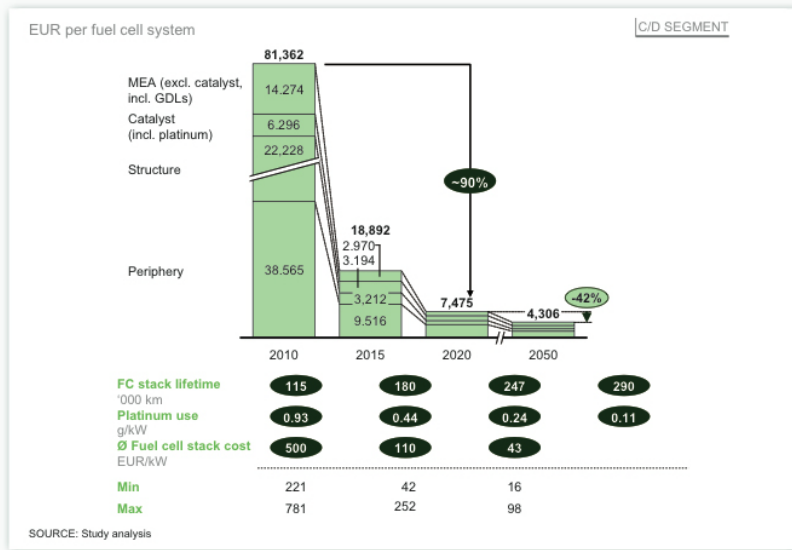
En grov ansats vore dock att anta ungefär samma spridning som för energioptimerade batterier med ett ytterligare procentuellt påslag för systemfunktionerna och kravet på anslutningar för högre effekter, termisk kontroll etc. I figur 6.4 har därför min/max gränser justerats upp/ned med en faktor om 30 %.

6.3 Kostnad för bränsleceller

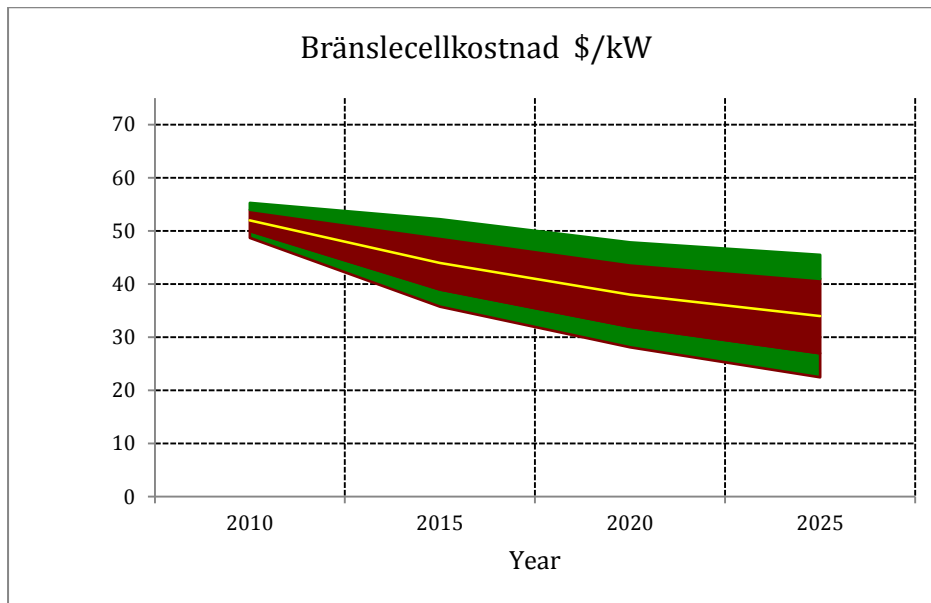
Uppgifter om kostnader för bränsleceller är relativt begränsade i den öppna litteraturen. Kinsey (2012) har dock angivit en kostnadsprognos som kan ses i nedanstående figur 6.5. I denna studie har man ansatt en kostnadsänkning från 500 €/kW till 43 €/kW år 2020 för volymproduktion

Jämförs denna kostnadsprognos med NRC's prognos (2013) kan en modell för kostnadsutvecklingen tas fram. Nedanstående figur visar att en trolig kostnad för bränsleceller då volymer överstiger 100 000/år.

By 2020, the cost of a fuel cell system falls by 90%, BEV components by 80%



Figur 6.5 Kostnadsprognos för bränsleceller enligt McKinsey



Figur 6.6 Prognos av kostnadsutveckling Bränsleceller baserad på information från Kapitel 5

6.4.1 Osäkerhet i bedömningar

Kostnadsbedömningar rörande bränsleceller är på samma sätt som för effektoptimerade Litium-jonbatterier baserade på endast några få utsagor. Min/Max kostnader i exempelvis McKinseys studie från 2012 varierar avsevärt mellan 781-221 år 2010 och mellan 16 och 98 för 2020. Osäkerheterna får alltså bedömas som mycket höga.

7 Slutsatser

Följande slutsatser dras avseende den framtida kostnadsutvecklingen av Li-jonbatterier och bränsleceller för fordon:

Utvecklingen av elfordon inom den kommande femårsperioden kommer dock att befinna sig i ett inledande skede där stora ekonomiska incitament kommer att krävas för att kunderna skall våga byta till nya drivlinor. BEV och FCEV kommer att inom den kommande tioårsperioden fortfarande att vara en mycket begränsad del av den totala fordonsproduktionen (vilken uppgår till ca 100 miljoner fordon/år) medan HEV, PHEV och EREV kan växa snabbare. Fordonsbatterier torde dock fram till 2025 inte utgöra mer än ca 5 % av antalet Li-jonbatterier som produceras.

- För att nå en kostnad på 325 \$/kWh för fordonsanpassade celler måste materialkostnaderna utgöra minst 80 % av den totala produktionskostnaden. Detta mål kan troligen nås först vid en årlig produktion av minst 10 miljoner celler.
 - Givetvis gäller det att finna högkvalitativa och billiga produktionsmetoder för de ingående materialen. Materialval kommer att bli avgörande för att sänka kostnaderna.

Cellkostnaden är även starkt kopplad till antalet producerade kWh, och en kostnadsminskning på 25% kan nås genom en produktionsökning från 100 MWh/år till 1 GWh/år.

- Små tillverkare kommer att ha svårt att hävda sig i avseende på priset. Dock är det kvaliteten på de producerade cellerna som är ytterst avgörande – 'low-cost cells vs. high-quality cells of low cost'.
- En av de mest kostnadsdrivande aspekterna, i negativ bemärkelse, är att fordonstillverkarna har mycket olika specifikationer. Standardisering av celler är ett måste för att kostnaderna ska sänkas, både vad det gäller format och kapacitet (Ah), och torde resultera in ca 5-10 % lägre systemkostnader.

Enligt Siemens kostar det ca 20 M€ att bygga en batterifabrik, vilket gör att investeringarna är ett stort bidrag till höga cellkostnader. För att nå en cellkostnad under 325 \$/kWh måste fabriksinvesteringen vara helt avbetalad. Investeringskostnaderna för batterisystem uppskattas till 325 \$/kWh vid en årlig produktion på 100 000 system.

Idag fokuseras FoU-resurser till att förbättra cellers energitäthet genom nya material. Med en ökad energitäthet kan antalet celler i ett batterisystem minskas, räckvidden förlängas, eller öka livslängden. Alla dessa gör att den totala batterikostnaden minskar.

Utvecklingen av bränsleceller har tagit ny fart från 2013. Systemen har blivit alltmer förenklade och platinainnehållet minskar drastiskt. Kostnader på ca 280 \$/kW år 2010 är nu nere i drygt \$50/kW och spås komma i närheten av \$20-\$30 /kW runt 2025.

8 Referenser

ABB and partners to evaluate the reuse of the Nissan LEAF battery for commercial purposes. Pressrelase. 18 januari 2012.

Amirault Justine et al (2012), The Electric Vehicle Battery Landscape: Opportunities and Challenges; Center for Entrepreneurship & Technology (CET) Technical Brief Number: 2009.9.v.1.1 Revision Date: December 21, 2009

Automakers Hope to Make Money on Used EV Batteries. GM and Nissan tout systems to reuse the expensive battery packs. Technology Review

Beer, S.; Gómez, T.; Dallinger, D.; Momber, I.; Marnay, C.; Stadler, M.; Lai, J. An economic analysis of used electric vehicle batteries integrated into commercial building microgrids; Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research: October, 2011.

Boston Consulting Group, Batteries for Electric Cars, 2010.

Berger Roland; Lithium-ion batteries- the bubble bursts, Stuttgart October 2012

Burke, Andrew, Zhao Hengbing, UC Davies, May 2012. Energy Saving and Cost projections for advanced Hybrid, Battery electric and Fuel Cell vehicles 2015-2030;

Chaitanya Narula, Rocio Martinez, Omer Onar, Michael Starke, George Andrews ;Final Report Economic Analysis of Deploying Used Batteries in Power Systems; in Energy (2011)

Deutsche Bank, The End of the Oil Age – 2011 and Beyond: a reality Check, 2010.

DOE; Fuel cells technologies Office/DOE: <http://hydrogenandfuelcells.energy.gov> (2 maj 2013)

FCCJ; <http://www.fccj.jp> (2013-05-02)

Gopalakrishnan Duleep et. al. Assessment of electric vehicle and battery technology, ICF, Delft, April 2011

Huth C, Wittek K and Spengler T.S., Int. Journal of. Automotive Technology and Management, 13 (2013) 75-92.

James, B.D., J.A. Kalinoski, and K.N. Baum. 2010. Mass Production Cost Estimation for Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Automotive Applications: 2010 Update. Arlington, Va.: Directed Technologies, Inc. Available at http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/dti_80kwW_fc_system_cost_analysis_report_2010.pdf.

Neubauer Jeremy, Ahmad Pesaran. 2010. NREL PHEV/EV Li-Ion Battery Second-Use Project..

Neubauer Jeremy, Ahmad Pesaran; presented at The Battery Show, Detroit, MI; October 25-27, 2011, Three Angles on PEV Battery Second Use Presentation Source:

Neubauer Jeremy, Ahmad Pesaran; presented at Electrical Energy Storage and Technologies (EESAT) Conference, San Diego, CA; October 16-19, 2011., NREL/CCSE PEV Battery Second Use

Project Presentation Source:

Neubauer Jeremy, Pesaran, A., Williams, B., Ferry, M. et al., "A Techno-Economic Analysis of PEV Battery Second Use: Repurposed-Battery Selling Price and Commercial and Industrial End-User Value," SAE Technical Paper 2012-01-0349, 2012, doi:10.4271/2012-01-0349.

Neubauer Jeremy, Ahmad Pesaran; Journal of Power Sources. Vol. 196(23), 1 December 2011; pp. 10351-10358; NREL Report No. JA-5400-51360. doi:10.1016/j.jpowsour.2011.06.053. The Ability of Battery Second Use Strategies to Impact Plug-In Electric Vehicle Prices and Serve Utility Energy Storage Applications. Paper. Source:

McKinsey & Co., 2012; A portfolio of power trains for Europe, - a fact based analysis.

NRC; National Research Council, US, ISBN-13: 978-0-309-26852-3, Mars 2013 "Transition to ALTERNATIVE VEHICLES AND FUELS", Committee on Transitions to Alternative Vehicles and Fuels, Board on Energy and Environmental Systems, Division on Engineering and Physical Sciences,

Nyman Joakim, Viktoriainstitutet, 2013-03-16; Bränsleceller – En sammanfattande översikt från ett elektromobilitetsperspektiv;

NREL Team Investigates Secondary Uses for Electric Drive Vehicle Batteries. 5 april 2011.

ORNL 2011; Final Report Economic Analysis of Deploying Used Batteries in Power Systems. ORNL,

Shokrzadeh, S. and Bibeau, E., "Repurposing Batteries of Plug-In Electric Vehicles to Support Renewable Energy Penetration in the Electric Grid," SAE Technical Paper 2012-01-0348, 2012, doi:10.4271/2012-01-0348.

PWC, 2007; World Wide Fuel Cell Industry Survey,

Williams, B. D.; Lipman, T. E. Analysis of the Combined Vehicle- and Post-Vehicle-Use Value of Lithium-Ion Plug-In-Vehicle Propulsion Batteries; report number TBD. California Energy Commission: Sacramento CA, 2011.

Wipke K et al, National Fuel Cell Electric Vehicle Learning Demonstration Final Report; NREL/TP-5600-54860, July 2012

3P "Secondary Use of Electrified Vehicle Batteries". Webinar 30 maj 2012. Via [automotiveworld.com](http://www.automotiveworld.com).