

KOSTNADSFUNKTION FÖR TRAKTIONÄRA BRÄNSLECELLSSYSTEM

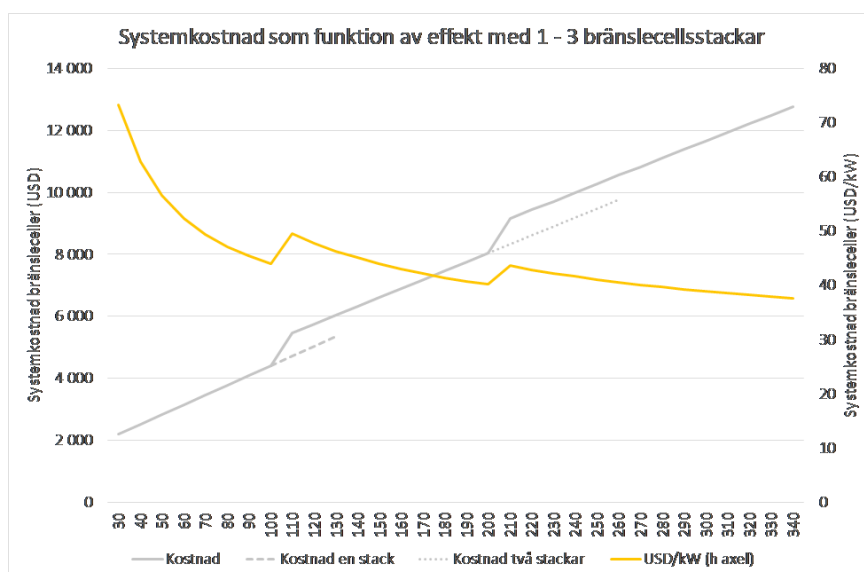
RAPPORT 2018:555



TEKNIKBEVAKNING
BRÄNSLECELLER



Swedish
Electromobility
Centre



Kostnadsfunktion för traktionära bränslecellssystem

HANS POHL

ISBN 978-91-7673-555-8 | © Energiforsk december 2018

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

I syfte att koordinera teknikbevakningen, men också för att sammanställa, analysera och sprida information om utvecklingen inom bränslecellsområdet finansierar Energimyndigheten projektet **Teknikbevakning av bränsleceller**. Projektet och dess resultat vänder till svenska intressenter, främst fordonsindustrin, och genomförs under 2016 – 2019 som ett temaområde inom kompetenscentret Swedish Electromobility Centre med Energiforsk som koordinator och projektledare.

Denna rapport, som har tagits fram inom teknikbevakningsprojektet, beskriver och analyserar hur kostnaden för bränsleceller för fordon varierar med krav på effekt och livslängd. Projektet har genomförts av Hans Pohl, RISE Viktoria.

Styrgruppen för projektet har bestått av följande ledamöter: Pontus Svens/Annika Ahlberg-Tidblad Scania, Johan Svenningstorp/Staffan Lundgren AB Volvo, Stefan Bohatsch Volvo Cars, Jörgen Westlinder, Sandvik Materials Technology, Andreas Bodén Powercell, Bengt Ridell Sweco Energuide, Göran Lindbergh Swedish Electromobility Centre/KTH, Peter Smeds/Magnus Lindgren Trafikverket, Elna Holmberg Swedish Electromobility Centre och Bertil Wahlund Energiforsk. Energiforsk framför ett stort tack till styrgruppen för värdefulla insatser.

Samtliga rapporter från projektet kommer att publiceras och fritt kunna laddas ner från Energiforsks webbplats under Teknikbevakning bränsleceller på www.energiforsk.se och på Swedish Electromobility Centres webbplats www.emobilitycentre.se.

Stockholm november 2018

Bertil Wahlund Energiforsk AB

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.



**Swedish
Electromobility
Centre**

Swedish Electromobility Centre är ett nationellt kompetenscentrum för forskning och utveckling av el- och hybridfordon och laddinfrastruktur. Vi enar Sveriges kompetens och utgör en bas för samverkan mellan akademi, industri och samhälle.

Sammanfattning

Syftet med denna studie är att analysera hur kostnaden för bränslecellssystem varierar med kraven på effekt och livslängd. Analysen omfattar också tillhörande energilagring med vätgastankar och batterier. Studien fokuserar på fem aspekter som har stor påverkan på kostnaden, nämligen uteffekt, livslängd, energilagrets storlek och typ, driftsförhållande och tillverkningsvolym.

Ofta baseras kostnaden för bränslecellssystem endast på uteffekten. Denna förenkling kan fungera inom begränsade effektintervall. I nuläget finns det inte så många olika typer av bränslecellssystem på marknaden och de som finns är oftast konstruerade för att med små anpassningar spänna över ett ganska stort effektintervall.

Livslängden påverkar kostnaden och studien indikerar att merkostnaden för livslängd anpassad för tunga fordon är cirka 30 – 50% jämfört med system för personbilar. Tankar för trycksatt vätgas ger en väsentligt lägre kostnad per lagrad kilowattimme jämfört med batterier som energilagring. De förstnämnda har emellertid en delvis annorlunda funktion. Driftsförhållandet i ett fordon är nästan alltid krävande. Går det exempelvis att undvika hög effektbelastning av kalla bränslecellssystem har det stor betydelse för livslängden. Batterier och bränsleceller i kombination kan förlänga livslängden för båda. Slutligen så finns det etablerade metoder för att bedöma tillverkningsvolymens påverkan på kostnaden. En viktig förändring under senare år är att antalet tänkbara tillämpningar inom tunga fordon har ökat, vilket medför högre potentiella volymer, vilket i sin tur bidrar till att den bedömda kostnaden för bränslecellssystem för tunga fordon har reducerats ordentligt.

Kostnadsanalysen av lätta fordon indikerar att det är små skillnader mellan personbilar med relativt stora batterier och litet bränslecellssystem och det omvända, även då drivmedelskostnaderna beaktas. Personbilar med endast batterier medför klart högre kostnader över livstiden. För tunga fordon som kör mer per år och använder mer drivmedel blir drivmedelskostnaden mer betydelsefull, vilket premierar fordon som till stor del går på el från elnätet

Summary

The purpose of this study is to analyse how the cost of the fuel cell system varies depending on power and durability requirements. The analysis also covers energy storages with hydrogen tanks and batteries. It focuses on five aspects having important implications on the cost; net power, service life, type of and capacity of energy storages, operating conditions and manufacturing volumes.

Often the cost of the fuel cell system is only based on the net power requirement. This simplification may work within smaller power intervals. Presently, there are not so many different fuel cell systems on the market and the existing ones are often designed to cover a relatively large power interval with minor adaptations.

The service life influences the cost and the study indicates that the additional cost for a service life adapted to heavy vehicles is approximately 30 – 50%, compared to a system for cars. Cylinders for pressurized hydrogen give substantially lower costs per kilowatt-hour stored than batteries. However, the former has a partly different function. Operating conditions in road vehicles are always demanding but if it is possible to avoid high electric burdens on a cool fuel cell system, the service life improves substantially. Batteries and fuel cells in combination can extend the service life for both. Finally, there are established methods to assess how the manufacturing volume influences the cost. One important recent change is that the number of possible heavy vehicle applications has increased significantly, which contributes to lower cost estimations for fuel cell systems for heavy vehicles.

The cost analysis of light and heavy vehicles indicates that there are small differences between cars with relatively large batteries and small fuel cells and the inverse, even when the fuel costs are considered. Cars with only batteries involve clearly higher costs. The cost for heavy vehicles is much more influenced by the fuel costs, as such vehicles typically use much more fuel over their service life. This makes the plug-in versions more interesting.

Innehåll

1	Inledning	7
1.1	Bakgrund	7
1.2	Syfte och utmaningar	7
1.3	Metod	9
2	Konkreta exempel	10
2.1	Stacktillverkare	10
2.1.1	Ballard	10
2.1.2	PowerCell	10
2.2	Lätta fordon	10
2.3	Bussar	11
2.4	Lastbilar	11
3	Kostnadskalkyler och -mål	13
3.1	Bränslecellssystemet	13
3.2	Vätgastankar	14
4	Vad påverkar kostnaden?	15
4.1	Effekt	15
4.2	Livslängd	16
4.3	Energilagrets storlek och typ	17
4.4	Driftsförhållande	17
4.5	Tillverkningsvolym	17
5	Kostnadsfunktion för traktionära bränslecellssystem	20
5.1	Kostnad som funktion av effekt	20
5.2	Kostnad som funktion av livslängd	21
6	Kombinationer av bränsleceller och batterier	23
6.1	Några antaganden	23
6.2	Bränsleceller och batterier – lätta fordon	25
6.3	Bränsleceller och batterier - tunga fordon	27
7	Avslutande diskussion	33
7.1	Kostnadsfunktionens betydelse	33
7.2	Kombinationer batterier och bränsleceller	33

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

Bränsleceller i fordon utgör ett intressant alternativ för att nå ett miljöanpassat transportsystem. Fordon med bränsleceller som tankar vätgas har miljöegenskaper som andra eldrivna bilar och vätgasen kan framställas på en mängd olika hållbara eller icke hållbara sätt.

En viktig skillnad mot batterifordon är att vätgas kan tankas ungefär lika snabbt som konventionella drivmedel, vilket öppnar upp för ett fordon som inte kräver några anpassningar för användaren.

Bränslecellsfordon och kanske i än högre grad tillhörande infrastruktur för vätgasförsörjningen är dock inte tillgänglig i nämnvärd utsträckning mer än i vissa områden, exempelvis Tyskland, Kalifornien och av Japan. Även i dessa områden är infrastrukturen långt ifrån heltäckande ännu.

Teknikbevakning av bränslecellsområdet har sedan 2014 placerats hos SHC, numera Swedish Electromobility Centre, och finansieras i huvudsak av Energimyndigheten. Detta har gjort främst för att få en närmare koppling mellan forskningen i Sverige och fordonsindustrin. Ett långsiktigt syfte är att bidra till kompetensförsörjning för industrin i Sverige.

1.2 SYFTE OCH UTMANINGAR

Syftet med projektet är att utveckla en kostnadsfunktion för bränslecellssystem för traktionära tillämpningar. Mer utvecklade kostnadsfunktioner än det som normalt används idag, dvs. en kostnad per effektenhet, bidrar till bättre bedömningar av förutsättningarna för bränsleceller i fordon.

Den kostnadsfunktion som utvecklas ger indikationer på hur kostnaden varierar i olika dimensioner, främst effekt och livslängdskrav. För att öka användbarheten inkluderas även energidimensionen.

Om inget annat anges, är det biltillverkarens kostnader för bränslecellssystemet som anges. Till skillnad från batterisystem, som nästan undantagslöst köps från externa leverantörer, gör flera biltillverkare bränslecellssystemen in house. Därmed minskar antalet pålägg. I litteraturen görs det ibland skillnad mellan tillverkare av personbilar, som gör sina egna bränslecellssystem, och tillverkare av bus-sar, vilka köper från externa leverantörer. Det finns inte mycket litteratur om tillverkare av lastbilar. Denna studie bygger på att bränslecellssystemen görs in house och att tillverkningsvolymerna är stora (500 000 system per år). Ungefärlig tidshorisont är 2025.

Kostnadsfunktioner finns redan i litteraturen, se exempelvis Figur 1.

$C_{\text{system}} = \text{Total System Cost} = C_{\text{stack}} + C_{\text{thermal}} + C_{\text{water}} + C_{\text{air}} + C_{\text{BOP}}$	
$C_{\text{stack}} = \text{Total fuel cell stack cost}$ $250V C_{\text{stack}} = 3.67879E-05[(3.8515E-08 \times A^2 + 0.0371 \times A - 1076.7099) \times L \times PC] + (0.0059818 \times A) + 331.4942$ $300V C_{\text{stack}} = 3.67879E-05[(4.2201E-08 \times A^2 + 0.0349 \times A - 1177.6064) \times L \times PC] + (0.0062337 \times A) + 367.7989$ Where: A = Total active area of the stack (cm ²) V = Stack Voltage L = Pt Loading (mg/cm ²) PC = Platinum cost (\$/troy ounce)	
$C_{\text{water}} = \text{Water Management System cost}$ $= (2.4424E-25 \times A^4 - 5.6171E-20 \times A^3 + 5.1805E-15 \times A^2 - 2.4383E-10 \times A + 6.1367E-06 \times A - 0.07676 \times A - 399.46) + (51.684 \times (Q / \Delta T) / 0.0920657) + 6.26$ Where: A = Humidifier Membrane Area (cm ²) Q = Heat Duty for Precooler (kW _{stack}) ΔT = Difference between compressor exit air temperature and ambient temperature (°C)	$C_{\text{thermal}} = \text{Thermal Management System cost}$ $= (111.351 \times Q_{\text{HT}} / \Delta T_{\text{HT}} + 184.116) + ((111.351 \times Q_{\text{LT}} / \Delta T_{\text{LT}} + 96.2938) \times Q_{\text{LT}} / Q_{\text{HT}})$ Where: Q = Radiator Duty (i.e. heat rejected from the stack) (kW _{stack}) ΔT = Difference between stack operating temperature and ambient temperature (°C) LT = Low Temperature Loop HT = High Temperature Loop
$C_{\text{air}} = \text{Air Management System}$ $= (134.8044 \times P) + (1.07068 \times MF) + 101.024$ Where P = Air Peak Pressure (atm) MF = Air Mass Flow (kg/hr)	$C_{\text{BOP}} = \text{Balance of Plant Cost}$ Where: $C_{\text{BOP}} = \$829.36$

Figure 33: Simplified automotive cost model

Figur 1: Kostnadsfunktion (James 2012, s 45)

Figur 1 är tagen från en rapport av Brian D. James (2012).¹ Denne James på företaget Strategic Analysis är nog den mest kända personen på temat kostnadsanalyser för bränsleceller med mera. Han och hans kollegor har under många år fått finansiering från amerikanska energidepartementet (USDOE) för att bevaka området och nya rapporter levereras i princip årligen.

Ambitionen med denna rapport är att göra en enklare kostnadsfunktion som underlättar kvalificerade diskussioner kring om och hur bränsleceller kan bidra till kostnadseffektiv framdrivning av fordon.

Även om det finns en hel del underlag att utgå ifrån har projektet en stor utmaning och det är att de som kan området bäst, dvs. tillverkarna av bränsleceller, inte vill berätta allt de vet. Detta av konkurrensskäl. Denna utmaning delas med andra forskare inklusive ovan nämnde James och i takt med att bränsleceller blir mögare för massmarknaden blir det svårare att få del av detaljerade data.

I ett tidigare projekt "Kostnadsutvecklingen för bränslecellsfordon" studerades kostnadsanalyser för bränsleceller och bränslecellsfordon.² Slutsatsen av det projektet var en kostnad för ett typiskt bränslecellssystem för personbilar liksom en jämförelse av totalkostnaden för fordon med olika slags framdrivning och drivmedel. Merparten av tillgänglig litteratur visade på att många olika former av drivlinor har förutsättningar att bli konkurrenskraftiga, inklusive bränslecellsfordon.

I en efterföljande studie "När passar bränsleceller bäst?" undersöktes olika typer av drivlinor.³ Resultaten, som även kom att tas upp av Ny Teknik, visade på vilka tillämpningar som passar mer eller mindre bra för några olika typer av drivlinor. Bränslecellsfordon visade konkurrenskraft i segment som ligger ganska nära typisk bilanvändning medan exempelvis batterifordon främst visade sig intressanta för tillämpningar där de får mycket lång samlad körsträcka.

¹ James, B.D. (2012) Mass production cost estimation of direct H2 PEM fuel cell systems for transport applications. Strategic Analysis, 2012 update

² Pohl, H. (2015) Kostnadsutvecklingen för bränslecellsfordon. Energiforsk rapport 2015:166

³ Pohl, H. Grauers, A. Nyman J. och Wiberg, E. (2017) När passar bränsleceller bäst? Energiforsk rapport 2017:366

Ett försök att studera kombinationer med batterier gjordes i studien och lösningen med bränsleceller som range extender visade sig konkurrenskraftig visavi den på marknaden gängse lösningen där bränslecellerna dominerar och batterierna inte är externt laddbara. I denna studie görs ett nytt försök att studera olika kombinationer av bränsleceller och batterier.

Under 2017 genomfördes studien "Can fuel cells become a mass-produced option globally for heavy-duty trucks 2030+?" och parallellt med detta projekt pågår en fortsättning till det projektet.⁴ ⁵Resultatet av första etappen visade på att bränslecellslastbilar kan vara intressanta och att drivmedelskostnaden har en stor betydelse för olika drivlinetypers inbördes konkurrenskraft.

1.3 METOD

För att nå fram till förhoppningsvis användbara resultat avgränsas studien till att enbart diskutera en typ av bränsleceller nämligen vätgasdrivna polymerelektrolyt-bränsleceller (PEFC) i traktionär tillämpning. De fordon som finns har en eller två stackar på vardera cirka 100 kW. Dock förefaller de lastbilar som Nikola Motor Company utvecklar sikta på tre stackar om vardera cirka 100 kW.

Studien avgränsas därför till lösningar med upp till tre parallellkopplade stackar. Effektmässigt omfattar studien bränsleceller från 30 – 340 kW, vilka tillsammans torde täcka in de flesta traktionära behoven.

Även om tillgång saknas till företagsintern information avser studien bidra genom att förklara vilka samband som finns mellan viktiga parametrar som påverkar kostnaden över fordonets livstid. För att i möjligaste mån landa i realistiska slutsatser diskuteras resultaten med experter löpande under projektets gång.

Stort tack för värdefulla synpunkter på rapportutkast till Magnus Karlström, Kanehira Maruo, Anders Grauers och Andreas Bodén.

Data och antaganden hämtas till stor del från tidigare projekt nämnda i föregående avsnitt, vilket borgar för en kontinuitet i bedömningarna liksom en påbyggnad av kunskapsbanken.

Genom att sätta in kostnadsfunktionerna i ett fordonssammanhang belyser studien vidare på ett konkret sätt hur kostnaderna påverkar. Också för att öka graden av konkretion i studien redovisas inledningsvis några data för aktuella bränslecellsfordon av olika typer.

⁴ Karlström, M. Grauers, A. Holmberg, E. och Pohl, H. (2018) Can fuel cells become a mass-produced option globally for heavy-duty trucks 2030+? An exploratory study of Total-Cost-of-Ownership

⁵ Hydrogen fuel cell trucks 2030 – next step

2 Konkreta exempel

2.1 STACKTILLVERKARE

2.1.1 Ballard

Kanadensiska Ballard är den största leverantören av bränsleceller för tunga fordon och företaget samarbetar även med Volkswagen och Audi i utvecklingen av system för personbilar. Företaget har levererat till flertalet av de bussar som finns på vägarna, dock inte till Daimler och Toyota. Avtal om stora leveranser till fordon i Kina har annonserats under senare år.

I företagets produktblad framgår det att grunden i deras system för större fordon är en modul med effekter från 4 – 22 kW. Med den modulen kan sedan olika stora system på upp till 200 kW erbjudas. Några kompletta system med effekter på exempelvis 30, 60, 85 och 200 kW erbjuds för fordonstillverkare som snabbt och lätt vill kunna integrera bränsleceller i fordonet.

I september 2018 lanserades en ny produktgeneration för tunga fordon som bland annat utlovar en livslängd på över 30 000 h.⁶

Ballard rekommenderar att deras bränsleceller för tunga fordon ligger i serie med batterier och att de tillåts arbeta vid jämn last.

2.1.2 PowerCell

Göteborgsbaserade PowerCell har sitt ursprung från Volvo. Företaget har två olika stackar för traktionära ändamål i sitt sortiment. Den mindre och äldre stacken är på 5 – 35 kW och den senaste generationens stack är på 30 – 125 kW. Båda erbjuds även som system och då med effekterna 10 – 30 kW respektive 50 – 125 kW.

Företaget arbetar på det traktionära området med tillverkare av både lätta och tunga fordon. Informationen om vilka tillverkare det handlar om är dock begränsad. Dock har PowerCell blivit utvalt som leverantör till Nikola Motor Company, se nedan under 2.4.

2.2 LÄTTA FORDON

I första hand för att underbygga resonemangen om olika kombinationer mellan bränsleceller och batterier ges litet data för de personbilar som finns eller snart kommer att finnas på vägarna, se Tabell 1. Av dem är Toyota Mirai det fordon som har sålts i störst volymer med bortåt 8 000 fordon levererade i augusti 2018.

⁶ <http://www.greencarcongress.com/2018/09/20180925-ballard.html>

Tabell 1: Bilar med bränsleceller⁷

Fordon	Bränsleceller (kW)	Batterier (kW)	Batterier (kWh)	Elmaskin (kW)	Räckvidd (km)	Kommentar
Toyota Mirai	114	32	1,59	113	658	NiMH batterier
Hyundai ix 35 FC	100	24	1,68	100	424	
Hyundai NEXO	95	40	2,8	120	592	
Honda Clarity Fuel Cell	103	346 V		129	586	
Mercedes-Benz GLC F-CELL	112	129	9/13,8	147	500	Effektoptimerade batterier antagna
Räckvidden kan vara baserad på olika körcykler, NEDC används om tillgängligt Kursiverade siffror är beräknade utifrån data och antaganden						

2.3 BUSSAR

Några av de bussar som finns på vägarna återfinns i Tabell 2. Batteridata har varit svåra att få fram.

Tabell 2: Bussar med bränsleceller⁸

Fordon	Bränsleceller (kW)	Batterier (kW)	Batterier (kWh)	Elmaskin (kW)	Vätgas (kg)	Kommentar
Toyota Sora	2*114			2*113	25	NiMH batterier
Citaro Fuelcell	2*60	250			35	
Van Hool	150	100			30-35	
Wright	75	240			33	
Solaris	100		120		45	Range extender
Kursiverade siffror är beräknade utifrån data och antaganden						

2.4 LASTBILAR

På lastbilsfronten har det hänt en hel del på senare år och i Tabell 3 visas endast några exempel. Även om det återstår att se vad som blir konkret, framstår Hyundai's avtal med schweiziska H2 Energy om 1 000 fordon med leveransstart under 2019 som en viktig signal.

⁷ <http://www.greencarcongress.com/2018/01/20180109-nexo.html>

<https://automobiles.honda.com/clarity-fuel-cell/specs-features-trim-comparison>

<https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/exhibitions/ces/showcars/glc-f-cell-ces-2018/>

<https://www.autocar.co.uk/car-news/new-cars/mercedes-benz-glc-f-cell-2018-first-ride>

⁸ <https://newsroom.toyota.co.jp/en/corporate/21863761.html>

HANS POHL, ANDERS GRAUERS, JOAKIM NYMAN OCH ERIK WIBERG (2017) När passar bränsleceller bäst? – en studie av elektrifierade drivlinor

Tabell 3: Lastbilar med bränsleceller⁹

Fordon	Bränsleceller (kW)	Batterier (kW)	Batterier (kWh)	Elmaskin (kW)	Räckvidd (km)	Kommentar
Toyota Beta	2*114		12		480	
Scania	90		56	290	500	
Nikola	300		320	750	800-1600	Preliminära data
Hyundai	2*95			350	400	
Räckvidden kan vara baserad på olika körcykler Kursiverade siffror är beräknade utifrån data och antaganden						

Även här är det svårt att hitta bra data för batterierna än så länge. Intressant är att jämföra Hyundais lösning med Toyotas, eftersom Hyundai liksom Toyota använder personbilsstackar. Att döma av effektskillnaden mellan vad bränslecellssystemet ger och vad elmaskinen klarar, förlitar sig Hyundai förmodligen på batterier som klarar att leverera minst 350 kW.

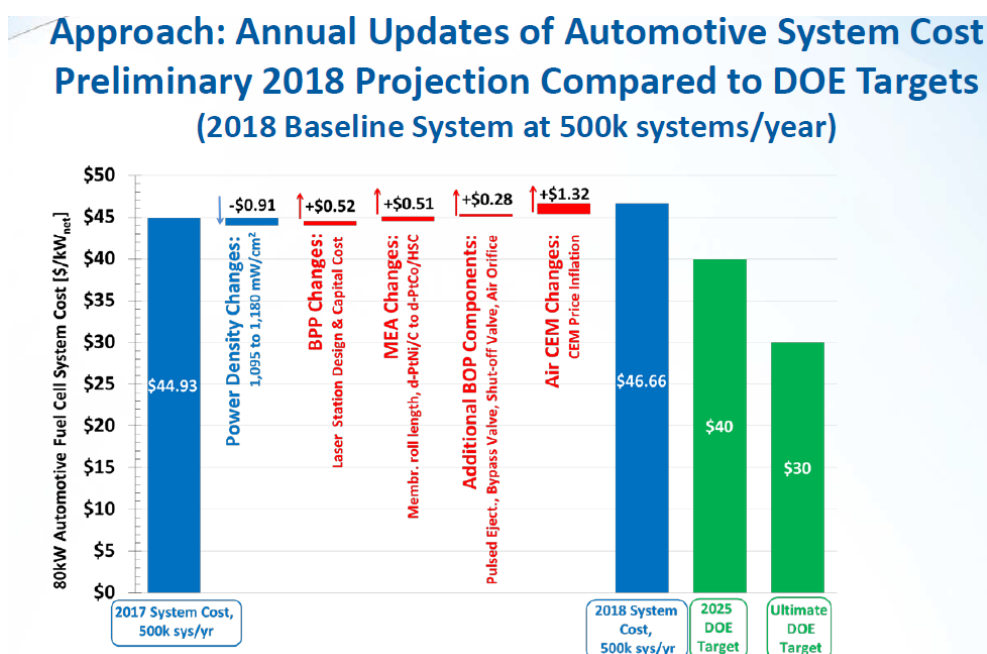
⁹ <http://www.greencarcongress.com/2018/09/20180921-hyundaih2.html>
<https://www.electrive.com/2018/09/20/hyundai-presents-fuel-cell-truck-with-h2e-marketing-deal/>
<http://www.greencarcongress.com/2018/07/20180731-toyota.html>
<https://newsroom.toyota.co.jp/en/corporate/23722307.html>
<https://nikolamotor.com/two>
Presentation Scania december 2017 på teknikbevakningskonferensen i Stockholm

3 Kostnadskalkyler och -mål

För att ge en uppfattning om i vilket härad kostnaderna ligger ges här en kort översikt över de mest refererade uppgifterna. Samtliga underlag är från USA och program finansierade av USDOE.

3.1 BRÄNSLECELLSYSTEMET

Kostnaden för ett bränslecellssystem för personbilar liksom USDOEs mål framgår av Figur 2. Bedömningen är alltså att kostnaden ligger på cirka 47 USD/kW vid hög tillverkningsvolym, dvs. 500 000 system per år.¹⁰



Figur 2: Bränslecellskostnad för personbilar (James et al 2018)

Motsvarande aktuella bedömning för bränslecellssystem för tunga fordon indikerar en kostnad om cirka 100 USD/kW.¹¹

Det bör noteras att kostnadsbedömningarna varierar över tiden efterhand som nya tekniska lösningar uppmärksammas. Från 2017 till 2018 gjordes enligt Figur 2 en uppjustering av kostnaden med nästan 2 USD/kW. Men sett över en längre tidsperiod har kostnadsbedömningarna efterhand indikerat allt lägre kostnader och målen framstår som ganska realistiska.

¹⁰ James, B.D, Huya-Kouadio, J.M. and Houchins, C. (2018) Fuel Cell Systems Analysis, Annual Merit Review Proceedings, June 2018

¹¹ Satyapal, S. (2018) Hydrogen and Fuel Cell Program Overview, Annual Merit Review Proceedings, June 2018

Livslängdsmålet enligt USDOE är 5 000 timmar för personbilar med 8 000 timmar som "ultimate target". För tunga fordon (bussar) gäller 16 000 respektive 25 000 timmar.¹²

3.2 VÄTGASTANKAR

Motsvarande kostnadsbedömningar för den vanligaste typen av vätgastank för personbilar, dvs. vätgas under 700 bars tryck indikerar en kostnad om cirka 15 USD/kWh. Långsiktigt USDOE-mål är 9 USD/kWh.

Tankar för tyngre fordon med 350 bars tryck bedöms även de kosta cirka 15 USD/kWh.¹³

¹² Papageorgopoulos, D. (2018) Fuel Cells R&D Overview, Annual Merit Review Proceedings, June 2018

¹³ James, B.D. and Houchins, C. (2018) Hydrogen Storage Cost Analysis, Annual Merit Review Proceedings, June 2018

4 Vad påverkar kostnaden?

Många faktorer påverkar kostnaden för bränslecellssystem, en del av dem kan bedömas med viss säkerhet, andra är mycket svårbedömda. Bland de per definition nästan omöjliga faktorerna att bedöma återfinns exempelvis radikala teknikförändringar avseende själva bränslecellssystemet eller dess tillverkningsmetoder.

Denna studie fokuserar på fem aspekter som alla har stor påverkan på kostnaden, nämligen:

- Uteffekt
- Livslängd
- Energilagrets storlek och typ
- Driftsförhållande
- Tillverkningsvolym

Det finns ett stort ömsesidigt beroende mellan livslängd och driftsförhållande.

I ett parallellt projekt studeras totalkostnaden för bränslecellsdrivna lastbilar. Det visar att investeringskostnaden för drivlinan inklusive energilager utgör en mindre del av totalkostnaden. Men även här finns det beroenden, har exempelvis bränslecellssystemet inte samma livslängd som fordonet i sin helhet, ökar kostnaden. Då drivmedlet har stor påverkan på totalkostnaden är faktorer som drivmedelspris och verkningsgrad också viktiga.

Nedan behandlas de fem aspekterna under vardera en rubrik.

4.1 EFFEKT

Effekten som systemet ska leverera påverkar givetvis kostnaden. Upprinnelsen till detta projekt är att kostnaden inte varierar linjärt med uteffekten, trots att merparten av de kostnadsuppskattningar som görs just använder enheten USD/kW. Så länge storleken ligger kring 80 kW fungerar kostnadsuppskattningarna men om effekten exempelvis halveras finns det flera delar i systemet som inte skalar linjärt, exempelvis stora delar av det som kallas balance of plant (BOP). BOP omfattar i princip allt i bränslecellssystemet utanför stacken, dvs. system för försörjning av luft och vätgas, kylsystem, fukthanteringssystem, vätgassensorer och styrsystem. Dock inräknas inte vätgastanken i BOP. Med ökad effekt följer naturligt behov av större aktiv yta (mer ström) och/eller fler celler (högre spänning). En viktig del av kostnadsreduktionerna har hittills varit att öka effektuttaget utan att öka enhetens fysiska storlek. Effekttätheten har flerfaldigats under det senaste decenniet.

Det hävdas ofta att en fördel för bränslecellssystem är att de till stor del byggs upp av många likadana celler. Därmed blir tillverkningsvolymen för cellerna fort ganska hög även om antalet bränslecellssystem är måttligt. Modulariteten verkar dock att döma av situationen på marknaden just nu inte öppna för att system med godtycklig effektstorlek görs. Tvärtom verkar tillverkarna ha få storlekar på stackarna med avseende på aktiv yta och även i den andra riktningen är antalet varianter begränsat. För tyngre fordon använder man exempelvis hellre två stackar för personbilar än gör en större stack.

Till viss del beror säkert detta vägval på att det i nuläget blir billigare att använda en typ av stack. Detta både genom stordriftsfördelar (se nedan) och att utvecklingskostnaden begränsas i ett skede när tekniken fortfarande utvecklas snabbt. Kanske finns det också fysikaliska begränsningar som gör att stackens storlek (längd-bredd-höjd) lämpligen hålls inom vissa mått.

Prestanda i form av hög effekt ska balanseras mot verkningsgraden för systemet. Högre tryck i stacken kan ge högre specifik effekt men det ger samtidigt högre förluster genom att kompressorn får arbeta hårdare. Verkningsgradskurvan för typiska bränslecellssystem varierar inte så mycket med ändrat effektuttag. Normalt sett erhålls bäst verkningsgrad vid ungefär halva maxeffekten.

4.2 LIVSLÄNGD

Livslängden kan till viss del dimensioneras fram genom att använda material av högre kvalitet och kanske främst genom att använda mer katalysator. Bättre eller mer material driver kostnaden uppåt. Liksom för batterier består bränslecellssystem av få rörliga delar och åldringen med tillhörande degradering av prestanda handlar främst om att katalysatorn med tiden fungerar sämre, exempelvis beroende på förändringar i materialstrukturen eller förgiftning.

Till skillnad från batterier är den kemiska reaktionen i bränslecellerna lättare att förstå och kontrollera. Det förbättrar möjligheterna att dimensionera ett system med önskad livslängd. Således är livslängden numera primärt en kostnadsfråga.

Livslängden för bränslecellssystemet för personbilar är att döma av Toyotas agerande fullt tillräcklig för att fordonen ska kunna säljas i flera tusental. Livslängden är förmodligen en större fråga för tunga fordon. Enstaka bussar i USA har redan klarat en livslängd över 25 000 h och ganska många har körts längre än 16 000 h.¹⁴

Livslängden beror mycket på hur systemet används. Bland de faktorer som påverkar mycket återfinns antalet start/stopp samt snabba belastningsändringar. Enligt en tillverkare är den enskilt viktigaste faktorn antalet starter av systemet som inte går enligt plan. Det kan vara så att batteriet av något skäl inte levererar tillräcklig effekt och att bränslecellssystemet därför tvingas öka effekten snabbare än vad som vore lämpligt givet aktuell temperatur i systemet. Sådana starter sliter på bränslecellerna och ska i möjligaste mån undvikas. Önskvärt är att bränslecellssystemet inte belastas särskilt hårt under uppvärmningsfasen.

I de bilar som Toyota, Honda och Hyundai säljer tillåts ganska kraftiga belastningsändringar eftersom effektbatteriet är litet. Dock ska Hyundai skifta till ett större batteri med nästan dubbel effekt till nästa generation bränslecellsbil.¹⁵ Om det görs för att öka prestanda eller för att förbättra livslängden framgår inte men med tanke på att batteribilar allt oftare ges höga prestanda så är det förmodligen det som drivit upp effektbehovet. Samtliga dessa bilar drabbas också av lika många start och stopp som andra icke laddbara bilar.

¹⁴ Joseck, F. (2018) System Analysis Program Overview, Annual Merit Review Proceedings, June 2018

¹⁵ Greencarcongress.com (2018) Hyundai introduces next-generation fuel cell vehicle NEXO; availability beginning later this year, 9 januari.

I Daimlers laddbara FCV kan bränslecellssystemet få en behagligare tillvaro. Batteriet är större och ger cirka 5 miles räckvidd vilket gör att en del körningar nog kan klaras av utan att bränslecellssystemet ens behöver starta. Dessutom kan bränslecellerna vanligen arbeta som range extenders vid jämn optimal belastning.

De flesta tunga fordon konstrueras också med stora batterier och bränslecellssystem som range extenders. För batterierna är effektvariationer inom rimliga gränser mindre allvarligt för livslängden än djupa urladdningar varför kombinationen kan sägas gynna livslängden för både batterier och bränsleceller samtidigt som kravet på hög driveffekt tillgodoses. I sådana konfigurationer blir användningen av bränslecellerna ganska lik stationär drift.

4.3 ENERGILAGRETS STORLEK OCH TYP

Det finns många sätt att försörja bränsleceller med bränsle. I ett parallellt projekt studeras frågan närmare¹⁶. I nuläget dominerar vätgas under högt tryck som bränsle. Vätgasen tankas vid 350 eller 700 bar och lagras ombord i en eller flera cylinderformade trycktankar. Ett kilo vätgas innehåller 33,3 kWh men cirka 95% av vikten för vätgastankar är inte gasen utan själva tanken.

Vätgastankar för 700 bar ska enligt regelverket hålla 5 000 cykler eller maximalt 20 år. Det är tillräckligt för de flesta personbilar. Kommersiella fordon kan behöva tankar som tål fler cykler. Vid lägre tryck gäller samma regler som för naturgas, vilket innebär att om tanken är designad för 20 års användning ska den hålla 20 000 cykler.¹⁷

Denna studie fokuserar på bränslecellssystemet och utgår därför ifrån att vätgastankarna har tillräcklig livslängd. Enligt ovan ingår ibland även batterier som energilager och även i det fallet görs förenklingen att de inte behöver bytas ut.

4.4 DRIFTSFÖRHÅLLANDE

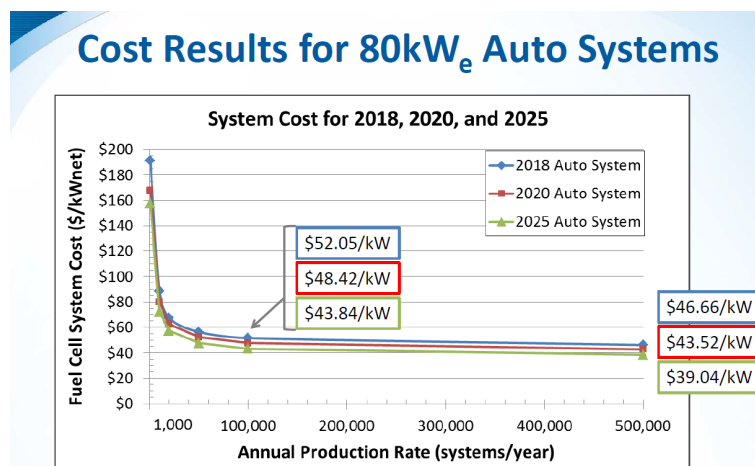
Driftsförhållandet för bränslecellssystemet utöver vad som redan diskuterats ovan under rubriken livslängd är ganska hårt liksom det är för nästan allt som är ombord på ett vägfordon. Vibrationer, smuts och stora temperaturskillnader ska utstås. Det i kombination med den intermittenta driften gör att stationära system i jämförelse förefaller ha det ganska trivsamt.

4.5 TILLVERKNINGSVOLYM

Tillverkningsvolymen påverkar på olika sätt. Med högre volymer kan investeringar i bättre och mer automatiska maskiner räknas hem, vilka när de har full beläggning bidrar till att reducera styckekostnaden ordentligt. Det blir också ekonomiskt försvarbart att lägga många extra ingenjörstimmar på att konstruera detaljerna så att de blir effektiva att tillverka och sätta samman.

¹⁶ Pohl, H. och Ridell, B. Vätgaslagring i fordon, ett projekt inom teknikbevakningen som slutförs under 2018

¹⁷ Trudgeon, M (2005) AN OVERVIEW OF NGV CYLINDER SAFETY STANDARDS, PRODUCTION AND IN-SERVICE REQUIREMENTS



Figur 3: Tillverkningskostnad som funktion av volymen (James, 2018)

Figur 3 visar kostnaden som funktion av tillverkningsvolymen. Det kan noteras att ökningen från 100 000 till 500 000 enheter reducerar kostnaden med cirka tio procent. Intressant är också kostnaden bedöms sjunka till 39 USD/kW år 2025.¹⁰

		2016 Automotive System					
Annual Production Rate	Sys/yr	1,000	10,000	30,000	80,000	100,000	500,000
System Net Electric Power (Output)	kWnet	80	80	80	80	80	80
System Gross Electric Power (Output)	kWgross	87.68	87.68	87.68	87.68	87.68	87.68
Bipolar Plates (Stamped)	\$/stack	\$1,985	\$772	\$698	\$668	\$658	\$653
MEAs							
Membranes	\$/stack	\$3,167	\$961	\$589	\$386	\$351	\$191
d-PtNi Catalyst Ink & Application (Disp)	\$/stack	\$2,307	\$1,326	\$1,052	\$973	\$957	\$928
CCM Acid Wash	\$/stack	\$506	\$51	\$34	\$17	\$19	\$14
GDLs	\$/stack	\$2,602	\$596	\$328	\$213	\$196	\$129
M & E Hot Pressing	\$/stack	\$39	\$17	\$17	\$10	\$10	\$9
M & E Cutting & Slitting	\$/stack	\$0	\$22	\$10	\$5	\$4	\$3
MEA Sub-Gaskets	\$/stack	\$917	\$272	\$152	\$126	\$124	\$115
Coolant Gaskets (Laser Welding)	\$/stack	\$410	\$53	\$53	\$40	\$38	\$37
End Gaskets (Screen Printing)	\$/stack	\$1	\$1	\$1	\$1	\$1	\$0
End Plates	\$/stack	\$99	\$80	\$70	\$64	\$63	\$55
Current Collectors	\$/stack	\$8	\$7	\$7	\$7	\$7	\$6
Compression Bands	\$/stack	\$10	\$9	\$8	\$6	\$6	\$5
Stack Housing	\$/stack	\$64	\$13	\$9	\$8	\$7	\$6
Stack Assembly	\$/stack	\$80	\$61	\$42	\$36	\$35	\$34
Stack Conditioning	\$/stack	\$60	\$18	\$18	\$16	\$16	\$13
Total Stack Cost	\$/stack	\$12,255	\$4,259	\$3,087	\$2,575	\$2,493	\$2,199
Total Stacks Cost (Net)	\$/kWnet	\$153.19	\$53.23	\$38.58	\$32.19	\$31.16	\$27.49
Total Stacks Cost (Gross)	\$/kWgross	\$139.77	\$48.57	\$35.20	\$29.37	\$28.43	\$25.08

Figur 4: Kostnadsspecifikation för stack vid olika volymer (James, 2016:33)

Olika delar av systemet påverkas olika mycket av lärlkurvor och stordriftsfördelar. I James (2016) ges en detaljerad beskrivning av såväl beräkningsmetodik som hur bränslecellssystem för fordon tillverkas vid olika volymer.¹⁸ Figur 4 illustrerar hur olika volymsskillnader påverkar kostnaden på de olika delarna av bränslecellsstacken. Enklare detaljer som inte är särskilt specifika för bränsleceller minskar ganska måttligt i kostnad medan mer specifika delar ibland kostar mindre än en tiondel vid masstillverkning. Det kan också noteras att delar med stor material-

¹⁸ James, B.D., Huya-Kouadio, J.M., Houchins, C. and DeSantis, D.A. (2016) Mass production cost estimation of direct H2 PEM fuel cell systems for transportation applications: 2016 update

kostnad, framför allt andra raden i detaljspecifikationen av MEA (Membrane Electrode Assembly) där katalysatorn står för en stor del av kostnaden, inte vinner så mycket på masstillverkning.

Motsvarande, fast primitivare analys av batterikostnader vid olika volymer görs i Berkman et al (2017).¹⁹ En intressant detalj i deras analys är att materialkostnaden utgör cirka 75% av kostnaden för batterierna om vinstmarginal för tillverkaren exkluderas. De räknar vidare att varje fördubbling av volymen reducerar materialkostnaden med 23,5%. En ökning från 1 000 till 500 000 enheter motsvarar ungefär att volymen fördubblas nio gånger ($2^9 = 512$). Materialkostnaden reduceras enligt deras sätt att räkna till $0,765^9 = 9\%$ av kostnaden vid 1 000 enheter. Det framstår som tveksamt och skiljer mycket från hur James (2016) räknar. Om inte annat visar denna jämförelse på att det är viktigt att inte ta dylika kostnadsuppskattningar för annat än grova indikationer, även om antalet värdesiffror ofta är stort.

¹⁹ Gert Berckmans, Maarten Messagie, Jelle Smekens, Noshin Omar, Lieselot Vanhaverbeke and Joeri Van Mierlo (2017) Cost projection of state of the art lithium-ion batteries for electric vehicles up to 2030. *Energies* (10), 1314.

5 Kostnadsfunktion för traktionära bränslecellssystem

5.1 KOSTNAD SOM FUNKTION AV EFFEKT

Antag uteffekt som varierar mellan 30 och 300 kW och att en stack levererar upp till 100 kW. Vid effekter över 100 kW används två lika stora stackar och över 200 kW tre. För att förenkla men förmodligen inte så långt från sanningen antas också att utvecklingen för varje stack är linjär.

Tillverkare av bränslecellssystem idag har ett par tre basdesigner som sedan kan anpassas för att ge olika effekter. En gräns mellan olika systemdesigner går vid cirka 30 kW. För effekter över 30 kW upp till drygt 100 kW används samma design. Det betyder förmodligen att ett system i den nedre delen av intervallet skulle kunna kostnadsoptimeras den dag tillräckligt stora volymer efterfrågas. I nuläget blir det dock billigare att begränsa antalet varianter för att få upp volymerna på de olika delsystemen.

För att göra en kostnadsfunktion behöver några värden antas, se Tabell 4.

Tabell 4: Kostnadsparametrar

Faktor	Beteckning	Antaget värde (USD)
Kostnad 30 kW	C_{30}	2 200
Kostnad 100 kW	C_{100}	4 400
Merkostnad två stackar	K_2	1,825
Merkostnad tre stackar	K_3	2,65

Kostnaden för en stack som funktion av effekten P kan då skrivas som

$$C_1(P) = C_{30} + (C_{100} - C_{30})(P - 30)/70 \text{ för } 30 \leq P \leq 100 \text{ kW}$$

Kostnaden för två stackar kan skrivas som

$$C_2(P) = K_2 * C_1(P/2) \text{ för } 100 < P \leq 200 \text{ kW}$$

Kostnaden för tre stackar skrivs

$$C_3(P) = K_3 * C_1(P/3) \text{ för } 200 < P \leq 300 \text{ kW}$$

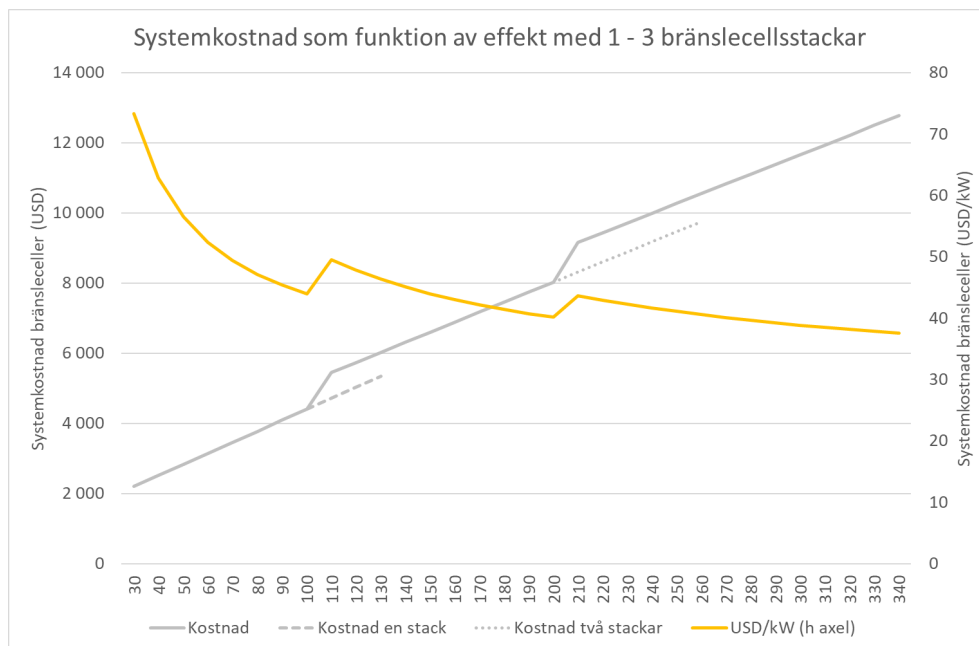
Kostnaden för 30 kW är svårbedömd. Med 2 200 USD är kostnaden per kW nästan dubbelt så hög som vid 100 kW. Kostnaden vid 100 kW är den som normalt anges i kostnadsbedömningar eftersom de vanligen handlar om bränslecellssystem i storleken 80 – 100 kW. Senaste budet är cirka 47 USD/kW för en 80 kW stack tillverkad i stor volym (jämför avsnitt 3.1).

Med 4 400 som kostnad för systemet vid 100 kW landar kostnaden per kW vid 80 kW med övriga ovanstående antaganden mycket nära dagens uppskattning om 47 USD/kW.

Kostnaden för två stackar bör vara mindre än dubbla kostnaden för en stack eftersom delar av systemet är gemensamma och andra kan skalas upp utan att

kostnaden därmed fördubblas. Antagandet bakom värdena K2 och K3 ovan är att 70% av systemet med två stackar är en proportionell ökning i förhållande till effekten medan 25% ökar bara till hälften och 5% inte medför några merkostnader. Uppräkningsfaktorn blir då $0,7*2 + 0,25*1,5 + 0,05*1 = 1,825$. Analogt blir då uppräkningsfaktorn för tre stackar 2,65.

I Figur 5 visas hur totalkostnaden för systemet blir för olika effekter med ovan givna antaganden. Om inte annat så visar figuren tydligt att det inte är lämpligt att använda samma kostnad per kilowatt för vitt skilda effekter.



Figur 5: Kostnad för en till tre stackar

Det bör också noteras att pucklarna i skiftet mellan antalet stackar sannolikt jämnas ut eftersom 100 kW inte är någon absolut gräns för en stack. En del stackar ger högre effekt än 100 kW. Kostnaden för dem antyds med den streckade linjen.

En fördel med de primitiva kostnadsfunktionerna som figuren baserar sig på är att det är enkelt att ändra på antagandena och på så vis få en uppsättning kurvor baserade på olika antaganden.

5.2 KOSTNAD SOM FUNKTION AV LIVSLÄNGD

En studie av de kostnadsanalyser som har gjorts och hur de har förändrats över tiden visar att kostnaden för bränsleceller för tunga fordon har gått från cirka 300 USD/kW²⁰ till cirka 100 USD/kW¹¹. Förändringen är större än för personbilar som har gått från cirka 54 USD/kW²⁰ till cirka 45 USD/kW¹¹. I båda fallen jämförs data

²⁰ James, B.D. (2015) Fuel Cell Vehicle and Bus Cost Analysis, Annual Merit Review Proceedings, June 2015

från 2015 med data för 2018 och båda referenserna torde utgå från ungefär samma underlag inom USDOEs program så jämförelsen är relevant.

Orsakerna till att kostnaden för bränslecellssystem för tunga fordon nu bedöms bli bara en tredjedel av vad den var för tre år sedan är inte redovisade av USDOE. Min gissning är att bland annat följande faktorer spelar in:

- Straffet för de låga volymerna som antogs år 2015 för tunga fordon har reducerats ordentligt, nu antas större volymer, kanske delvis eftersom systemen inte längre antas bli särskilt olika mellan personbilar och tyngre fordon.
- Merkostnaden för att ge systemen bättre livslängd har prutats av olika skäl. Ett skäl är att användningen i tyngre fordon nu verkar bli mer skonsam för systemen genom användning av stora traktionära batterier. Dock betonar kalkylerna att det fortsatt handlar om bränslecellsdominanta system. Ett annat skäl är nog de positiva driftserfarenheter som USA har av bränslecellsbussarna. Och slutligen så verkar utvecklingen för systemens livslängd generellt ha gått ganska fort i rätt riktning.
- Bränsleceller var tidigare primärt aktuella för bussar bland de tyngre fordonen. Nu har lastbilar i olika storlekar blivit aktuella, vilket är en marknad med helt andra volymer och tydligare behov av att pressa kostnaderna.

Ballard och PowerCell levererar numera till både lätta och tunga fordon. Det talar för att även de dedicerade tillverkarna av bränslecellssystem klarar att möta såväl tunga som lätta sidans krav med ungefär samma produktkoncept.

Tillverkare som Toyota och Daimler säger sig använda samma stack i lätta och tunga fordon. Tidigare har effektuttaget varit lägre i de tunga fordonen, sannolikt för att öka livslängden. Nu verkar åtminstone Toyota inte sänka effekten i sina bränslecellsdominanta bussar.

Stationära tillämpningar bedöms av USDOE ligga på cirka 1 900 USD/kW.¹¹ Då avses ett system med 25 kW effekt. Livslängdsmålet är 10 gånger längre än för personbilar, dvs. 80 000 timmar. Extrapoleras kalkylen ovan blir kostnaden cirka 80 USD/kW vid systemeffekten 25 kW. Således, allt annat lika, bedöms alltså en tiofaldig ökning av livslängden leda till cirka 24 gånger högre kostnad per kW. Jämförelsen haltar dock på flera sätt, exempelvis ingår reformering av metangas i det stationära systemet. Dessutom är det helt olika marknader med olika volymer och betalningsvilja.

Sammantaget leder denna livslängdsdiskussion till slutsatsen att lång livslängd förvisso kostar mer men att skillnaden är måttlig. Merkostnaden för ett bränslecellssystem med livslängd lämpad för tunga fordon bedöms ligga i intervallet 30 - 50%.²¹

²¹ Uppgiften kommer från tillverkare av bränslecellssystem för fordonstillämpningar m m.

6 Kombinationer av bränsleceller och batterier

6.1 NÅGRA ANTAGANDEN

Bränslecellsfordon är numera alltid försedda med traktionära batterier i någon form. Då batterier och bränsleceller ger synergier av olika slag är en viktig fråga hur olika kombinationer av dem påverkar totalkostnaden.

Analogt med kostnadsfunktionen för bränsleceller återfinns nedan dito funktioner för två olika typer av batterier, de som är optimerade för effekt och de som är optimerade för energi. Effektbatterier sitter i icke laddbara hybridfordon medan energibatterier företrädesvis används i laddbara fordon.

För att göra en kostnadsfunktion måste några värden antas, se Tabell 5. Uppgifterna för batterierna är baserade data flera olika källor, exempelvis ³.

Tabell 5: Batteriparametrar

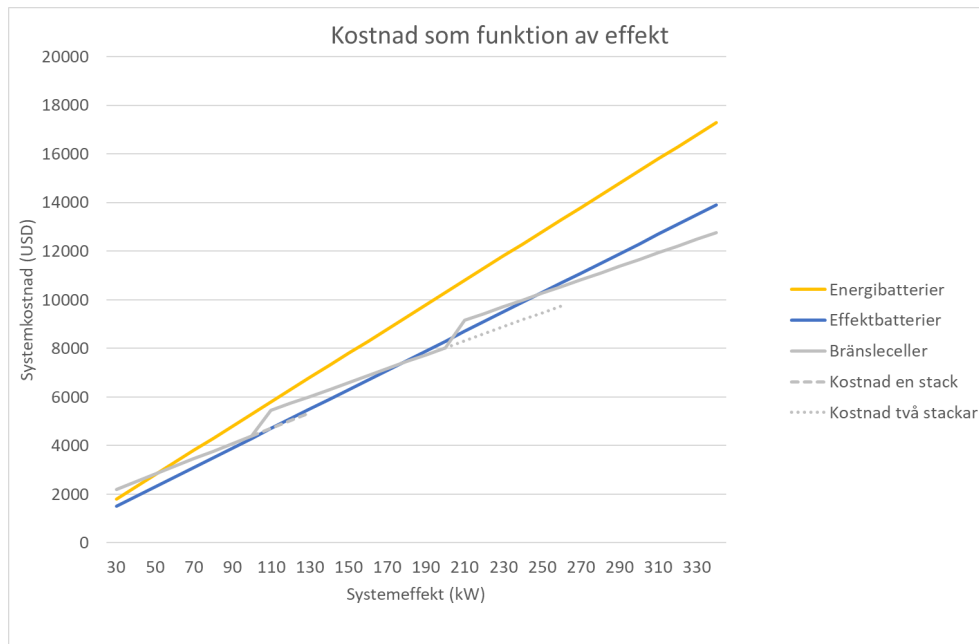
Faktor	Effektbatterier	Energibatterier
Effekt per kWh	14,3	4
Fast kostnad	300 USD	300 USD
Rörlig kostnad per kW	40 USD	50 USD (beräknad)
Rörlig kostnad per kWh	572 USD (beräknad)	200 USD

I flera sammanhang diskuteras batterikostnadernas utveckling och det är många faktorer som bidrar till förvirring om vad som egentligen gäller. Fokus ligger ofta endast på kostnaden per kWh och inte sällan avses då kostnaden på en lägre nivå i batterisystemet, exempelvis cellnivå eller modulnivå. Dessutom finns det en rad olika batterikemier som har olika egenskaper, exempelvis avseende livslängd. Då endast en del av batteriets kapacitet i fordonet ska användas för att inte äventyra livslängden kan det också skilja mellan om kostnaden uppskattas per tillgänglig kWh eller per total kWh.

De siffror som används i denna studie är valda med ambitionen att omfatta ett komplett batterisystem år 2025 där hela energimängden kan användas för framdrivning.

Det ska noteras att den fasta kostnaden varierar beroende på vald systemlösning. Exempelvis torde valet av batterikylningsmetod påverka den fasta kostnaden. Men denna studie fokuserar på bränsleceller och dessa kostnadsfunktioner är förmodligen bättre än de helt linjära som vanligen används.

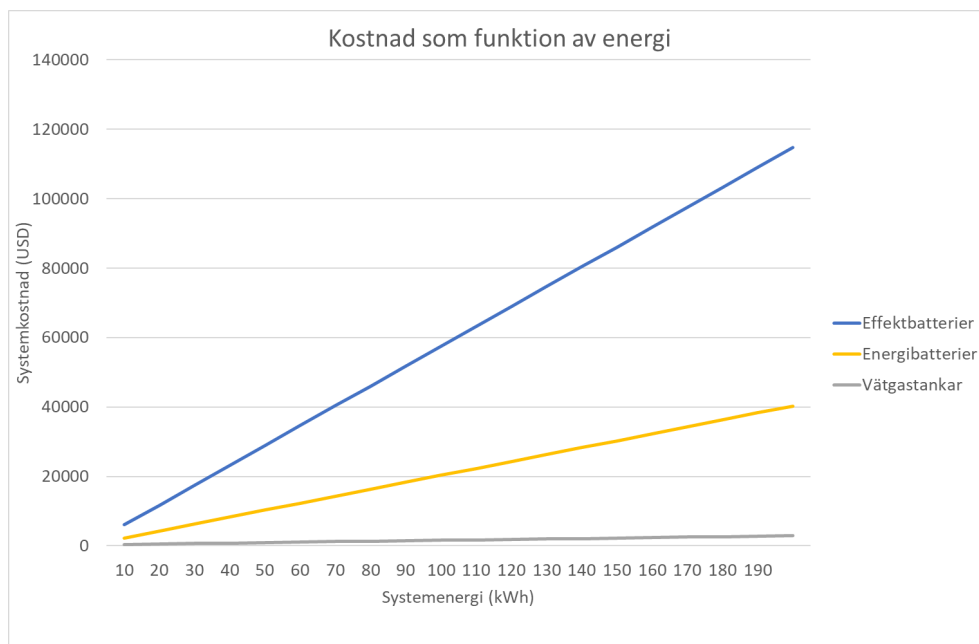
Vidare är batterivärlden inte så svartvit som antagandena ger sken av. Det finns exempelvis mellanting med energibatterier som ger mer effekt än stipulerat ovan på bekostnad av någon annan egenskap. De två batterityper som används är valda som typiska exempel.



Figur 6: Kostnad per effektenhet

Enligt Figur 6 utvecklar sig alltså kostnaden per effektenhet ungefär lika för effektbatterier och bränsleceller medan energibatterier har en något snabbare ökning.

På temat lagring av energi måste även siffror för vätgastankar antas. Enligt avsnitt 3.2 kostar vätgastankar för personbilar vid tillverkning i stora volymer cirka 15 USD/kWh. En motsvarande enkel kostnadsfunktion med 300 USD fast och 13 USD/kWh rörlig kostnad ansätts för vätgastankarna.



Figur 7: Kostnad per lagrad energienhet

I Figur 7 är det tydligt varför vätgas och bränsleceller ses som ett intressant alternativ för att förbättra fordonets autonomi. Det bör dock noteras att vätgastanken i sin tur är mycket dyr i förhållande till en tank för konventionella drivmedel som diesel eller bensin.

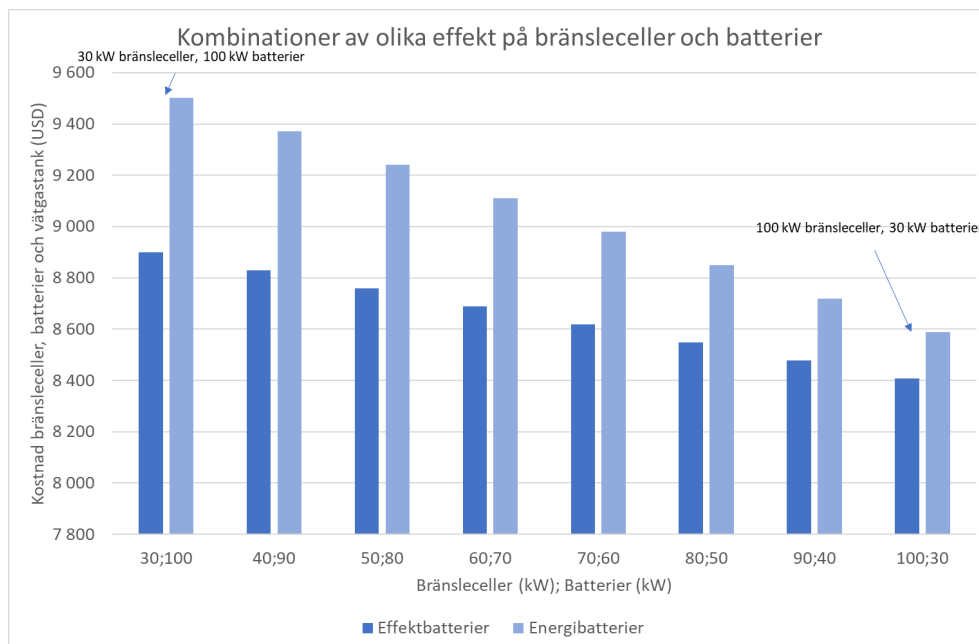
6.2 BRÄNSLECELLER OCH BATTERIER – LÄTTA FORDON

Baserat på vad som finns på marknaden ansätts att fordonets drivlina ska kunna leverera upp till 130 kW och att effekten som krävs över längre tid måste vara minst 30 kW. Vidare krävs en räckvidd om 600 km, vilket kombinerat med förbrukningsuppgifterna ger storlek på vätgastank och batterier. Drivmedelsförbrukningen beror mycket på fordonets storlek och i detta fall är relationen mellan vätgas och el det viktigaste. Mirai uppges ha en räckvidd om 658 km blandad körning och tankar som rymmer 5 kg vätgas. Det motsvarar en förbrukning om cirka 0,25 kWh/km. Trots det används 0,29 kWh/km i kalkylerna. Denna försiktiga skattning görs baserat på jämförelser med andra analyser av respektive drivlinas verkningsgrad, där relationen el- och vätgasförbrukning varit cirka 1 (el):1,7 (vätgas). Investeringskostnaden för drivlinan till två olika typfordon blir då enligt Tabell 7. Det bränslecellsdominerade fordonet motsvarar ungefär de fordon som Toyota, Honda och Hyundai säljer. Det batteridominerade fordonet finns inte på marknaden men liknar i viss mån den bil Mercedes nu ska sälja (se 2.2).

Tabell 6: Två typfordon

	Bränslecellsdominerad	Batteridominerad
Effekt bränsleceller (kW)	100	30
Effekt batterier (kW)	30	100
Förbrukning (kWh/km)	0,29 (vätgas) 0,17 (el)	
Kostnad bränsleceller, batterier och vätgastank (USD)	8 450	9 500 (energi) 8 900 (effekt)

En något mer detaljerad analys av olika kombinationer av bränsleceller och batterier framgår av Figur 8. Till vänster i Figur 8 återfinns batteridominerade lösningar och till höger bränslecellsdominerade. Både effekt- och energibatterier tas med och Figur 8 visar att så länge endast kostnaden för drivlinan inklusive energilager beaktas ger hög effekt på bränslecellssystemet i kombination med effektbatterier (dvs. mörkblå stapel till höger i figuren) lägst kostnader inom valt intervall. Högst kostnad ger stora energibatterier i kombination med ett litet bränslecellssystem. Det bör också noteras att kostnadsskillnaden överlag är ganska begränsad, alla kombinationerna befinner sig i intervallet 8 400 till 9 500 USD.



Figur 8: Kostnad för olika kombinationer av bränsleceller och batterier

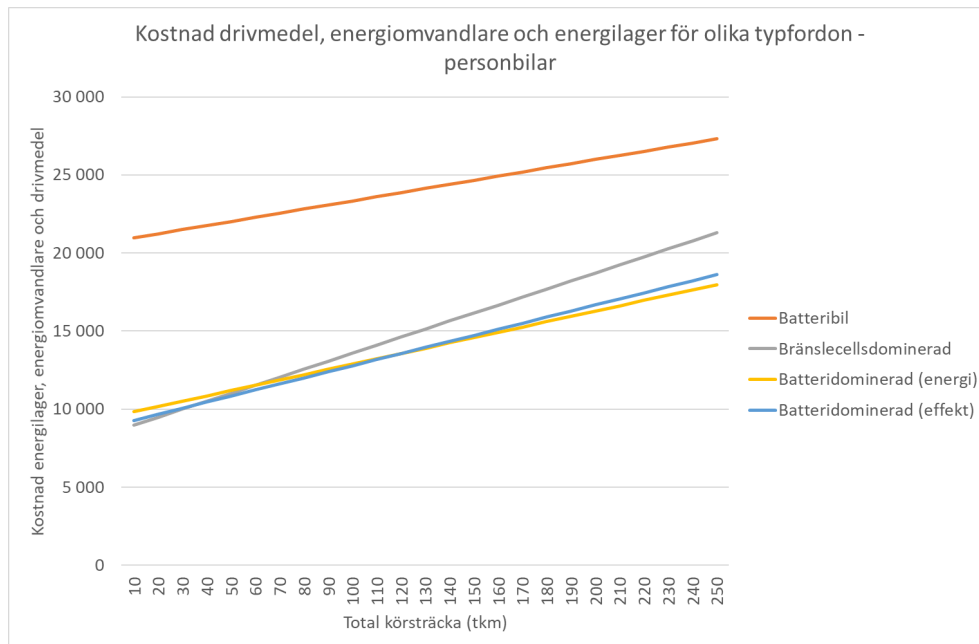
Nästa steg i analysen är att beakta kostnaden för drivmedel. På många marknader kostar elektriciteten mindre än vätgas per kWh och skillnaden blir större per km eftersom verkningsgraden i drivlinan är högre för batterifordon.

Från FCHDV⁴ hämtas värden för drivmedelskostnaden, se Tabell 7. Batteriräckvidden avser batteridominerade fordon med 100 kW batterier och 30 kW bränsleceller.

Tabell 7: Driftsparametrar

	Vätgas	El (energibatterier)	El (effektbatterier)
Förbrukning (kWh/km)	0,29	0,17	
Kostnad (USD/kWh)	0,178*	0,155	
Drivmedelskostnad (USD/km)	0,051	0,026	
Batteristorlek, batteriräckvidd		25 kWh, 147 km	7 kWh, 41 km
Andel på externt laddad el	0%	70%	50%
*) 0,178 USD/kWh motsvarar cirka 5,9 USD/kg vätgas			

Med dessa värden kan en total kostnad för energiomvandlare, energilager och drivmedel som en funktion av körsträcka beräknas, se Figur 9.



Figur 9: Kostnadsjämförelse för fyra olika fordon

Det bränslecellsdominerade fordonet med 100 kW bränsleceller och 30 kW effektbatterier har lägst kostnad upp till cirka 3 000 mil. Därefter ger det batteridominerade fordonet med effektbatterier lägst kostnader upp till cirka 11 000 mil. Fordonet med energibatterier och bränsleceller som räckviddsförlängare blir sedan billigast upp till över 100 000 mil. Det renodlade batterifordonet ger en väsentligt högre kostnad men i gengäld finns också möjligheten att ta ut betydligt mer än 130 kW ur det stora batteripaketet.

Huvudbudskapet i Figur 9 är kanske att kostnadsskillnaderna mellan de tre alternativen som omfattar bränsleceller är så små att andra faktorer än kostnaden kan avgöra vad som slår igenom. I avsnitt 7.2 diskuteras detta vidare.

Kalkylerna är primitiva, exempelvis tas ingen hänsyn till kapitalkostnad. Skulle kapitalkostnaden beaktas gynnar det fordon som har lägre grundinvesteringskostnad, dvs. det bränslecellsdominerade respektive det batteridominerade (effekt) fordonet med bränsleceller.

Känslighetsanalys för olika vätgaspriser görs för distributionslastbilar liksom nuvärdesberäkningar av de samlade kostnaderna.

6.3 BRÄNSLECELLER OCH BATTERIER - TUNGA FORDON

Motsvarande kalkyler för lastbilar görs för två olika tillämpningar, stadstrafik (distributionslastbil och kanske även buss) respektive intercitytrafik. Effekten för stadstrafik ska vara minst 150 kW och för långväga transporter 335 kW och med data enligt Tabell 8 bör bränsleceller plus batterier kunna klara att leverera den effekten även under längre stunder.

Räckviddskravet för stadstrafik sätts till 200 km medan långväga transporter antas kräva 500 km.

Tabell 8: Fyra typfordon

	Bränslecellsdominerad		Batteridominerad	
	Stad	Intercity	Stad	Intercity
Effekt bränsleceller (kW)	150	335	50	100
Effekt batterier (kW)	50	50	150	335

Från FCHDV⁴ hämtas värden för driften, se Tabell 9.

Tabell 9: Driftsparametrar

	Vätgas	El (energibatterier)	El (effektbatterier)
Kostnad (USD/kWh)	0,178	0,155	
Stadstrafik			
Förbrukning (kWh/km)	1,7	0,96	
Drivmedelskostnad (USD/km)	0,30	0,15	
Batteristorlek, batteriräckvidd		37,5 kWh, 39 km	10,5 kWh, 11 km
Andel på externt laddad el	0%	40%	20%
Intercity			
Förbrukning (kWh/km)	2,4	1,32	
Drivmedelskostnad (USD/km)	0,43	0,21	
Batteristorlek, batteriräckvidd		84 kWh, 63 km	23 kWh, 18 km
Andel på externt laddad el	0%	25%	10%

Livslängdsfrågan är aktuell både för batterierna och bränslecellerna – håller de hela fordonets livslängd? I denna ansats görs kalkylen som om batterier och bränsleceller håller den livslängd som kalkylen omfattar (utan merkostnader jämfört med det som antogs för personbilar). Då grundinvesteringen för tre av de fyra drivlinealternativen är relativt liten i förhållande till drivmedelskostnaden har livslängdsfrågan inte så stor betydelse för dessa tre fordonstyper. Men om det renodlade batterifordonet måste byta ut batterierna en eller flera gånger skulle det få tydlig påverkan på totalkostnaden.

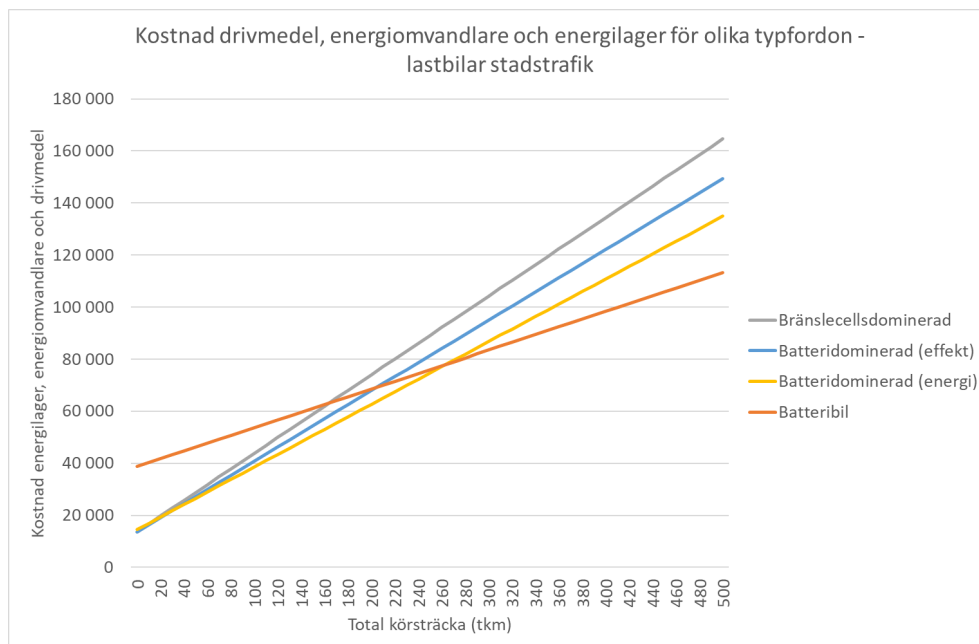
Tabell 10: Kostnader för tunga fordon

	Bränslecellsdominerad		Batteridominerad	
	Stad	Intercity	Stad	Intercity
Kostnad bränsleceller, batterier och vätgastank (USD)	13 180	30 456	12 367 (effekt) 15 871 (energi)	30 766 (effekt) 38 552 (energi)

Totalkostnaden enligt Tabell 10 är snarlikt resultaten för personbilar, billigast blir fordonet med effektbatterier och bränsleceller som räckviddsförlängare, tätt följt av det bränslecellsdominerade fordonet. Högst investering medför det batteridominerade fordonet med energioptimerade batterier.

Utöver dessa typfordon med bränsleceller görs även en jämförelse med batterifordon som klarar räckviddskravet. Dessa fordon får batterier dimensionerade efter energilagringsbehovet och därmed möjligheter att ta ut en väsentligt högre effekt än övriga fordon.

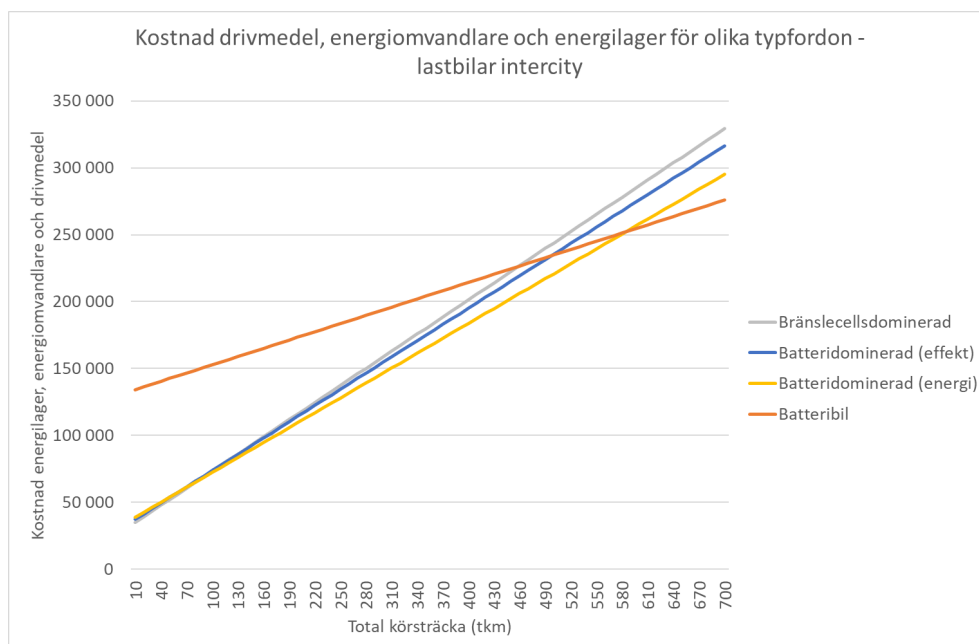
I Figur 10 visas kostnaden för energiomvandlare, energilager och drivmedel för distributionslastbilar. Snarlik kostnadsbild torde gälla även för stadsbussar.



Figur 10: Ackumulerad kostnad - distributionslastbilar

Notera att axeln för den totala körsträckan nu har förlängts upp till 500 000 km. I nästan hela intervallet 0 – 270 000 km ger energibatterifordonet med bränsleceller som räckviddsförlängare lägst kostnad. För längre total körsträcka ger batterifordonet kostnadsfördel.

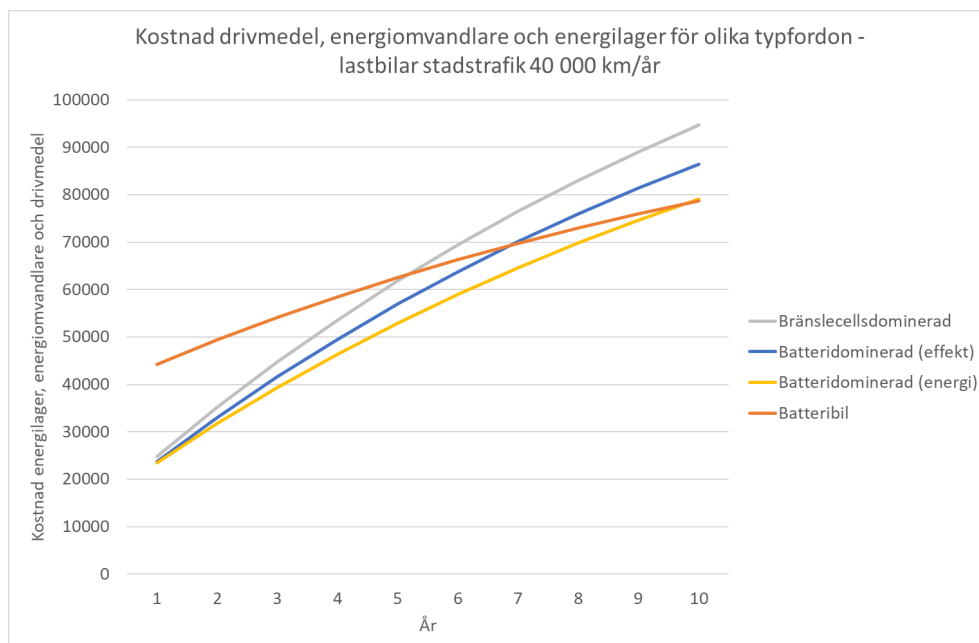
Resultaten av motsvarande kalkyl för landsvägstrafik visas i Figur 11.



Figur 11: Ackumulerad kostnad - intercitylastbilar

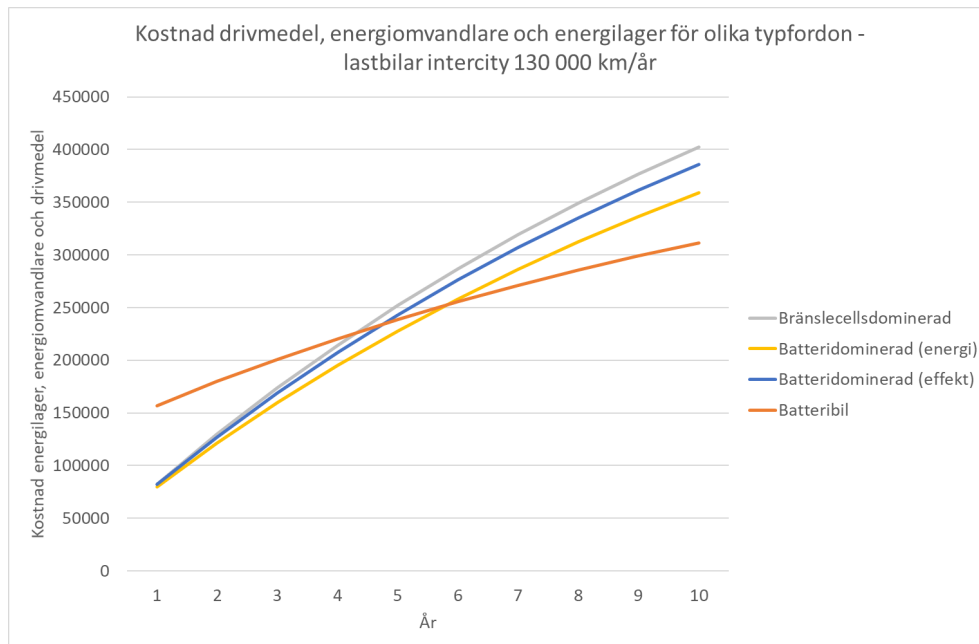
Med undantag för total körsträcka understigande cirka 80 000 km ger det batteri-dominerade fordonet med energibatterier och bränsleceller som räckviddsförlängare ger lägst kostnad upp till cirka 580 000 km. Därefter ger batterifordonet lägst kostnad.

Mot bakgrund av den stora skillnaden i grundinvestering mellan det renodlade batterifordonet och övriga alternativ finns det anledning att göra om kalkylen med hänsyn tagen till kapitalkostnaden. Räntan gör att fordon med lägre investeringskostnad och högre driftskostnader får en relativt sett bättre konkurrenskraft. Antag en ränta om 8% och en årlig körsträcka om 40 000 km för distributionslastbilen och 130 000 km för intercityfordonet. För distributionslastbilen erhålls resultat enligt Figur 12.



Figur 12: Ackumulerad kostnad med räntehänsyn - distributionslastbilar

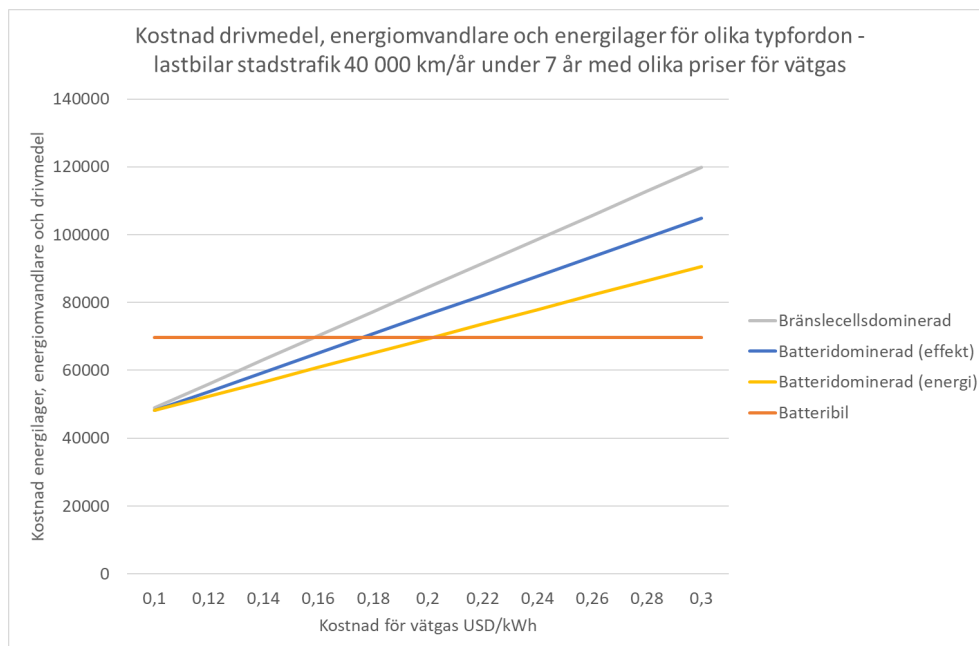
Värt att notera är att räntehänsyn slår ganska hårt mot totalkostnaden för batterifordonet, som bara nått och jämnt når lägst totalkostnad år 10. Resultatet av motsvarande kalkyler för intercityfordon återfinns i Figur 13.



Figur 13: Ackumulerad kostnad med räntehänsyn - intercitylastbilar

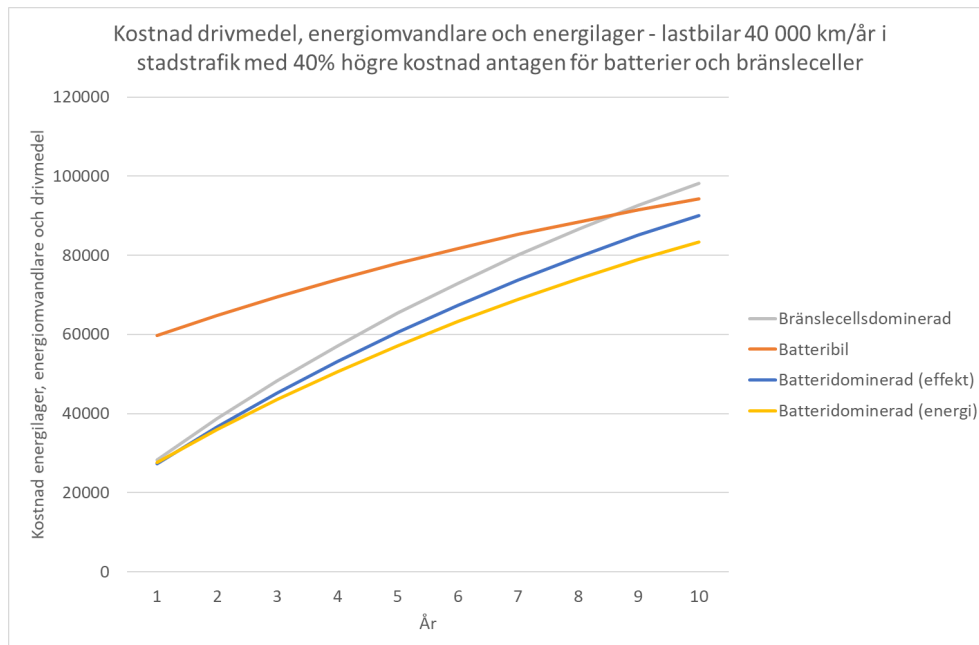
För långväga trafik blir batterifordonets kostnader lägst efter 6 år. Då har fordonet rullat mer än 800 000 km.

För tunga fordon påverkar kostnadsrelationen mellan vätgas och el väldigt tydligt. En känslighetsanalys för distributionsfordon där vätgaskostnaden varierar från 0,1 till 0,3 USD/kWh visas i Figur 14. Alla fordon antas köra 4 000 mil per år under 7 år. Att fordonet som endast tankar vätgas bara ger lägst kostnad vid under 0,1 USD/kWh beror på att verkningsgraden vid vätgasdrift är lägre än vid drift på externt laddad el (verkningsgradsförlusten i laddaren är inte medräknad).



Figur 14: Känslighetsanalys för olika vätgaskostnader

För att slutligen illustrera påverkan av merkostnaden för drivlinor som har batterier och bränslecellssystem designade för 'heavy duty' användning, återfinns i Figur 15 ett diagram där kostnaden för bränslecellssystemet och batterierna skalats upp med 40%.



Figur 15: Distributionslastbilar med 'heavy duty long life' batterier och bränsleceller

De tre bränslecellsutrustade fordonen påverkas inte så mycket av en sådan kostnadshöjning medan batterifordonet tappar i konkurrenskraft (jämför Figur 15 med Figur 12).

7 Avslutande diskussion

7.1 KOSTNADSFUNKTIONENS BETYDELSE

Innovationers genomslag beror i slutänden ofta på andra faktorer än rationella avvägningar mellan vad som är mest kostnadseffektivt. Därmed inte sagt att det går att bortse från prestanda och kostnader. Detta projekt har tagit fram en ganska enkel kostnadsfunktion för bränslecellssystem för det effektintervall som är mest relevant för vägtransporter. Olika faktorer som påverkar kostnaden har diskuterats, bland dem livslängden för systemet.

Kostnadsfunktionen visar att antaganden om en viss kostnad per kW fungerar bra inom mindre intervaller men det kan bli ordentligt missledande om kostnaden används utanför intervallet.

Med hjälp av kostnadsfunktionen och en rad antaganden om fordon, vätgastankar och batterier, analyserades kostnaden för olika typtillämpningar. För personbilar har investeringskostnaden för de olika delarna i drivlinan relativt sett mycket större betydelse än för tyngre fordon.

7.2 KOMBINATIONER BATTERIER OCH BRÄNSLECELLER

Då alla bränslecellsfordon inkluderar stora eller små traktionära batterier gjordes en analys av fyra olika typfordon i tre olika typtillämpningar, se Tabell 11.

Tabell 11: Undersökta typer av drivlinor och tillämpningar

	Personbil räckvidd 600 km	Distributionslastbil räckvidd 200 km	Long haul/ intercitylastbil räckvidd 500 km
Bränslecellsdominerat fordon med små effektbatterier som inte laddas från elnätet	100 kW FC 30 kW batterier	150 kW FC 50 kW batterier	335 kW FC 50 kW batterier
Batteridominerat fordon med energibatterier och bränsleceller som räckviddsförlängare som laddas från elnätet	30 kW FC 100 kW/25 kWh batterier	50 kW FC 150 kW/32,5 kWh batterier	100 kW FC 335 kW/83,8 kWh batterier
Batteridominerat fordon med effektbatterier och bränsleceller som räckviddsförlängare som laddas från elnätet	30 kW FC 100 kW/7 kWh batterier	50 kW FC 150 kW/10,5 kWh batterier	100 kW FC 335 kW/23,4 kWh batterier
Batterifordon som laddas från elnätet	408 kW/102 kWh batterier	768 kW/192 kWh batterier	2640 kW/660 kWh batterier

En slutsats av denna jämförelse är att batteridominanta fordon med bränsleceller som räckviddsförlängare oftast framstår som alternativet med lägst kostnad för drivlina och drivmedel. Batterifordon ger lägst kostnad för lastbilarna, under förutsättning att de körs lång total sträcka.

Denna kostnad är emellertid inte totalkostnaden för fordonets användning och därför bör de olika lösningarnas påverkan på användningen diskuteras. För personbilar har fordonen som tankar vätgas fördelen visavi batterifordon som bara laddas från elnätet att de går snabbt att tanka, förutsatt att man har nära till en tankstation. Värmen som bränslecellssystemet genererar är till nytta en stor del av

året, åtminstone i länder som Sverige, vilket bidrar till bättre verkningsgrad än den som kalkylen antar. Bland fordonen som tankar vätgas har den dedikerade bränslecellsbilen fördelen att drivlinan inklusive energilager väger mindre och tar mindre plats. Det förenklar också för användarna att slippa ladda fordonet från elnätet. Rent beteendemässigt skulle ett sådant fordon kunna ersätta konventionella förbränningsmotorfordon utan att användaren behöver ändra något i sitt beteende.

Fordonen med räckviddsförlängning har å sin sida också fördelar. De erbjuder möjligheter för den som mest kör kortare sträckor och har tillgång till laddning från elnätet att hålla drivmedelskostnaden på en låg nivå (givet de priser vi har i Sverige idag). Vidare ger kombinationen av två energilager en viss redundans, skulle bränslecellssystemet krångla går det kanske ändå att förflytta bilen, åtminstone till en verkstad. Livslängdsmässigt erbjuder kombinationen av bränsleceller och batterier en möjlighet att förlänga livet på både bränslecellerna och batterierna. Och är livslängden redan tillräcklig kan det i stället omsättas i lägre kostnader för delsystemen.

För distributionslastbilar är det förmodligen lättare att säkerställa laddning där fordonet står över natten, varför de laddbara versionerna har större fördelar. Än viktigare är möjligheten att genom kombinationen av bränsleceller och batterier öka livslängden på drivlinan. Batteriversionen ger lägst kostnad efter flera års intensiv användning men det sker på bekostnad av reducerad lastkapacitet och minskad flexibilitet – behöver fordonet någon dag köra väsentligt mer än 200 km kan det bli svårt.

Reducerad lastkapacitet ökar totalkostnaden för transporten betydligt. I jämförelse med dyrare drivmedel, som bara ökar den delen av transportkostnaden, bidrar nedsatt lastkapacitet till att alla kostnader (fordon, drivmedel, förare) ökar.

Den långväga trafiken drabbas än mer av denna nedsättning av lastkapaciteten. Enligt tidigare projekt (FCHDV) innebär samtliga undersökta versioner reduktioner i lastkapacitet jämfört med dieselfordon. Men helt klart skulle ett fordon med batterier som medger 500 km räckvidd vara det som får störst nedsättning. Dessutom rullar denna typ av fordon ofta en stor del av dygnets timmar, varför längre stopp för laddning kan minska produktiviteten. Dessa aspekter talar för att versionerna som kan tanka vätgas är attraktivare.

KOSTNADSFUNKTION FÖR TRAKTIONÄRA BRÄNSLECELLSSYSTEM

Här beskrivs hur kostnaden för bränslecellssystem varierar med kraven på effekt och livslängd. Också kombinationer av bränsleceller och batterier omfattas av analysen.

Resultaten indikerar att merkostnaden för livslängd anpassad för tunga fordon är mellan 30 och 50 procent jämfört med system för personbilar. Analysen omfattar också tillhörande energilagring med vätgastankar och batterier och fokuserar på fem aspekter som har stor påverkan på kostnaden. Det handlar om uteffekt, livslängd, energilagrets storlek och typ, driftsförhållande och tillverkningsvolym.

Kostnadsanalysen av lätta fordon indikerar att det är små skillnader mellan personbilar med relativt stora batterier och litet bränslecellssystem och det omvända, även när man tar med drivmedelskostnaderna. Personbilar som endast har batterier medför högre kostnader över livstiden. För tunga fordon som kör mer per år och använder mer drivmedel blir drivmedelskostnaden mer betydelsefull, vilket gynnar fordon som till stor del går på el från elnätet.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk