

# NÄR PASSAR BRÄNSLECELLER BÄST?

RAPPORT 2017:366



TEKNIKBEVAKNING  
BRÄNSLECELLER



Swedish  
Electromobility  
Centre





# När passar bränsleceller bäst?

– en studie av elektrifierade drivlinor

HANS POHL, ANDERS GRAUERS, JOAKIM NYMAN OCH ERIK WIBERG

ISBN 978-91-7673-366-0 | © ENERGIFORSK april 2017

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 2014 – 2016 inom ramen för kompetenscentret Swedish Electromobility Centre med Energiforsk som koordinator och projektledare.

Denna rapport är en förstudie som undersökt i vilka vägfordon (personbilar, bussar och andra tyngre fordon) bränsleceller för framdrift passar bäst. Frågor som analyserats är hur bränsleceller hittills har använts i eldrivna fordon (systemkonfigurationer) och positionerats på marknaden, samt hur olika tillämpningar och användningsmönster påverkar förutsättningarna för bränslecellsfordon i förhållande till andra typer av framdrivning.

Projektet har genomförts av Hans Pohl och Joakim Nyman, Viktoria Swedish ICT AB, Anders Grauers, SHC/Chalmers och Erik Wiberg Vätgas Sverige. Hans Pohl har varit projektledare.

Styrgruppen för projektet har bestått av följande ledamöter: Anders Hedebjörn och Stefan Bohatsch Volvo Cars, Annika Ahlberg-Tidblad Scania, Johan Svenningstorp AB Volvo, Bengt Ridell Sweco Energuide, Göran Lindbergh Electromobility Centre/KTH, Peter Smeds/Magnus Lindgren Trafikverket, Elna Holmberg 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](http://www.energiforsk.se) och på Electromobility Centres webbplats [www.hybridfordonscentrum.se](http://www.hybridfordonscentrum.se).

Stockholm mars 2017

Bertil Wahlund Energiforsk AB

## Sammanfattning

En del i projektet söker klarlägga vilka systemkonfigurationer med bränsleceller som har varit och är aktuella samt hur olika lösningar används inom olika fordonstyper och marknadssegment. Studien omfattar alla huvudtyper av vägfordon där bränsleceller används traktionärt, dvs. personbilar, bussar och andra tyngre fordon. Den första delen av projektet bygger primärt på sammanställning och analys av publikt tillgängliga data.

Drivlinor av hybridtyp dominerar både bland personbilar och bussar. Med detta menas fordon som huvudsakligen drivs med el från vätgasdrivna bränsleceller där batteripaketet används som en effektbuffert. Bland det fåtal fordonstyper som har nått marknaden är detta den enda lösningen i nuläget.

Bussutvecklingen följer två spår. Det ena spåret är med specifika bränslecellsstackar för bussar, vanligen från Ballard. Det andra spåret, som förefaller att bli dominerande, är att använda samma stackar som personbilarna men styra dem på ett annat sätt. Dessutom används normalt två stackar per buss. Endast ett fåtal lastbilar ingår i data och det är därför svårt att uttala sig om dominerande teknikval i nuläget.

I den andra delen av projektet utvecklas en metodik för att systematiskt studera hur olika typer av drivlinor passar för olika typer av tillämpningar. Primärt används kostnaden för fordonsanvändaren som styrande faktor. Mot bakgrund av några antaganden jämförs kostnaden för investering och drift av bränslecellsfordon, batterifordon, förbränningsmotorfordon med biodrivmedel, samt två olika varianter av batterifordon med räckviddsförlängare, en med bränsleceller och en med förbränningsmotor.

Analysen visar på karaktärsskillnad i hur kostnaden för bränslecellsfordon och batterifordon varierar i förhållande till dimensionerna räckvidd per tank och total körsträcka under fordonets livslängd. Det är tydligt att batteridrift är bäst när räckviddskraven är måttliga och den totala körsträckan är lång.

En jämförelse av alla alternativen visar att förbränningsmotorfordonet med biodiesel är attraktivast för tillämpningar med kort och måttlig körsträcka under fordonets livstid. Vid lång total körsträcka och god räckvidd per tank (eller laddning) är batterifordon med bränsleceller som räckviddsförlängare billigast. Denna del av marknaden omfattar inte så många fordon. Dock sträcker sig tillämpningsområdet ner till att tänga den stora bulken av personbilar idag, dvs fordon som totalt körs cirka 20 000 mil och har en räckvidd på 50 mil.

Jämförs projektets första och andra del kan några skillnader noteras. En viktig skillnad är att bränsleceller som räckviddsförlängare uppvisar bättre totalekonomi än den idag dominerande lösningen med bränsleceller, dvs. ej laddbara bränslecellshybrider. Avgörande för denna slutsats är emellertid antagandet om att ett batterifordon med räckviddsförlängare till 67 procent körs på el från elnätet. Detta kan vara svårt i praktiken. En annan skillnad är att batteridrift ofta positioneras som lämpliga för små fordon som inte kör så långt medan bränslecellsdrift är för stora fordon med längre körsträckor. Kostnadsanalysen tar inte hänsyn till storlek (och vikt) men avseende körsträckor så bör batteribilar köras mycket för att vara konkurrenskraftiga. Det matchar inte segmentet stadsbil särskilt bra med undantag för taxi, möjligtvis. Bränslecellsfordonen ligger mer rätt i detta avseende.

## Summary

One part of the project investigates which powertrain configurations involving fuel cells that have been and are on the agenda. It also studies how the configurations are used for different applications and market segments. All main types of road vehicles are covered involving tractionary fuel cells, e.g. passenger cars, buses and other heavy vehicles. This part is primarily based on an analysis of publicly available data.

Hybrid fuel cell powertrains dominate among cars and buses. Thereby we mean vehicles predominantly propelled by hydrogen fuel cells with a battery pack as a power buffer. Among the few vehicle types on the market, this is the only solution until presently.

Bus development follows two paths. One path uses fuel cells specifically designed for buses, typically from Ballard. The other path, which appears to become dominating, uses the same stacks as for passenger cars but control them in a different manner. Moreover, two stacks are normally used. There are only a few trucks in the data and it is thus difficult to comment the choice of technology at present.

In the second part of the project a methodology is developed to enable a systematic study of how different propulsion types match different applications. The main guiding parameter is the cost of use. Against some assumptions, the cost is compared for the investment and use of fuel cell vehicles, battery electric vehicles, internal combustion engine vehicles with biofuel, and two battery electric vehicles with range extenders, one with fuel cells and one with an internal combustion engine.

The analysis indicates fundamental differences in how the cost for fuel cell and battery electric vehicles changes in relation to the range requirements and the total distance driven during the vehicle's lifetime. It is clear that battery propulsion is most attractive when the range requirements are moderate and the total driving distance is long.

A comparison of all alternatives indicates that internal combustion engine vehicles with biofuels are most attractive for applications with short and moderate total driving distance. For long driving distances and long range per tank (or recharge), battery electric vehicles with fuel cells as range extenders are the cheapest. This part of the market does not have many vehicles but the application area extends down to the large bulk of passenger cars today, e.g. vehicles with a lifetime distance of 200,000 km and a range of 500 km.

Comparing the two parts of the project some differences can be noted. One important difference is that fuel cells as range extenders exhibit better economy than the present dominating solution, hybrid fuel cell vehicles that cannot be recharged from an external power supply. Decisive for this conclusion is the assumption that such vehicles are to 67 percent electricity from the grid and 33 percent hydrogen. This might be difficult to achieve in practical use. Another difference is that battery propulsion often is positioned as suitable for small vehicles driving shorter distances whereas fuel cell vehicles are larger and used for longer distances. The cost analysis does not reflect size (and weight) but with respect to driving distances, battery electric vehicles must be used a lot to be competitive. This does not match the segment city car, apart from taxi use. Fuel cell vehicles are more correctly positioned in this regard.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>7</b>
1.1	Bakgrund	7
1.2	Syfte och avgränsningar	7
1.3	Metod	7
<b>2</b>	<b>Bränsleceller för fordon</b>	<b>8</b>
2.1	Något om utvecklingen sedan slutet av 1990-talet	8
2.2	Tekniken idag	8
2.2.1	Varför bränsleceller i fordon?	8
2.2.2	Exempel på drivlinekonfigurationer med bränsleceller	9
2.2.3	Tekniska utmaningar	10
2.3	Vad finns på marknaden?	11
2.3.1	Personbilar	11
2.3.2	Tyngre fordon	12
<b>3</b>	<b>Aktuella drivlinekonfigurationer</b>	<b>15</b>
3.1	Presenterade fordon med bränsleceller	15
3.2	Drivlinetyp för respektive fordonsslag	16
3.3	Utvecklingen över tid	17
3.4	Tekniska avvägningar	18
<b>4</b>	<b>Diskussion av marknadsanalysen</b>	<b>20</b>
4.1	Vilka systemkonfigurationer med bränsleceller diskuteras idag?	20
4.2	Vilka tillämpningar/ segment/ fordonstyper gäller för respektive teknikval?	20
4.3	Hur positioneras olika former av eldrivna fordon på marknaden?	21
4.4	Hur skiljer sig lösningarna mellan personbilar och tyngre fordon, exempelvis stadsbussar?	23
<b>5</b>	<b>Vilka drivlinor passar till vilka tillämpningar?</b>	<b>25</b>
5.1	Förutsättningar och antaganden	25
5.1.1	Verkningsgradsmodell	26
5.1.2	Undersökta drivlinor	26
5.2	Kostnadsmodeller	27
5.2.1	Komponentkostnader	27
5.2.2	Drivlinans pris för olika prestanda	28
5.2.3	Bränslekostnader	32
5.3	Jämförelse av kostnad för drivlinor för olika krav	32
5.4	Jämförelse av driftkostnad för bränsle och el	35
5.5	Jämförelse av TCO för olika drivlinor	37
5.5.1	Drivlinejämförelse för olika fordonsnischer	38
5.6	Batterilivslängdens påverkan på val av drivlina	43
5.7	Resultaten för några olika sätt att använda en bil.	46
5.8	Slutsatser om olika drivlinor för olika fordonsanvändning	47
<b>6</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>48</b>



# 1 Inledning

## 1.1 BAKGRUND

Denna rapport redovisar resultaten av ett projekt som har genomförts inom ramen för teknikbevakningen av bränsleceller. Projektet adresserar de två nära relaterade frågorna om hur bränsleceller används för framdrivning i fordon och i vilka tillämpningar som olika slags fordon med bränsleceller primärt positioneras.

Projektet genomfördes från slutet av 2015 till sommaren 2016. Viktoria Swedish ICT AB ledde i projektet vilket genomfördes i samarbete med SHC/Chalmers Tekniska Högskola och Vätgas Sverige.

Teknikbevakning av bränsleceller har placerats hos SHC bland annat för att få en närmare koppling mellan forskning och fordonsindustrin. Ett långsiktigt syfte är att bidra till fordonsindustrins kompetensförsörjning i Sverige. Verksamheten inom bränslecellsområdet hos SHC startade 2014 och finansieras i huvudsak av Energimyndigheten och koordineras av Energiforsk

## 1.2 SYFTE OCH AVGRÄNSNINGAR

Projektet omfattar två delar. En första del försöker klarlägga följande frågor:

- Vilka systemkonfigurationer med bränsleceller diskuteras idag?
- Hur positioneras olika former av eldrivna fordon på marknaden?
- Vilka tillämpningar/ segment/ fordonstyper gäller för respektive teknikval?
- Hur skiljer sig lösningarna mellan personbilar och tyngre fordon, exempelvis stadsbussar?

I en andra del av projektet görs en fördjupad analys av hur olika tillämpningar och användningsmönster påverkar förutsättningarna för bränslecellsfordon i förhållande till andra typer av framdrivning.

Studien omfattar alla huvudtyper av vägfordon där bränsleceller används traktionärt, dvs. personbilar, bussar och andra tyngre fordon. Renodlade APU-tillämpningar för bränsleceller adresseras inte specifikt av studien.

## 1.3 METOD

Den första delen av projektet bygger primärt på sammanställning och analys av publikt tillgängliga data. Utöver studier av rapporter, nyheter och vetenskapliga publikationer så görs även en databas över de fordon med bränsleceller som har presenterats i världen.

I den andra delen av projektet utvecklas en metodik för att systematiskt studera hur olika typer av drivlinor passar för olika typer av tillämpningar. Primärt används kostnaden för fordonsanvändaren som styrande faktor för vilken drivlina som passar för respektive tillämpning men till det kopplas också olika randvillkor som exempelvis tillgänglig räckvidd per tankning/laddning.

## 2 Bränsleceller för fordon

Efter en kort bakgrund ger kapitlet en beskrivning av teknikläget samt de bränslecellsfordon som finns att tillgå på marknaden.

### 2.1 NÅGOT OM UTVECKLINGEN SEDAN SLUTET AV 1990-TALET

Bränslecellsfordon har sedan slutet av 1990-talet positionerats på olika sätt i förhållande till alternativen. Inledningsvis handlade det mycket om fordon som själva i en reformer producerade vätgasen från kolväterika bränslen, exempelvis metanol. Behovet av batterier tonades ner och bränslecellerna ansågs klara sig utan traktionära sådana, åtminstone om fordonet tankades med vätgas.

Sedermera minskade intresset för bränslecellsfordon till förmån för andra alternativ. Elhybridfordon tog marknadsandelar och olika laddbara varianter blev ånyo högaktuella i diskussionerna och i viss mån även på marknaden. Samtidigt så fortsatte litet i skymundan utvecklingsarbetet med bränslecellsfordon med goda resultat och flertalet tekniska hinder eliminerades efterhand. Fokus har kommit att bli på fordon som tankar trycksatt vätgas, vanligen vid 700 bar. Dessa är hybridiserade på motsvarande sätt som elhybrider med förbränningsmotor, det vill säga att bränslecellen kompletteras med ett batteri som kan användas för att lagra bromsenergi och som kan hantera snabba transienter i effektbehovet. Bränslecellsfordonen positioneras nu som ett alternativ till andra typer av eldrift för vissa tillämpningar, exempelvis större fordon och fordon för interurbana transporter.

De senaste åren har biltillverkare som Toyota och Honda framhållit bränslecellsdrift framför batteridrift när det gäller helt eldrivna fordon. Samtidigt hävdar andra att batteritekniken snart är mogen för betydligt mångsidigare och kommersiellt mer attraktiva fordon än de som säljs i nuläget. Denna konkurrens mellan de olika alternativen är naturlig även om det med viss rätt kan hävdas att så länge det finns en stor dominerande teknik på marknaden, förbränningsmotorfordon, så är det med den tekniken som alternativen ska konkurrera.

Batterifordon hävdas ibland förorsaka en drastisk förändring av fordonsindustrin då introduktionen av sådana öppnar upp för helt nya aktörer att komma in på marknaden. Än så länge har inte så många nya aktörer förutom Tesla fått en tydlig roll men det finns flera stora och starka aktörer som kan komma att pröva lyckan, exempelvis Apple. Nyckelkomponenterna för bränslecellsfordon har än så länge till stor del utvecklats inom OEMerna, vilket utgör en intressant skillnad jämfört med batteriutvecklingen.

### 2.2 TEKNIKEN IDAG

#### 2.2.1 Varför bränsleceller i fordon?

Bränsleceller i fordon löser inte det globala energiförsörjningsproblemet men det utgör en teknik som kraftfullt kan bidra till att förbättra möjligheterna. Bland drivkrafterna för utveckling och användning av bränsleceller i fordon återfinns exempelvis:

- Klimatet – bränslecellsfordon kan bidra till minskade utsläpp av klimatpåverkande gaser genom hög verkningsgrad i fordonet och möjlighet att använda icke-fossila primärenergier.
- Minskat oljeberoende – den vätgas som utgör huvudspåret som drivmedel för bränslecells-bilar kan framställas på en lång rad olika sätt och därmed kan transporternas oljeberoende reduceras.
- Lokala miljön – bränslecellsfordon är vanligen lokalt helt fria från skadliga emissioner och dessutom betydligt tystare än förbränningsmotorfordon.

För den enskilde fordonstillverkaren och fordonsanvändaren erbjuder bränslecellstekniken en viktig möjlighet att ta hänsyn till dessa kritiska aspekter utan att tumma på kraven på fordonets prestanda, komfort och mångsidighet.

### 2.2.2 Exempel på drivlinekonfigurationer med bränsleceller

Bränslecells-bilarna från de stora tillverkarna är hybridbilar som tankar vätgas. I ett bränslecellssystem med polymerelektrolyt (polymer electrolyte fuel cells, PEFC) används vätgasen tillsammans med syre från luften för att producera el för framdrivning. Olika grad av hybridisering finns. I takt med stigande förväntningar på laddhybrider, ökar även intresset för teknikspåret där bränslecellerna används för sk. range extender lösningar, dvs. för att ladda fordonets batterier när så behövs under färd. I sådana fordon skulle bränslecellssystemet ersätta en förbränningsmotor och en generator. I denna tillämpning är fastoxidbränsleceller (SOFC) särskilt intressanta eftersom de erbjuder en högre grad av bränsleflexibilitet än PEFC.

För tyngre fordon har hittills främst stadsbussar varit aktuella för bränslecellsdrift. Därutöver pågår utveckling av bränsleceller för elproduktion till kringssystem i fordonen, exempelvis då de står parkerade. En sådan auxiliary power unit (APU) ersätter då den ordinarie dieselmotorn och generatoren för elproduktion. På detta område pågår utveckling av både PEFC och SOFC. PowerCell i Göteborg arbetar med utveckling av PEFC tillsammans med reformer som gör vätgas av diesel (eller andra kolväterika drivmedel), bland annat för APU-tillämpningar. Denna tillämpning adresseras inte i denna studie.

Följande kategorier av drivlinor används ofta för att beskriva fordonen:

- Bränslecellshybrider (FC hybrids), avser fordon som huvudsakligen drivs med el från bränslecellerna där batterierna bara utgör en stödjande funktion för att ta hand om bromsenergi och jämna ut belastningen på bränslecellerna.
- Laddbara bränslecellsfordon (FC plugin), avser fordon som har traktionära batterier som kan laddas genom anslutning till elnätet och ett bränslecellssystem som ger effekt och energi nog för normal framdrift av fordonet.
- Range extender hybrider (FC REX), avser fordon som har så stora traktionära batterier (energi och effekt) att de normalt driver fordonet, medan bränslecellssystemet primärt ger el när extra räckvidd behövs.
- Övrigt (Other), avser fordon med andra kombinationer, exempelvis bränsleceller och förbränningsmotor.

Bland möjliga drivlinekoncept som ännu inte uppmärksammats, måhända av goda skäl, återfinns exempelvis kombinationen av bränslecellsdrift och kontinuerlig elförsörjning under färd (konduktivt eller induktivt).

Det finns ingen tydlig skiljelinje mellan laddbara bränslecellsfordon och range extender hybrider. Tekniskt sett framstår den indelning som föreslås ovan ganska rimlig, dvs. benämningen baseras på vilket system som dominerar. I praktiken finns det dock aktörer som väljer att beteckna fordonen på annat sätt.

Dagens laddhybrider har delvis tagit marknadsandelar genom att erbjuda en kraftfull drivlina som vid enbart eldrift bara ger acceptabla prestanda men när även förbränningsmotorn körs ger riktigt god acceleration. Detta i kombination med ett relativt stort batteripaket ger en bil som är möjlig att köra med gott samvete på kortare turer i stadstrafik samtidigt som den även fungerar för längre resor. Den stora nackdelen är att kostnaden för kraftfull framdrivning och stort batteripaket blir ganska hög och fordonet blir också relativt tungt.

Det går att göra laddhybrider med måttligare prestanda. Men så länge kravet finns på en viss räckvidd i batteridrift måste eldrivlinan vara dimensionerad för att ge acceptabla prestanda och därmed utgör förbränningsmotorns effekt i princip ett tillägg. I någon punkt är det inte meningsfullt att förbränningsmotorn eller någon annan energiomvandlare driver fordonet direkt utan då är det lämpligare att den endast producerar el för batteripaketet och elmaskinen. Detta är vad som ofta kallas för en range extender.

Range extenders utgår från att elmaskinerna driver fordonet och att räckvidden vid behov utökas genom att en extra bränsle driven energiomvandlare startar. Det kan vara en förbränningsmotor tillsammans med en generator eller ett bränslecellssystem. fördelar med bränslecellslösningen är att generatoren inte behövs samt att lokala utsläpp minimeras. Nackdelar är kostnaden och beroendet av vätgas, samt vätgastankens storlek och vikt (att jämföra med en tank för ett flytande kolväte). För denna tillämpning kan fastoxidbränsleceller vara aktuella, vilka tack vare högre arbetstemperatur kan drivas med andra bränslen än vätgas. Även polymerbränsleceller kan drivas med andra bränslen, förutsatt en reformer, och då får systemet på grund av reformerns egenskaper också sådana begränsningar i dynamiken att de främst lämpar sig för range extender lösningar.

### 2.2.3 Tekniska utmaningar

Det finns idag serietillverkade bilar med bränsleceller som har all komfort och prestanda som behövs för att konkurrera med konventionella fordon. Många tekniska utmaningar som funnits, exempelvis start i sträng kyla och tillräcklig räckvidd per tank, har övervunnits.

Andra tekniska utmaningar som livslängd för bränslecellerna är svårare att bedöma om de är avklarade fullt ut. Att tillverkning av fordon nu görs i serier om tusentals fordon talar dock för att livslängden åtminstone för en del tillverkare av bränsleceller är tillräcklig för allmän marknadsintroduktion av fordonen. Det finns också exempel på busanvändare som rapporterar mer än 20 000 timmars drift med bränsleceller (samma stack).

Huvudutmaningen på fordonssidan är förmodligen kostnaden. Även här kan påbörjad volymtillverkning tas som bevis för att kostnaderna kommit ner ordentligt. Samtidigt hävdar många att Toyotas introduktion av hybridtekniken år 1997 under flera år innebar att företaget förlorade pengar på varje såld Prius. Kanske gäller samma sak för Toyotas första bränslecellsfordon Mirai?

Kostnadsaspekten behandlades förhållandevis utförligt i en rapport inom teknikbevakningen år 2015.<sup>1</sup> Slutsatserna i den rapporten var att det i de mest ambitiösa kostnadsanalyserna framstod som att kostnadsreduktionen, som under många år varit väldigt kraftig, avstannat under de senaste åren, och det på en nivå som ligger 20 – 40 procent över amerikanska energidepartementets kostnadsmål, givet storskalig tillverkning. Samtidigt så visade de analyser som studerade total cost of ownership konsekvent att bränslecellsfordon hade något eller några segment på marknaden där de skulle bli konkurrenskraftiga. I rapporten konstaterades det också att det i takt med allt mer kommersiella aktiviteter med bränslecellsfordon blir allt svårare att göra rättvisande kostnadsanalyser för personer som inte är anställda på de företag som masstillverkar bränslecellsfordon. Och de personer som arbetar där är förmodligen inte så intresserade av att redovisa sina kostnadskalkyler offentligt.

Givet fordonens beroende av vätgas, de är inte som många andra typer av fordon möjliga att köra med olika drivmedel (med undantag för laddbara bränslecellsfordon), så är uppbyggnaden av en infrastruktur för tillverkning och distribution av vätgas till fordonen central för att bränslecellsfordon ska kunna komma ut på marknaden i stor skala. Det är förmodligen den största barriären just nu men den frågan adresseras inte av denna studie.

## 2.3 VAD FINNS PÅ MARKNADEN?

### 2.3.1 Personbilar

Hyundai var först ut med att erbjuda fordon under 2013 med modellen Hyundai ix35 FCV. Då sattes målet att leverera 1 000 bilar till och med 2015. I mitten av 2015 hade knappt 300 bilar levererats i Europa, USA och Korea och det är inte troligt att målet nåddes, trots en då aviserad rejäl prissänkning. Anledningen till att inte fler kunde levereras uppges främst vara bristen på tankstationer för vätgas.<sup>2</sup>

Toyota presenterade sin Mirai i slutet av 2014 och antalet beställningar översteg vida produktionskapaciteten. Inledningsvis levererades bilen endast i Japan men sedan augusti 2015 går den även att beställa på andra marknader. Produktionsvolymerna för bilen är cirka 700 år 2015, 2 000 år 2016 och 3 000 år 2017. År 2020 siktar Toyota på att sälja 30 000 Mirai.

Honda presenterade sin nya bränslecellsbil Clarity år 2015 (samma namn som den bil som presenterades 2008). Den började levereras under 2016 då Honda siktade på att tillverka cirka 200 bilar.

I Tabell 1 ges några nyckeldata för fordonen.

<sup>1</sup> Pohl (2015) Kostnadsutvecklingen för bränslecellsfordon, Energiforsk rapport 2015:166

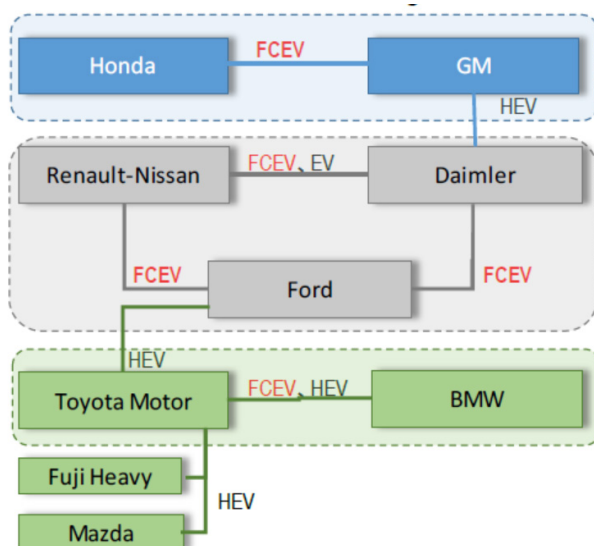
<sup>2</sup> Hyundai Tucson Fuel Cell sales not hitting target [UPDATE]

<http://www.autoblog.com/2015/06/17/hyundai-tucson-fuel-cell-sales-missing-target/>

Tabell 1: Bränslecells-bilar för marknaden

Tillverkare	Hyundai	Toyota	Honda
Modell	ix35/Tucson Fuel Cell	Mirai	Clarity
Bränsleceller	100 kW	114 kW	103 kW
Ellager	Li-jon 24 kW	NiMH 9 kW	Li-jon
Vätgas	5,64 kg, 700 bar, 1 tank	5,0 kg, 700 bar, 2 tankar	700 bar, 2 tankar
Räckvidd	594 km	502 km (US EPA)	589 km (US EPA)
Pris (USD)	76 000	57 500	56 500 – 64 000

Biltillverkarna samarbetar kring introduktionen av bränslecellsfordon. I Figur 1 framgår några av de större samarbetena. Två av grupperingarna har således kommit ut med fordon på marknaden medan grupperingen med Daimler, Renault-Nissan och Ford har aviserat att 2017 blir startåret. Det kan också noteras att Hyundai inte ingår i dessa samarbeten.



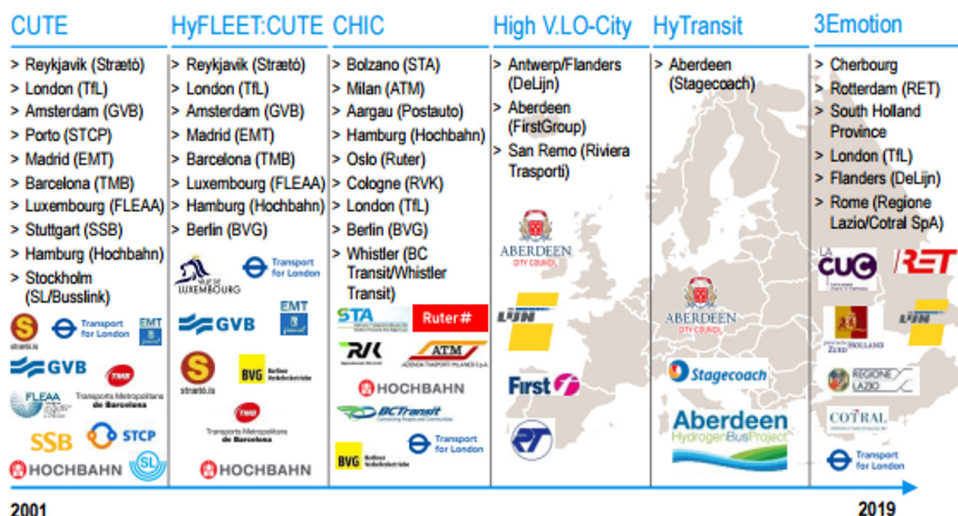
Note: FCEV=Fuel Cell Vehicles, HV=Hybrid vehicles, EV=Electric vehicles

Figur 1: Samarbeten om elektrifierade fordon<sup>3</sup>

### 2.3.2 Tyngre fordon

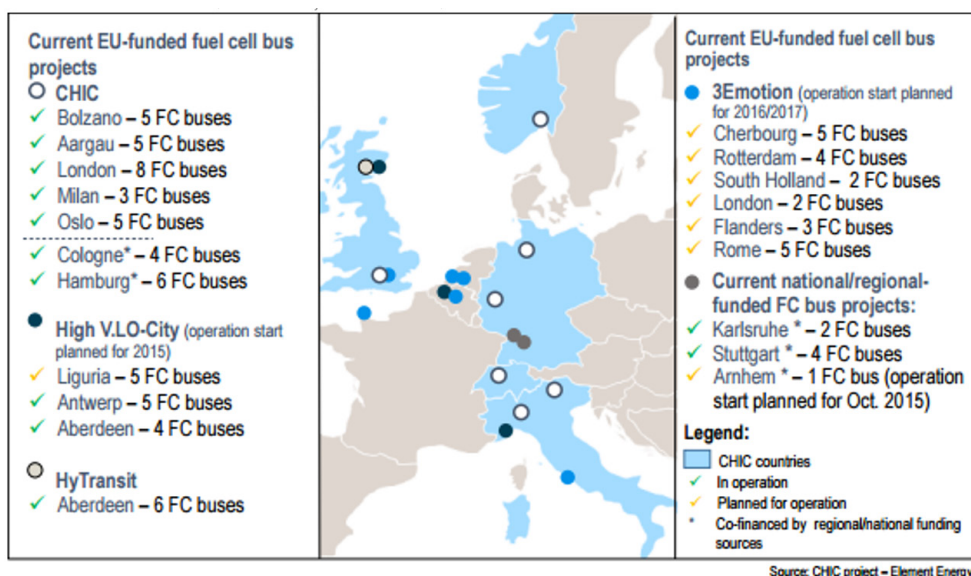
Den enda typen av tyngre fordon som har kommit ut på vägarna i nämnvärd omfattning är stadsbussar. Sådana har dock tillverkats och provats i ganska stor omfattning sedan början av 2000-talet, jämför Figur 2.

<sup>3</sup> Jefferies (2014) Industrials: Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs) – Benefits without Compromise



Figur 2: Gamla och nya europeiska projekt med bränslecellsbusar<sup>4</sup>

I Figur 3 framgår antalet bussar som ingår i de olika under 2016 aktuella projekten. Även om antalet bussar per stad har ökat något jämfört med det första stora projektet så är det fortfarande ganska stor spridning på bussarna. London med 10 bussar har troligen störst antal.



Figur 3: Bränslecellsbusar i EU-projekt

Störst leverantör av stadsbusar är Daimler genom EvoBus. Den Citaro som företaget tillverkar har levererats i ett antal olika generationer sedan NEBUS presenterades år 1997. Några har rullat inom ramen för CUTE-projektet i Stockholm. Totalt gjordes 40 bussar till CUTE med systerprojekt och därefter har ytterligare ungefär lika många bussar av senare generationer tillverkats. Bussarna inom CUTE använde bränsleceller från

<sup>4</sup> Roland Berger (2015) Fuel Cell Electric Buses – Potential for Sustainable Public Transport in Europe

XCELLSIS Fuel Cell Engines, en teknologi som numera ingår i Ballard. Senare generationer uppges använda samma bränslecellsstackar som Mercedes personbil B-klass F-Cell, dock två per buss. Dessa kommer från Automotive Fuel Cell Corporation (AFCC), ett företag samägt av Daimler och Ford.

De andra busstillverkarna för EU-projekten är Solaris, Wright och Van Hool. Dessa tre använder bränsleceller från Ballard, se Tabell 2.

**Tabell 2: Data för några bränslecellsbusar**

Tillverkare	Daimler EvoBus	Van Hool	Wright	Solaris
<b>Modell</b>	Citaro Fuel Cell Hybrid, 12 m	A330, 12 m	VDL 200 chassi, 12 m	Urbino, 18,75 m
<b>Bränsleceller</b>	2 * 60 kW från AFCC	150 kW från Ballard	75 kW från Ballard	100 kW från Ballard
<b>Ellager</b>	Li-jon 250 kW	Li-jon 100 kW	Supercaps 240 kW	Li-jon 120 kWh
<b>Vätgastankar</b>	35 kg, 350 bar, 7 tankar	30 - 35 kg, 350 bar, 7 tankar	33 kg, 350 bar, 4 tankar	45 kg, 350 bar, 9 tankar
<b>Kommentar</b>				FC som range extender



### 3 Aktuella drivlinekonfigurationer

I detta kapitel redovisas en genomgång av de fordon med bränsleceller för framdrivning som har presenterats publikt under det senaste decenniet. Underliggande databas för denna del av projektet har inte uppdaterats sedan april 2016.

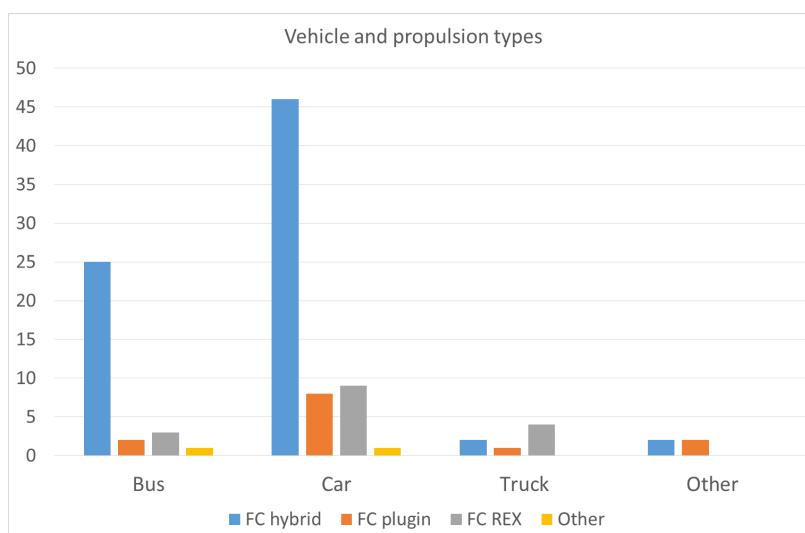
#### 3.1 PRESENTERADE FORDON MED BRÄNSLECELLER

För att belysa vilka systemkonfigurationer med bränsleceller som diskuteras idag gjordes en databas över 110 fordon som presenterats under det senaste decenniet. I databasen finns uppgifter om när fordonet presenterades och en del tekniska uppgifter. Det framgår vanligen också vilken mognadsgrad fordonet har, från koncept via olika slags demofordon till kommersiella lösningar.

Rent drivlinemässigt klassades de olika fordonen i följande grupper (jämför ovan under 2.2.2):

- Bränslecellshybrider (FC hybrids)
- Laddbara bränslecellsfordon (FC plugin)
- Range extender hybrid (FC REX)
- Övrigt (Other).

Klassificeringen är i sig en utmaning och inte helt konsekvent genomförd eftersom hänsyn tas till beskrivningen av fordonet från tillverkaren. Om drivlinan exempelvis uttryckligen beskrivs som en range extender lösning, då har fordonet klassats som en sådan, även om bränslecellssystemet är så stort att det på egen hand skulle kunna driva fordonet. För tre av 110 fordon var beskrivningen av drivlinan så ofullständig att någon klassificering inte var möjlig.



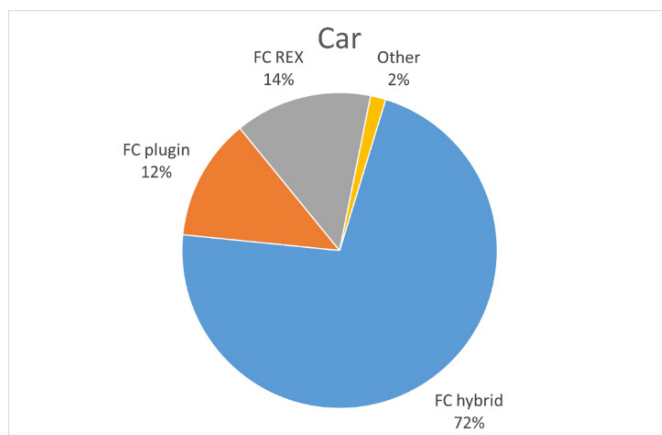
Figur 4: Översikt över presenterade fordonstyper och drivlinor

Fyra olika kategorier av fordon har använts i databasen, personbil, buss, lastbil och övriga. Bland övriga återfinns exempelvis gaturenhållning och traktorer. Figur 4 visar

att det är flest bilar som har presenterats det senaste decenniet, följt av bussar och drygt en handfull lastbilar.

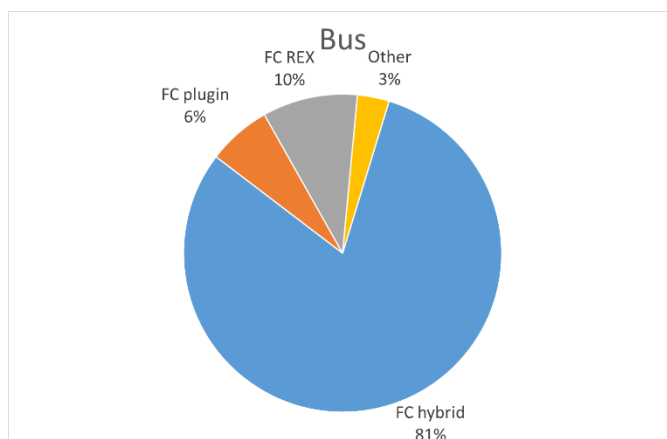
### 3.2 DRIVLINETYP FÖR RESPEKTIVE FORDONSSLAG

En närmare granskning av data för personbilar visar att vanliga hybridlösningar dominerar som drivlina för personbilar och det finns ungefär lika stor andel laddhybrider som range extenders, se Figur 5.



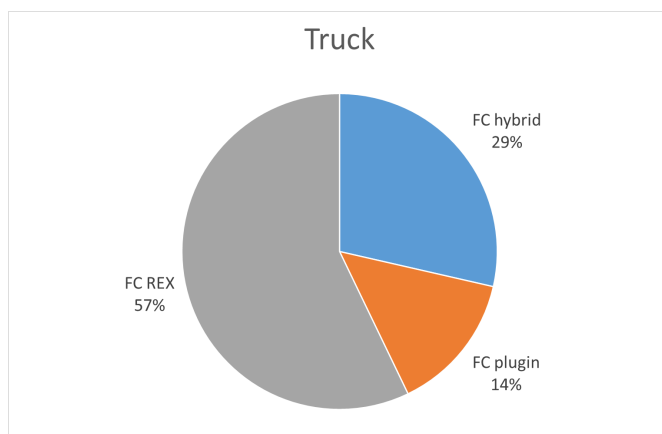
Figur 5: Drivlinetyper för personbilar

Även för bussar är fördelningen snarlik, dock med ytterligare dominans för vanliga hybrider, se Figur 6.



Figur 6: Drivlinetyper för bussar

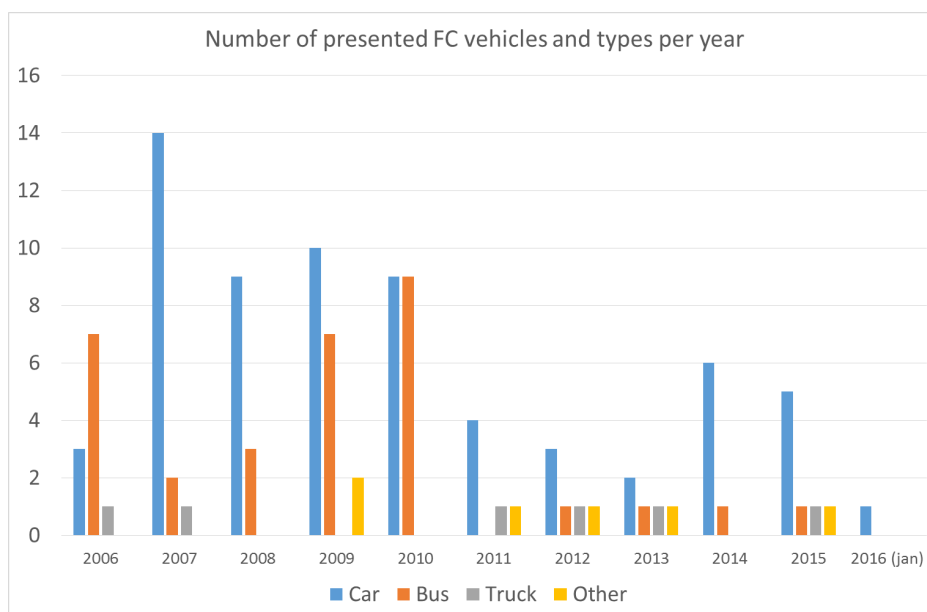
Det fåtal (sju) lastbilar som presenterats skiljer när det gäller valda drivlinor, se Figur 7. Räckviddsförlängning är här huvudalternativet.



Figur 7: Drivlinetyper för lastbilar

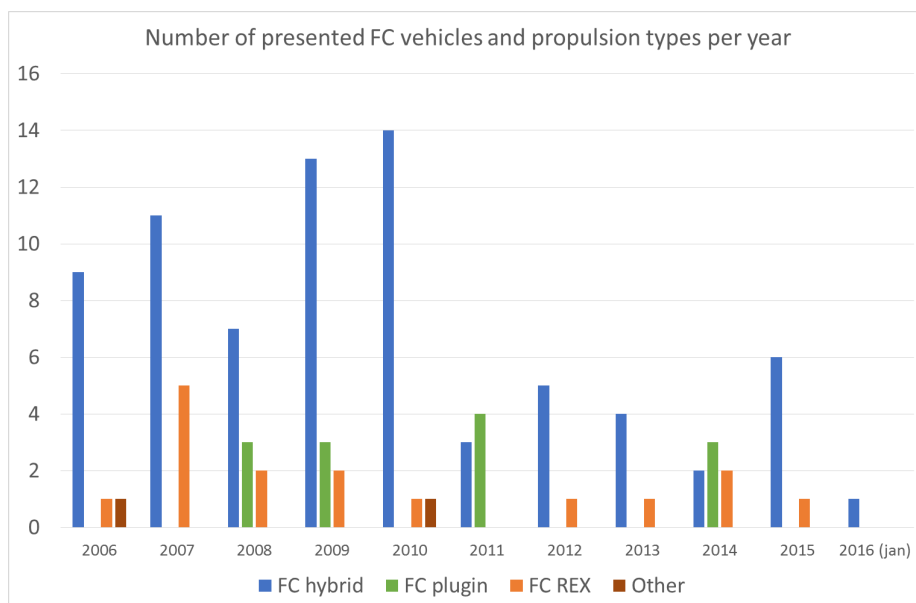
### 3.3 UTVECKLINGEN ÖVER TID

Det senaste decenniet har allmänt sett uppvisat en del olika trender när det gäller fordon och drivmedel. I Figur 8 framgår det att presenterade bilar och bussar till stor del härrör från perioden fram till och med 2010. Det bör observeras att det inte är antalet fordon som har tillverkats som visas nedan utan antalet modeller som har presenterats. Räknas antalet tillverkade fordon skulle personbilar dominera kraftigt givet den nyligen inledda tillverkningen av Hyundai, Toyota och Honda.



Figur 8: Presenterade fordonstyper per år

I Figur 9 visas utvecklingen över tid när det gäller drivlinorna. Det är svårt att urskilja något tydligt mönster mer än att de båda udda koncepten presenterades i den första periodhalvan. Återigen är det viktigt att notera att räknas antalet tillverkade fordon skulle FC hybrid dominera ännu mer.

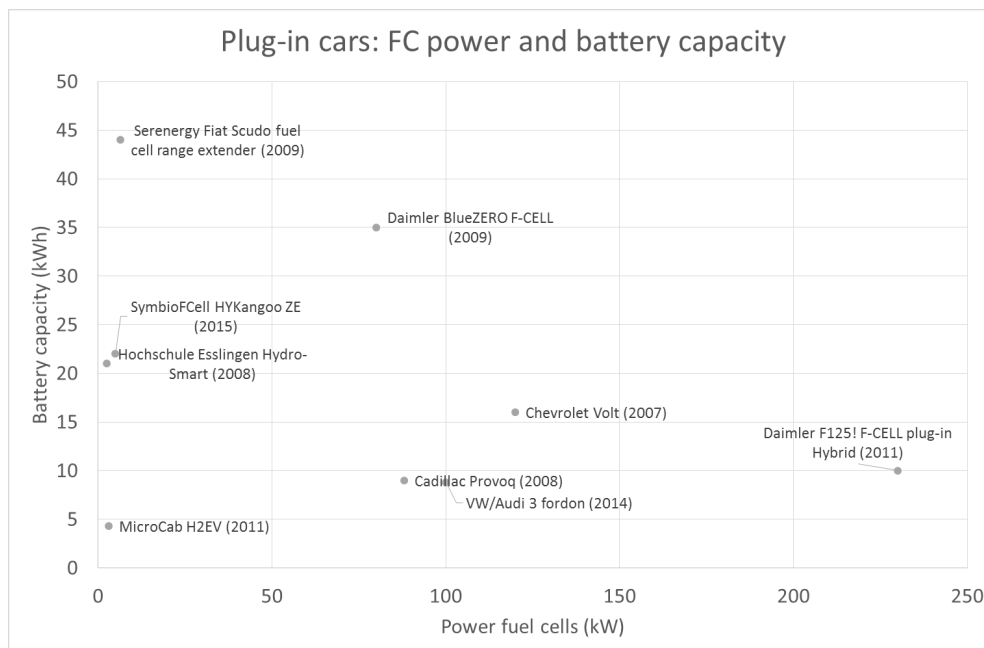


Figur 9: Presenterade drivlinetyper per år

### 3.4 TEKNISKA AVVÄGNINGAR

Laddbara bilar (FC plugin och FC REX) har olika konfigurering vilket framgår av mappningen i Figur 10. På den ena axeln visas batteristorleken (i kWh) och på den andra bränslecellernas storlek (i kW). Daimler står för två av extremfallen medan Volkswagen och GM (Cadillac) kanske kan sägas representera normalfallet med en stack på cirka 100 kW och ett batteripaket om cirka 10 kWh. Nära y-axeln återfinns typiska range extender lösningar.

Det enda fordonet som tillverkas i större antal är SymbioFCCell HYKangoo ZE, vilket är en batteriversion av Renault Kangoo skåp med räckviddsförlängare monterad av SymbioFCCell. Inom ramen för EU-projektet H2ME ska 125 sådana fordon levereras (och 200 bränslecells-bilar från Daimler och Hyundai).



Figur 10: Laddbara lätta fordon - effekt och energi

## 4 Diskussion av marknadsanalysen

I föregående två kapitel redovisas utvecklingen på marknaden och vilka fordon med bränsleceller som hittills har presenterats. Nedan adresseras mot denna bakgrund och en del kompletterade material huvudfrågorna i projektets del 1.

### 4.1 VILKA SYSTEMKONFIGURATIONER MED BRÄNSLECELLER DISKUTERAS IDAG?

Databasen och mappningen av de presenterade fordonen uppvisar en imponerande mångfald i valda drivlinekoncept. Någon tydlig trend över tiden är svår att identifiera. En viktig bidragande faktor till spridningen och därmed svårigheterna att identifiera vinnande koncept är att många fordon just är konceptfordon. Konceptfordon görs ofta med ambitionen att visa på tillverkarens eller integratörens tekniska kapacitet och testa marknadens reaktioner och därför väljs gärna extrema lösningar. Tillverkningskostnaden är sällan styrande för teknikvalen.

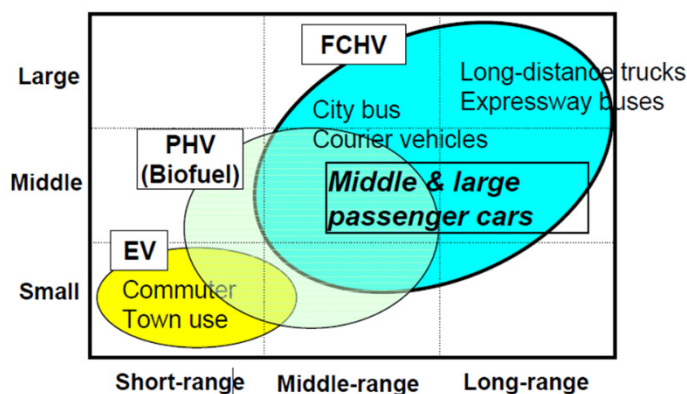
Relativt många fordon är presenterade av aktörer som inte själva har kapacitet att bygga bränsleceller. Dessa måste således köpa stackar och marknaden för stackar lämpliga för fordonsinstallationer har varit begränsad. Dessutom har kostnaden varit hög. Det kan motivera att små stackar har varit relativt populära.

Räknas antalet tillverkade fordon eller antalet avverkade fordonskilometer finns det ett i takt med att produktionen ökar klart ledande drivlinekoncept och det är ej laddbara bränslecellshybrider. Detta gäller både för personbilar och bussar. För lastfordon är antalet presenterade fordon litet men bland dessa fordon verkar range extender lösningar än så länge dominera.

Sammantaget visar genomgången att tyngdpunkten i de drivlinekoncept som har presenterats ligger på ej laddbara hybridlösningar. Detta gäller i synnerhet för fordon från de stora OEMerna och för fordon som tillverkas i litet större antal. Samtidigt bör det noteras att det fortfarande är öppet för olika drivlinekoncept och att det således är för tidigt att utropa en vinnare. Det kan också vara så att det finns olika nischer där olika drivlinekoncept med bränsleceller passar mer eller mindre bra. Mer om det längre fram i denna rapport.

### 4.2 VILKA TILLÄMPNINGAR/ SEGMENT/ FORDONSTYPER GÄLLER FÖR RESPEKTIVE TEKNIKVAL?

Biltillverkarna brukar positionera fordonstyperna enligt Figur 11, dvs. att bränslecellsfordon blir alltmer aktuella ju större fordonen är och ju längre man tänker köra. I detta fall positioneras laddhybrider (PHV) i en mellanzon och batterifordon som mindre bilar för stadsbruk.



Figur 11: Indelning av fordonstillämpningar (Toyota 2009)

En dylik indelning torde både söka beakta kostnaden för bilägandet och miljöpåverkan av transporterna. Fast i detta exempel är lösningarna koldioxidneutrala (förutsatt att el och vätgas produceras på rätt sätt), dock finns det lokala utsläpp från laddhybriderna när de kör förbränningsmotorn.

Formerna för bilägande har betydelse för fordonsvalet. Om allt fler väljer att inte äga någon egen bil ökar möjligheterna för små fordon att komma till användning. Men om det lilla fordonet för kortare stadstransporter drivs med batterier eller bränsleceller borde i första hand vara en kostnadsfråga. Mer om det i andra delen av rapporten.

För de som äger fordonet själva finns dilemmat att bilen lämpligen ska klara nästan alla typer av transportbehov, vilket leder till att den ofta är överdimensionerad för merparten av resorna. Praktikaliteter som var fordonet kan tankas eller laddas spelar också en roll. Sverige har enligt SCB drygt fyra miljoner boenden, varav 2,4 miljoner är i flerbostadshus och resten i småhus. Med urbanisering torde flerbostadshusen öka och att alla boende i flerbostadshus ska ha tillgång till en egen parkeringsplats med eluttag är inte så enkelt. I det avseendet är tankning av vätgas enklare då det fungerar mycket snarligt som dagens tankstationer för flytande drivmedel.

Sverige har enligt SCB 4,7 miljoner personbilar i trafik och ytterligare nära 1,2 miljoner avställda, dvs. drygt ett fordon per hushåll. De hushåll som har mer än en bil torde oftare bo i småhus och därmed ha tillgång till både parkering och eluttag. För denna kundkategori som har råd med en andrabil är batteribilar (allt annat lika) praktiska då man slipper köra till tankstationen. I fallet att man nöjer sig med en bil kan den vara en laddhybrid. Det är troligt att den absoluta merparten av de laddhybrider som hittills sålts till privatkunder i Sverige har sin hemvist vid något småhus.

#### 4.3 HUR POSITIONERAS OLIKA FORMER AV ELDRIVNA FORDON PÅ MARKNADEN?

Givet diskussionen i föregående avsnitt så bör det noteras att positioneringen av fordon med eldrift har förändrats över tiden. I Sverige och Europa var batteribilar på nittioalet i princip synonymt med relativt små bilar från franska eller möjligen italienska tillverkare. Den relativt omfattande verksamheten med batterifordon i Sverige bidrog till en bild av batteribilar som en inte helt mogen teknik för små nischer. I USA och Japan var batteribilarna större och starkare med GMs EV1 som ett intressant exempel på en föregångare till Tesla i nischen högprestandabilar.

När intresset för batteribilar svalnade kring millennieskiftet flyttades fokus för policy-makers till bränslecellsfordon, som inte minst Daimler hävdade skulle vara färdiga för massmarknaden år 2004. Batteribilar kom då att handla ännu mer om nisch tillämpningar som neighborhood vehicles och tvåhjulringar. Och i Sverige blev etanol/E85 mycket aktuellt. Till en del policy-makers förtret smög samtidigt hybridbilarna ut på vägarna. Toyota Prius introducerades i Japan 1997 och följdes av en rad andra hybrider från japanska tillverkare och så småningom även från tillverkare i andra delar av världen.

Hybridbilarna började sitt intåg på marknaden i normalstora och inte särskilt lyxiga bilmodeller som Prius och Honda Civic. Efterhand och inte minst när icke-japanska tillverkare gav sig in i leken kom hybridlösningar att främst användas i de lyxigare segmenten. Detta måhända eftersom det var svårt för tillverkarna att få fram konkurrenskraftiga hybrider i de kostnadspressade småbilssegmenten. Toyota har dock låtit hybriddrivlinor sprida sig både uppåt i segmenten till kraftfulla Lexusmodeller och nedåt i segmenten till relativt små bilar som Yaris och Auris.

Nissan (och Renault) återintroducerade batteribilen med sin Leaf och den är liksom Prius positionerad i ett brett marknadssegment. Batteridrivna konkurrenter till Leaf var ofta mindre och således mer tydligt positionerade för stadstrafik. Teslas starka, snabba och dyra batteribil med hyfsad räckvidd per laddning och en del innovativa lösningar utöver drivlinan har fått ett stort gensvar på marknaden och bidragit ordentligt till att höja imagen för batteribilar. När företaget i början av 2016 öppnade för beställningar av en ny billigare batteribil Model 3, så uppges 400 000 beställningar inklusive handpeng ha kommit in i princip omgående.

Bränslecellsbilar har i flera fall varit existerande SUV-modeller som Toyota RAV 4 eller Hyundai ix35 som försetts med bränslecellsdrivlina. Den första dedicerade bränslecellsbilen som tillverkades i litet större antal var Honda Clarity generation 2008. Ett par andra modeller, GMs Chevy Volt och Mercedes A-klass och B-klass, är också designade från start för att kunna härbärgera bränsleceller och vätgastankar eller stora batterier.

Hyundais bränslecellsbil är fortfarande en SUV som även finns med andra drivlinor. Toyota och Honda har valt att göra specifika modeller för bränslecellsdrift. Dessa är likt de japanska biltillverkarnas introduktion av hybridfordon positionerade i ett brett fordonsegment med en potentiellt mycket stor marknadsvolym. Dock torde priserna, som är klart högre än motsvarande förbränningsmotorbil, och den än så länge mycket glesa förekomsten av tankstationer för vätgas, begränsa möjligheterna att sälja mycket stora volymer.

Möjligheterna för bilköparen att med dagens prisläge räkna hem en investering i en bränslecellsbil utan hänsyn tagen till andra aspekter än kostnad för fordon och drivmedel torde vara små. Kunderna är således i första hand och helt naturligt early adopters, vilka tycker det är värt en slant att använda ny teknik. I jämförelse med batteribilar bör bränslecellsbilar kunna åtnjuta en större kundgrupp eftersom tekniken inte innebär några egentliga begränsningar eller försämringar jämfört med konventionell framdrivning. Detta givetvis under förutsättning att tankstationer finns i tillräcklig utsträckning.

Det torde också vara naturligt att bränslecellsbilar likt laddhybrider och Tesla i första hand lanseras i relativt lyxiga modeller med höga prestanda först. För de tre modeller som nu är på marknaden gäller dock inte riktigt detta. Utöver att möjligheterna att ta betalt för fordonen är bättre i premiumsegmenten och köparna sannolikt inledningsvis inte tillhör de mer priskänsliga bör bränslecellsfordonen rent tekniskt vara ganska lätta



att konstruera med goda prestanda. Dessutom är det troligt att olika slags subventioner kommer att vara tillgängliga under en period framöver.

#### 4.4 HUR SKILJER SIG LÖSNINGARNA MELLAN PERSONBILAR OCH TYNGRE FORDON, EXEMPELVIS STADSBUSSAR?

I nuläget går det i princip bara att jämföra lösningarna mellan personbilar och stadsbussar, eftersom övriga fordonstyper knappt förekommer med bränslecellsdrift. Dock bör det noteras att bränsleceller som APU har ägnats en hel del uppmärksamhet eftersom elförsörjning av tunga lastbilar när de står still är en utmaning. En annan aspekt som inte direkt har med drivlinan att göra som gäller för de båda japanska fordonen är att de erbjuder möjlighet att koppla till en extern enhet som gör att bilarna kan leverera betydande elektrisk effekt och energi, exempelvis för bruk i katastrofsituationer. Huruvida detta är av intresse utanför Japan återstår att se.

I denna jämförelse har fordon av modell liten skåpbil hanterats tillsammans med personbilar. Detta eftersom kraven på drivlinan i flera avseenden är lika. Dock finns det skillnader. Exempelvis är en vanlig tillämpning för dylika fordon att utgöra en rullande verktygslåda. Kraven på räckvidd är måttliga eftersom fordonet ofta rör sig i ett mindre område. Dock finns krav på lastförmåga, kanske primärt viktmässigt, så att alla verktyg kan tas med.

Den Renault Kangoo i elversion som finns med en liten bränslecellsstack som räckviddsförlängare erbjuder en förlängd räckvidd utan att inkräkta så mycket på lastkapaciteten. Givetvis finns det behov av denna typ av fordon men det upplevs som en ganska begränsad nisch att arbeta med.

Två varianter av stadsbussar med bränslecellsdrift dominerar marknaden. Båda har en hybriddrivlina på samma sätt som personbilarna på marknaden. Den ena varianten har bränsleceller från personbilar, vanligen två stycken stackar. Sådana bussar finns exempelvis från Daimler/Evobus, Toyota/Hino och Hyundai. Den andra varianten har bränsleceller från en extern tillverkare, vanligen Ballard. Ballard har de senaste åren redovisat en ganska omfattande lista av beställningar på bränslecellssystem till bussar i många olika länder, inte minst Kina. Ballards koncept är modulärt och därmed anpassningsbart till olika effektbehov från respektive busstillverkare.

I en omfattande genomgång av framtiden för bränslecellsbussar konstateras att kostnaden för bussarna har reducerats med 75 procent redan men att ytterligare kostnadsreduktioner krävs:

“Future FC bus costs will depend on the technology pathway followed. In a technology pathway that seizes synergies with the FC passenger car market overall FC bus deployment costs can reduce fairly quickly with a volume uptake of FC cars. In this case, costs could be on par with diesel buses within the next decade.”<sup>5</sup>

Denna rapport uppfattas som en partsinlaga men det är en omfattande koalition av 83 intressenter som står bakom den. En av dessa är Ballard, som förmodligen inte tycker att citatet ovan känns så bra med tanke på att företaget inte levererar till personbilsindustrin. Nu samarbetar dock Ballard med Volkswagengruppen.

<sup>5</sup> Roland Berger (2015) Fuel Cell Electric Buses – Potential for Sustainable Public Transport in Europe (s 5)

Rent tekniskt så ska en buss hålla för betydligt fler driftstimmar än en bil. Det gör att bränslecellerna bör konstrueras eller användas annorlunda. Ett sätt att förlänga livslängden är att använda mer katalysatormaterial. Med hjälp av större batterier kan man också tänka sig att den dynamiska belastningen på bussarnas bränsleceller kan minskas, vilket i sin tur reducerar slitaget. Daimlers buss har relativt stora batterier och Solaris har ett riktigt stort batteripaket men så är drivlinan också av typen range extender.

I USDOEs analys genomförd av Strategic Analysis inkluderas i 2012 Update bränslecellssystem för bussar i analysen. De antas använda två bilstackar och högre mängd katalysator för att få bättre livslängd men i många avseenden är systemen mycket lika. Ytterligare viktig skillnad är produktionsvolymen, man räknar med en årsvolym om 1 000 bussar. Av dessa skäl landar kostnaden per kW för bränslecellssystemet för buss-tillämpningar ungefär fyra gånger högre än motsvarande bedömda kostnad för personbilar.<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> James B D & Spisak A B (2012) Mass Production Cost Estimation of Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2012 Update, Strategic Analysis, October 18 2012.

## 5 Vilka drivlinor passar till vilka tillämpningar?

Denna del av rapporten beskriver analysen av bränslecellsdrivlinor för olika fordons-tillämpningar, och dess antagande och modeller. Den bygger på modellering av kostnader för olika drivlinor och hur de varierar med hur fordonen används.

### 5.1 FÖRUTSÄTTNINGAR OCH ANTAGANDEN

I denna analys har vi begränsat oss till att analysera ett fåtal olika drivlinetyper, och eftersom huvudfokus är att jämföra bränslecellsdrivlinan med batteridrivlinan så har vi valt att alla de olika elektriska drivlinorna är lika avseende drivmotor. De utgår alla från en drivlina med en elmotor som enda drivkälla, och därmed ingår inte eventuella parallellhybrider. Orsaken till detta är att parallellhybrider ofta har en relativt klen dimensionering på sin elektriska drivlina, och därmed så kan de inte jämföras prestandamässigt med t.ex. en bränslecellhybrid.

För att beräkna kostnaderna behövs ett flertal antaganden om priser och verkningsgrader. Eftersom projektet inte har haft tid att göra en komplett litteraturstudie för att grunda dessa antaganden på så har vi utnyttjat deltagarnas tidigare erfarenheter och baserat antagandena på en samlad bedömning av de pris och verkningsgraduppskattningar som deltagarna haft kunskap om sedan tidigare projekt. Det gör att det inte finns enskilda referenser angivna för dessa värden. På grund av detta är fokus i analysen inte att visa på exakta resultat utan på att främst göra kvalitativa resonemang om vilka mekanismer som verkar fälla avgörandet vid kostnadsjämförelserna.

Kostnadsmodellerna är linjära, med en fast startkostnad. Detta kan verka vara en grov förenkling, men visar sig för det mesta fånga variationen i pris med relativt bra noggrannhet så länge man inte ändrar storlek avsevärt. Väl värt att notera är dessutom att det finns många andra viktiga osäkerheter i kostnader, som ofta leder till större osäkerheter vid konceptjämförelser än den linjära kostnadsmodellen. I slutsatserna så tas det även hänsyn till osäkerheterna, och de viktigaste slutsatserna bedöms inte påverkas av mindre fel i kostnadsmodellerna, utan bygger på mer fundamentala skillnader i vad som driver kostnad för de olika typerna av drivlina.

Vid de ekonomiska beräkningarna av totalkostnad (TCO) så har räntan satts till noll, så att driftskostnaderna bara kan summeras för alla åren under fordonets ekonomiska livslängd. Det kan synas vara ett stort fel, och kan vid högre ränta leda till viss skillnad från då man räknar med effekten av räntan. Det finns dock ett viktigt skäl att göra så, och det är att man då inte behöver ta hänsyn till om ett fordon kör många mil på få år eller lika många mil fast under många fler år. Det gör att man kan jämföra mycket olika typer av fordonsanvändning på ett mycket enklare sätt. Det går alltså lättare att hitta principiella likheter mellan till synes mycket olika användning, tack vare detta. Vi får helt enkelt en parameter mindre vid jämförelsen av olika fordonsanvändning, till priset av att vi tar bort räntans inflytande på totalkostnaden. Med denna förenkling så är livslängd inte längre en parameter i jämförelsen, utan bara total mängden energi förbrukad under fordonets livslängd. Detta är viktigt för den förenklingen möjliggör att se hur olika fordonsnischer förhåller sig till varandra och se likheter som annars kanske är svåra att upptäcka.

En annan viktig avgränsning är att infrastrukturkostnad för bränsledistribution eller laddning inte tas med direkt. Bränsleinfrastrukturens kostnad är inbakad i vätgaskostnaden, och till viss del i elpriset. Långsamladdare till elfordon är inte någon stor kostnad och antas ingå i fordonskostnaden, medan kostnad för publika nät av laddare och snabbaddare inte är inkluderade i denna analys.

#### 5.1.1 Verkningsgradsmodell

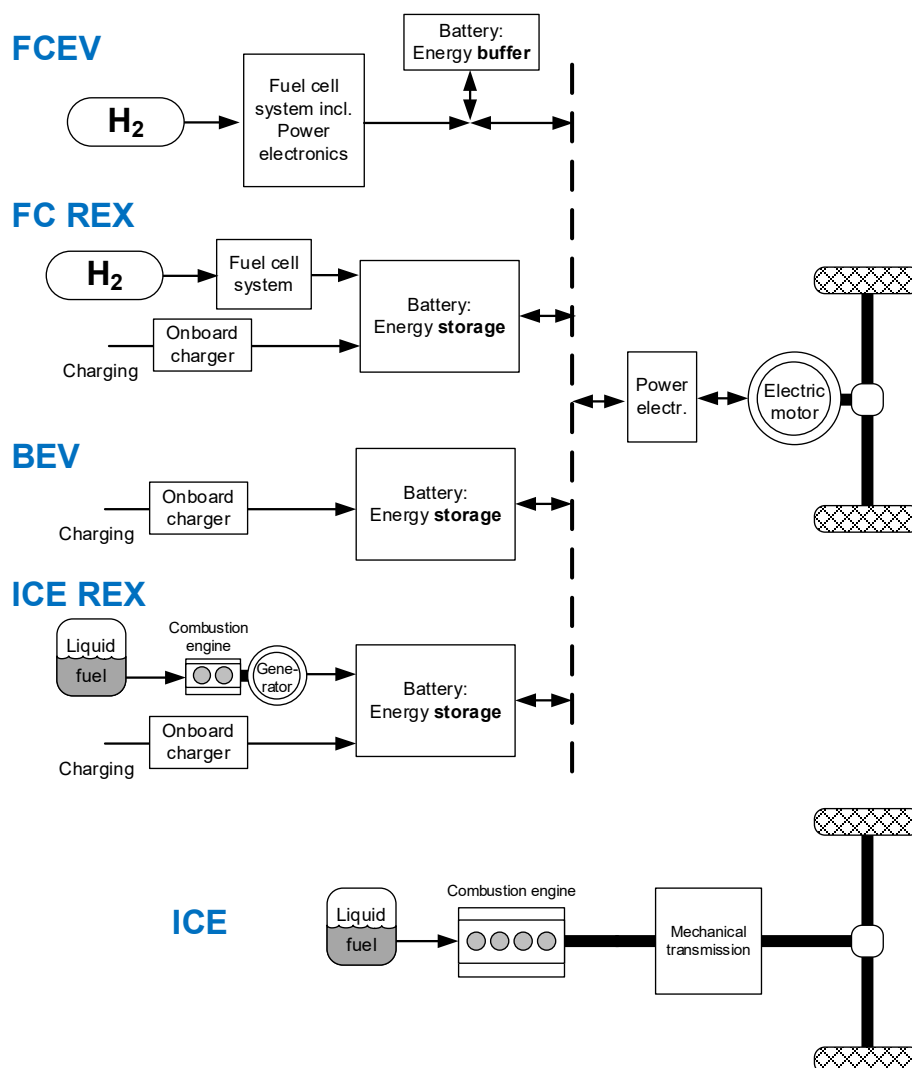
Vid beräkning av bränsleåtgång och elförbrukning så antas konstanta verkningsgrader som skall spegla typiska användningsprofiler. Dessa kan alltid diskuteras och kan skilja sig åt mellan olika motorer och olika bränsleceller. Användningen av verkningsgraderna är bara för att beräkna driftskostnader och de kommer alltså att räknas ihop med bränslepriserna för att få en driftskostnad per kilometer. Den osäkerhet som finns i verkningsgraderna kommer att kombineras med osäkerheten i framtida bränslepriser och elpriser och det kommer alltså att bidra till ökad osäkerheten i driftskostnaderna, men den stora osäkerheten i detta är fortfarande bränsle och elpriserna. Därför har vi inte ansett det motiverat att göra någon speciell analys av effekten av fel i verkningsgraderna. De använda medelverkningsgraderna för de olika energiomvandlarna visas i tabell 5.1. Observera att de gäller för hela delsystemet, inklusive t.ex. kraftelektronik, och inte bara för bränslecellsstacken eller elmotorn. Verkningsgraderna i tabell 5.1 gäller typiskt för komponenter med effekter i 100 kW klassen, förutom bensindriven räckviddsförlängare som antas vara på ca 35 kW.

**Tabell 5.1 Komponenternas genomsnittsverkningsgrader**

Komponent	Genomsnittsverkningsgrad	Kommentar
Batteri (kombinerad)	85 %	Laddare, laddning och urladdning
Elektrisk drivmotor	90 %	Inkl. kraftelektroniken
Bränslecellssystemet	50 %	Inkl. hjälpsystem och kraftelektronik
Dieselmotor, mildhybrid	30 %	Inkl. transmission
Bensindriven räckviddsförlängare	25 %	Inkl. generator och likriktning

#### 5.1.2 Undersökta drivlinor

De olika jämförda drivlinekonfigurationerna visas i Figur 5.1. Som man ser har alla de elektriska drivlinorna samma drivmotor, och skillnaderna behöver bara modelleras fram till och med drivmotorn, för att få med skillnader i t.ex. verkningsgrad. Förbränningsmotordrivlinan antas vara en mildhybrid eftersom det bedöms snart vara standardlösningen för förbränningsmotorer pga allt striktare lagkrav på koldioxidutsläpp per kilometer.



Figur 5.1 De jämförda drivlinetyperna

## 5.2 KOSTNADSMODELLER

### 5.2.1 Komponentkostnader

I tabell 5.2 nedan visas de komponentkostnader som antagits i analysen.

Tabell 5.2 Kostnadparametrar för komponenterna

	Marginalkostnad för ökad effekt	Marginalkostnad för lagrad energi (avgör max räckvidd)
Förbränningsmotor (diesel mildhybrid)	15 USD/kW **	0.4 USD/kWh
Bränslecell + Elektriska drivmotorn	40 + 35 USD/kW	18 USD/kWh*
Batteri + elektriska drivmotorn	0 + 35 USD/kW för ett stort batteri som är energidimensionerat 40 + 35 USD/kW för ett litet batteri som är effektdimensionerat	250 USD/kWh* för ett energioptimerat batteri  500 USD/kWh* för ett effektoptimerat batteri

\*) kWh som kan levereras till drivmotorn, efter förluster. Detta är alltså mindre än den energi som är lagrad i batteriet eller vätgastanken.

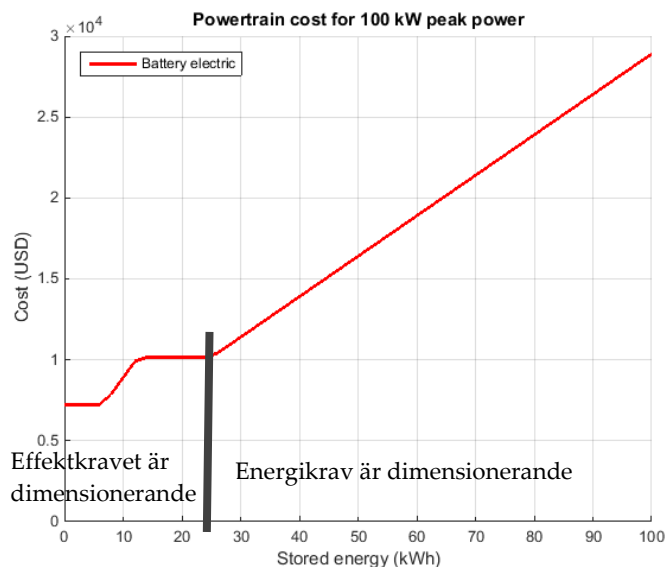
\*\*) 1 kW från en förbränningsmotor har i praktiken lite mindre värde än 1 kW från en elmotor, p.g.a. att den inte ger riktigt lika hög prestanda i praktiken.

Notera att effektoptimerade batterier i denna analys kostar ungefär lika mycket per kW som en bränslecell. Fram tills nu har de flesta bränslecells-bilar som presenterats haft en hög effekt på bränslecellsstacken, och att litet hybridbatteri. Skulle batteripriset falla mer än bränslecellspriserna så blir batterier ett billigare sätt att erbjuda hög toppeffekt än att ha hög effekt på bränslecellen. Om det blir så kommer toppeffekten på bränslecellen troligen att minska kraftigt, för att dimensioneras i huvudsak efter den högsta medeleffekt som fordonet kan kräva, medan hög toppeffekt för att erbjuda bra acceleration troligen kommer att levereras av batteriet, som då kan komma att få högre effekt än vad det haft på typiska bränslecells-bilar hittills.

### 5.2.2 Drivlinans pris för olika prestanda

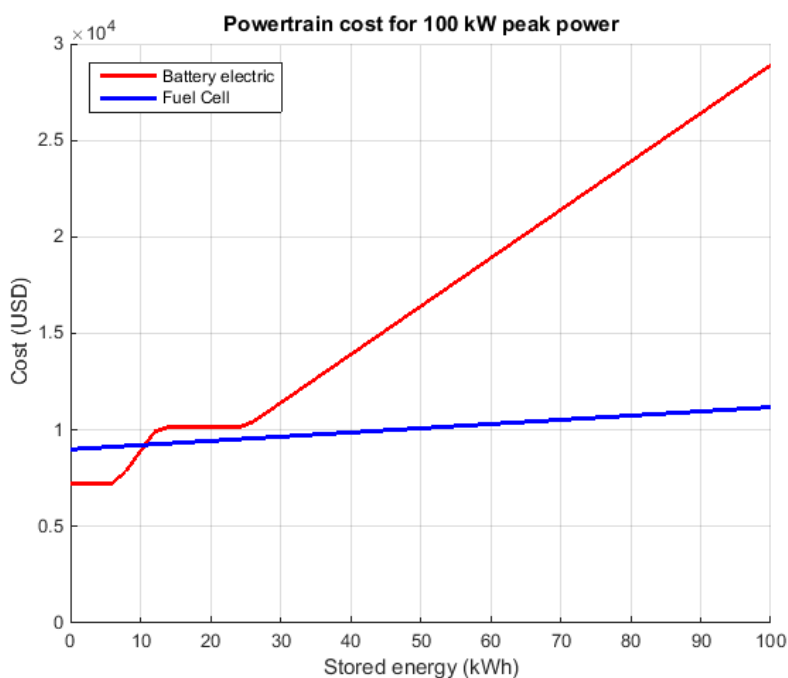
Batteridrivlinans pris bestäms av energikravet på batteriet, men i fallet då det inte krävs lång körsträcka så kan kravet på energiinnehåll i batteriet bli så litet så att det istället är effektkravet för att kunna driva fordonet som avgör hur litet batteri man kan använda. I de fallen så är det drivmotorns effekt som kommer avgöra batterikostnaden, och inte behovet av energi för att uppnå önskad körsträcka. I Figur 5.2 så framgår hur priset varierar med olika mängd lagrad energi, för en drivlina som har maxeffekten 100 kW. Plåtarna vid låga energikrav kommer sig av att kostnadsmodellen har två olika typer av batterier att välja från, och väljer den billigaste i alla lägen. Vid riktigt låga krav på energi, mindre än 7 kWh så väljer modellen effektoptimerade batterier och de blir dimensionerade av effektkravet så energimängden kan aldrig gå under 7 kWh. Från en lagrad energi mellan ca 7-13 kWh så väljer modellen fortfarande effektoptimerade batterier, men det blir energikravet som blir dimensionerande. Mellan 13-25 kWh är energioptimerade batterier billigast, men de måste överdimensioneras för att tåla effektkravet. Över 25 kWh storlek så väljs energioptimerade batterier, och de dimensioneras då av energikravet.

Alla dessa gränser varierar så klart med effektkravet på drivlinan. Dock är det intressant att notera att tidiga elbilar, som första generationens Nissan Leaf, hade en batteristorlek på 24 kWh, vilket verkar stämma väl med hur små man kan göra batterierna innan effektkravet blir dimensionerande!



Figur 5.2 Kostnad för batterielbils drivlina om effektkravet är 100 kW

För att jämföra kostnaden för en batteridrivlina med en bränslecellsdrivlina så är kostnaden för en bränslecellsdrivlina är inritad i figur 5.3, tillsammans med kostnaden för batteridrivlinan. Man kan där se att kostnaden för bränslecellsdrivlinan är högre än batteridrivlinan om man kräver liten mängd lagrad energi ombord, d.v.s. kort körsträcka. Dock så kostar batteriet så pass mycket att, när man börjar kräva lite större energilagring ombord så blir bränslecellsdrivlinan billigare.

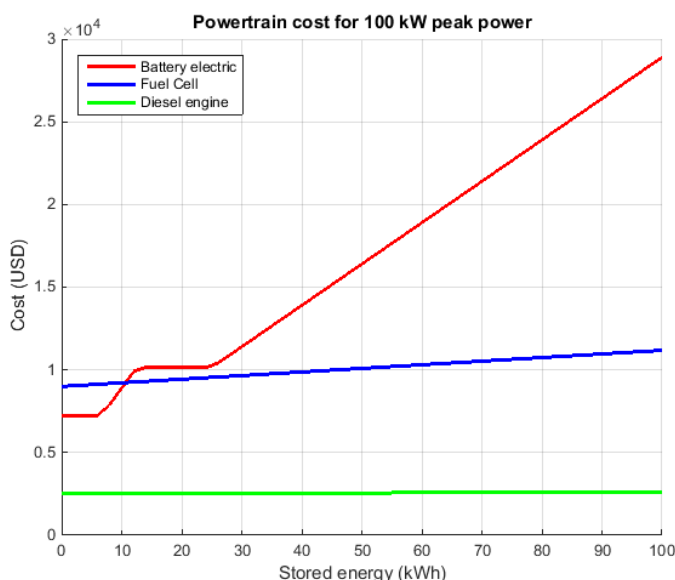


Figur 5.3 Kostnad för BEV drivlina jämfört med FCEV om effektkravet är 100 kW

Det finns en valfrihet i att antingen dimensionera bränslecellen så att den kan klara hela effekten, eller att bara dimensionera den för att klara den långsiktiga medeleffekten och istället använda ett batteri för att ge extraeffekt vid accelerationer, då bränslecellens maxeffekt inte räcker till.

Det visade sig att just med de kostnadsparametervärden vi kommit fram till så var det nästan kostnadsneutralt om man valde att höja effekten på bränslecellen eller istället valde ett större batteri för att ta hand om effekttopparna. Just det faktum att det verkade vara relativt neutralt från ett kostnadsperspektiv gjorde att vi inte analyserat skillnaderna mellan dess olika lösningar. Dock kan en ändring i kostnadsbalansen mellan batterier och bränsleceller att tippa över denna lösning åt ena eller andra hållet. För den som använder fordonet så spelar det dock inte någon stor roll vilken lösning som kommer användas. Dock kan faktumet att det inte kostar mycket mer att ha ett batteri för att ta hand om effekttopparna tala för att en lösning med ett mindre batteri kompletterat med bränslecells räckviddsförlängare kan vara attraktivt, för då utnyttjar man inte bara batteriet som en effekttopp utan kan även sänka driftskostnaderna genom att köra på el från elnätet en stor del av körsträckan.

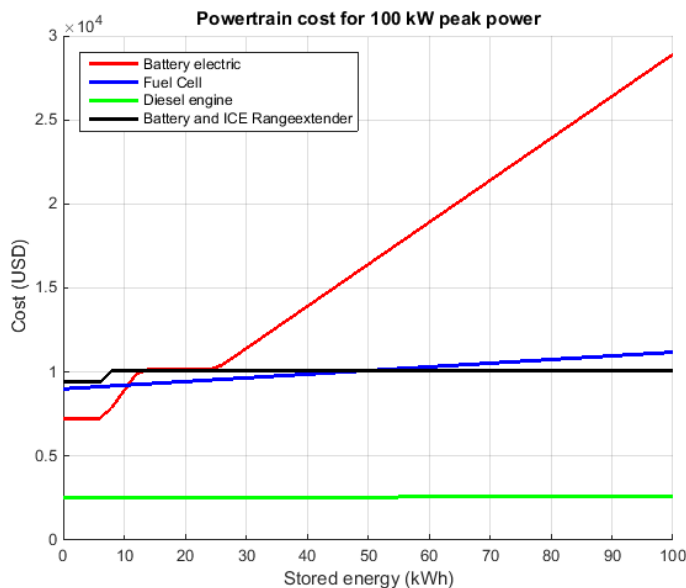
I figur 5.4 är dieselmotordrivlinans kostnad inlagd i samma diagram som de andra drivlinorna. Man ser att den är påtagligt billigare än batteri- eller bränslecellsdrivlinorna, och dessutom så är tanken så billig att man knappt kan se att kostnaderna ökar med högre krav på lagrad energi, det vill säga krav på större tank.



Figur 5.4 Kostnad för ICE, BEV och FCEV drivlinor om effektkravet är 100 kW

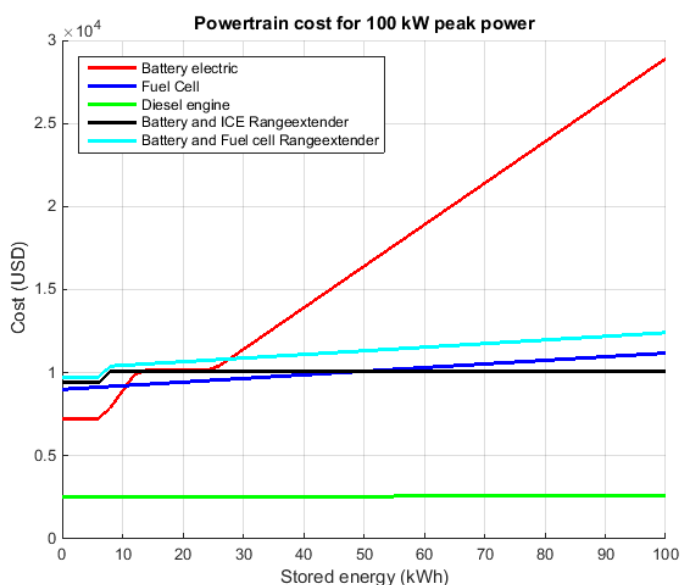
En batteridrivlina med bensinmotordriven räckviddsförlängare har kostnad som i figur 5.5. Där framgår att den så klart är dyrare än den rena batteridrivlinan vid liten energimängd i batteriet, eftersom den skall bekosta en räckviddsförlängare i tillägg till batteriet. När kravet på lagrad energi ökar så kommer dock drivlinan med räckviddsförlängare i stort sett sluta öka i kostnad när batteriet nått den storlek som anses nödvändigt i en batteribil med räckviddsförlängare.





Figur 5.5 Kostnad för ICE REX jämfört med alternativen för 100 kW toppeffekt på drivmotorn.

Om man istället undersöker kostnaden för en batterielbil med bränslecell som räckviddsförlängare så får man prisbilden i figur 5.6. Man kan se att bränslecell-räckviddsförlängare leder till lite högre kostnad än den förbränningsmotordrivna räckviddsförlängaren. Att skillnaden inte är större beror på att en lösning med förbränningsmotor måste ha en generator och kraftelektronik för räckviddsförlängaren, medan ett bränslecellssystem redan har allt som behövs för att fungera som räckviddsförlängare. Förutom den fördelen så kommer verkningsgraden att skilja sig åt mycket mellan dessa två olika räckviddsförlängare, till bränslecellens fördel. Dock ser man att bränslecellsbaserad räckviddsförlängare har en kostnad som ökar med ökande krav på räckvidd. Det beror på att gastankarna för vätgas är betydligt dyrare än en bränsletank för flytande bränsle.



Figur 5.6 Kostnad för FC REX jämfört med alternativen för 100 kW toppeffekt på drivmotorn.

Drivlinekostnaderna ovan gäller alla för en topp effekt på 100 kW, men de kan så klart beräknas för alla olika effekter på drivlinor och alla olika krav på lagrad energi. Kostnaderna för olika kombinationer av drivlineeffekt och lagrad energi kommer att visas i kapitel 5.3.

### 5.2.3 Bränslekostnader

För att förenkla analysen så räknas alla energier efter lagringen och energiomvandlaren så att priset per kWh blir jämförbart för de olika systemen. Det är alltså pris per nyttig kWh som presenteras nedan i tabell 5.3 och det är efter lagrings- och omvandlingsförluster.

Vi har valt att utesluta skatter ur priserna, för att bedömningen skall spegla långsiktiga kostnadseffekter ur ett samhällsperspektiv. Det är svårt att avgöra hur skatter kommer att utformas i framtiden, men vi har bedömt det som rimligt att anta att totala skatteuttaget på lång sikt skulle bli detsamma oavsett vilken teknisk lösning som väljs.

Elpriset har baserats på uppskattningar för elkostnaden i EU och USA, utan skatt. Det stämmer relativt väl med kostanden för produktion i dagens kolkraft, som är baskraft i många elnät. Notera dock att framtida elpriser kan komma att variera mycket beroende på bland annat hur snabbt solceller kommer att introduceras och hur deras pris sjunker framöver. Dock finns det skäl att tro att priset på el och vätgas är kopplade till varandra, eftersom vätgas kan produceras till stor del med el. Så variation i elpris kommer troligen leda till liknande variation i vätgaspris. Att biobränslena är så pass dyra beror på att vi antar att det kommer att råda konkurrens om dem och att begränsad tillgång kommer att driva pris, inte tillverkningskostnad.

Tabell 5.3 Kostnad för bränsle och el, samt motsvarande kostnad per kilometer

Drivlinetyp	Pris på bränsle/el	Pris på energi vid hjulen
BEV på el från nätet	0.085 USD/kWh	0.12 USD/kWh
ICE på diesel	0.7 USD/liter	0.22 USD/kWh
Bränslecell på vätgas	5 USD/kg	0.30 USD/kWh
ICE på biodiesel	1.4 USD/liter	0.44 USD/kWh
ICE på biobensin	1.4 USD/liter	0.60 USD/kWh

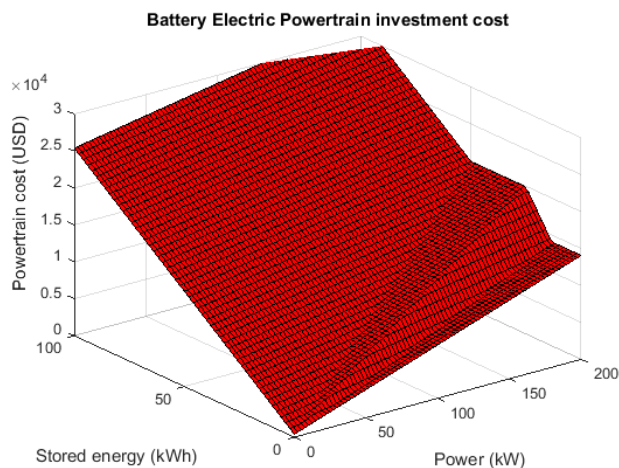
## 5.3 JÄMFÖRELSE AV KOSTNAD FÖR DRIVLINOR FÖR OLIKA KRAV

De olika drivlineteknologierna har mycket olika kostnader, och de varierar olika med hur lång körsträcka fordonet skall klara mellan tankningar eller laddningar. Därför är det intressant att börja med en jämförelse av bara investeringskostnader för olika drivlinor, eftersom den är viktig för att förklara vilken drivlina som är billigast för en viss fordonsanvändning.

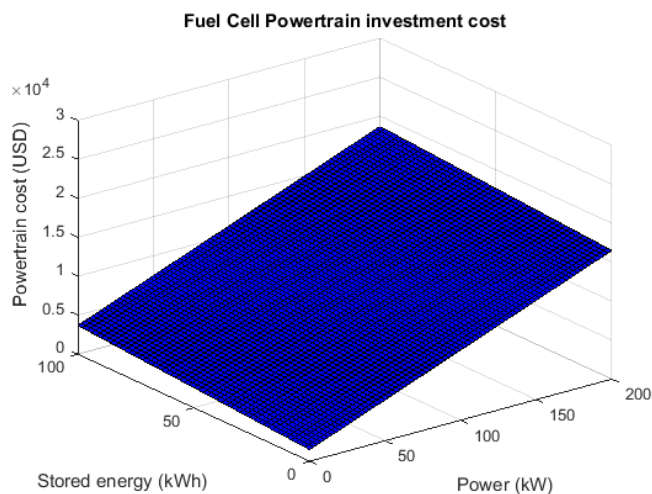
Batteridrivlinan består av en elmaskin med kraftelektronik samt ett batteri. Elmaskinens pris varierar i denna modell bara med effektkravet.

Batteriets kostnad varierar med typ av batteri, effekt- eller energi-optimerat, och med storlek uttryckt i kWh. Storleken varierar så klart med den energimängd som batteriet behöver leverera, men även med den maxeffekt batteriet skall kunna leverera. För att kunna leverera en viss effekt så finns det en minsta storlek som batteriet kan ha, i kWh, även om den energi batteriet skall kunna leverera är mindre än så.

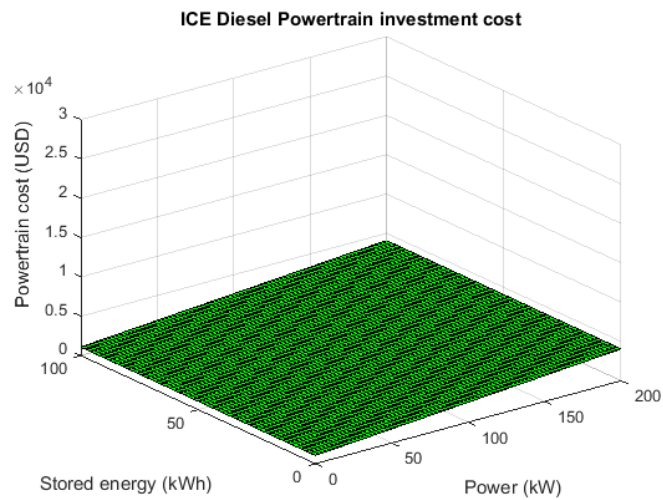
I avsnitt 5.2.2 visades kostnaden för en drivlina med 100 kW topp effekt då den lagrade mängden energi ombord varierades. Nedan så visas resultatet från samma kostnadsmodeller men med variation av både topp effekten på drivlinan och mängden energi som lagras ombord fordonet. I figur 5.7 till 5.11 så visas kostnaden för drivlinan med tank/batteri för olika topp effekter och mängd lagrad energi. Figurerna visar i tur och ordning kostnad för BEV, FCEV, ICE diesel, ICE REX och FC REX.



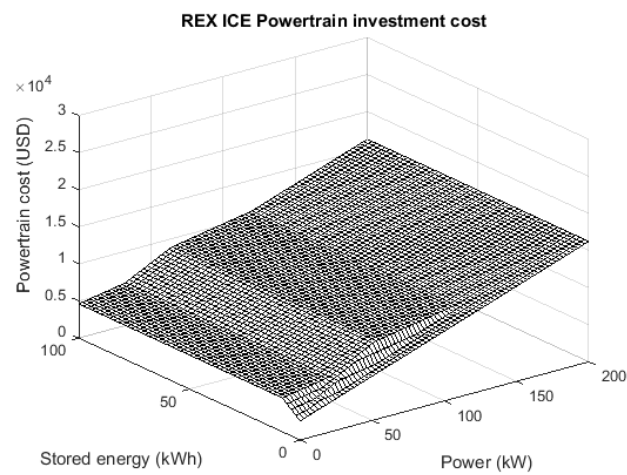
5.7 Kostnad för BEV-drivlinan vid olika topp effekt och olika mängd lagrad energi ombord



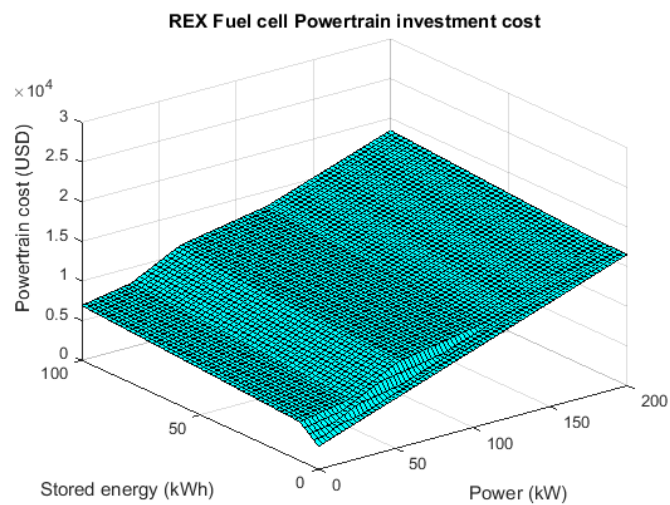
5.8 Kostnad för FCEV-drivlinan vid olika topp effekt och olika mängd lagrad energi ombord



5.9 Kostnad för ICE diesel-drivlinan vid olika topp effekt och olika mängd lagrad energi ombord

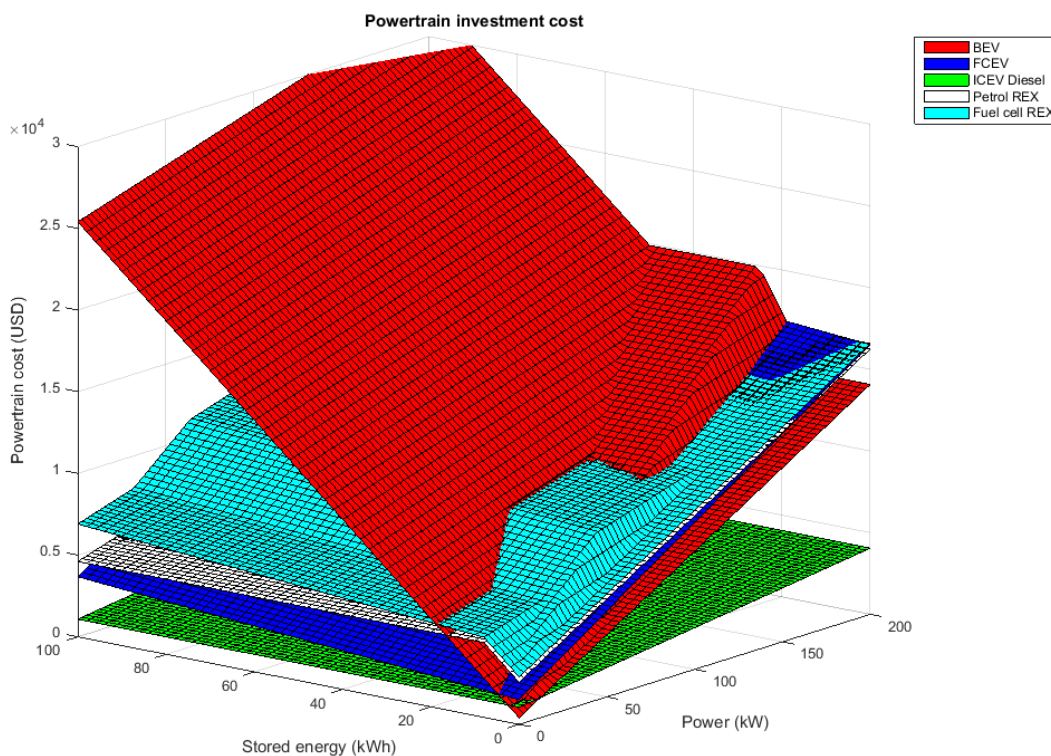


5.10 Kostnad för ICE REX drivlinan vid olika topp effekt och olika mängd lagrad energi ombord



5.11 Kostnad för FC REX drivlinan vid olika topp effekt och olika mängd lagrad energi ombord

För att se hur dess kostnader förhåller sig till varandra så har de lagts in i samma diagram i figur 5.12. Där kan man se att det är olika drivlinelösning som är billigast och dyrast beroende på vad för effekt och lagrad energi som krävs.



#### 5.12 Kostnad för de olika drivlinetyperna vid olika topp effekt och mängd lagrad energi ombord

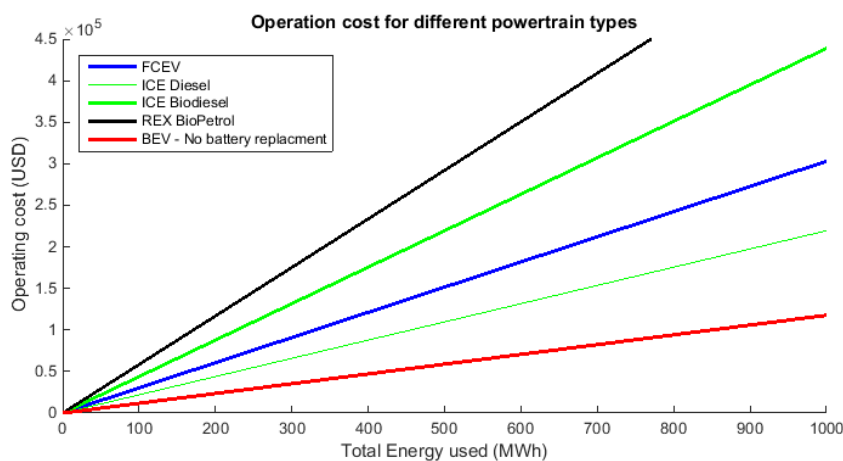
Dieselmotordrivlinan är billigast i investering för alla effekter och lagrad energi förutom vid mycket låg effekt och energi, på bara några enstaka kW och kWh (ett fall som inte är intressant för vanliga vägfordon).

Batteridrivlinan har en kostnadsbild som kraftigt skiljer sig från de andra genom att den framför allt blir mycket dyrare av att den skall lagra mer energi, att kräva hög effekt från en batteridrivlina är dyrt endast om den samtidigt har låg lagrad energi, det är bara då som effektkravet är kostnadsdrivande. Detta ser man på de två avsatser som syns i den röda kostnads-ytan i figur 5.7. De två avsatserna, där kostnaden inte varierar med energikravet, är situationer då batteristorlek bestäms av effektkravet istället för energikravet. Att det är två avsatser är för att den ena är då man väljer energioptimerade batterier och de är effektdimensionerade, och den andra då man väljer effektoptimerade batterier som är effektdimensionerade. När modellen väljer olika typer av batteri styrs den bara av vad som totalt sett blir billigast.

#### 5.4 JÄMFÖRELSE AV DRIFTKOSTNAD FÖR BRÄNSLE OCH EL

En lika viktig faktor som skillnaderna i kostnaderna för drivlinorna är skillnader i driftskostnader mellan de olika lösningarna. De skillnaderna beror i huvudsak på skillnader i bränslekostnad och skillnad i verkningsgrad mellan olika energiomvandlare.

Med de kostnadsantaganden vi gjort för bränslen och el, samt genomsnittsverkningsgraderna så kommer kostnaden för att köra på olika bränslen variera med den totala energin som används under fordonets livslängd. I figur 5.13 så visas hur bränsle- och elkostnaderna varierar som funktion av total energianvändning under livslängden, för de olika typerna av drivlinor. Det blir så klart linjära samband, eftersom bränslepriser och verkningsgrader är konstanta. I figuren ser man att det är stora skillnader i driftskostnader för olika typer av drivlinor och bränslen. El är klart billigast, därefter kommer diesel som är 1.8 gånger dyrare, bränslecell på vätgas 2.5 ggr dyrare, biodiesel 3.7 ggr dyrare och dyrast av alla är en förbränningsmotordriven räckviddsförlängare som går på biobensin, 5 ggr dyrare. Det är denna stora skillnad som gör att det alls kan löna sig att välja drivlinor som är flera gånger dyrare i inköp än den billiga förbränningsmotorn. Samtidigt så behövs det lång körsträcka, det vill säga mycket använd energi, för att tjäna igen en dyr drivlina, även om bränslet är mycket billigare. Därför kan man inte avgöra vad som är bästa lösningen genom att titta bara på inköpspris eller bara på bränslepris.

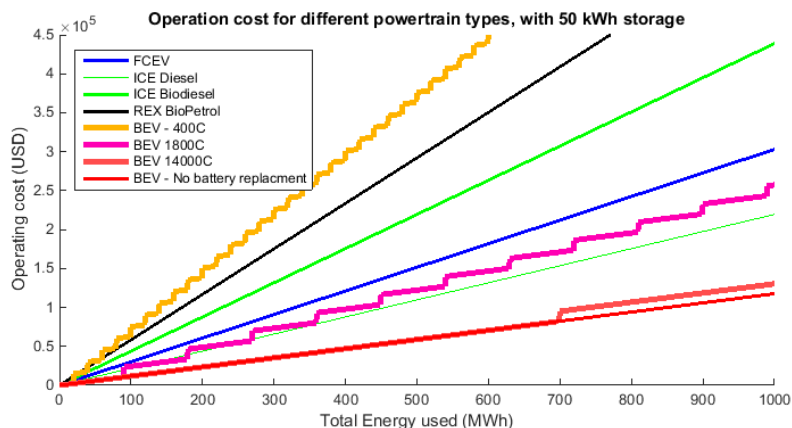


5.13 Kostnad för bränsle och el för de olika drivlinetyperna som funktion av energibehov under livslängden

För de flesta av drivlinorna så finns ingen annan kostnad som påverkas av förbrukad energimängd, men för batterielbilar så kan det krävas batteribyte som leder till ytterligare kostnader, utöver elkostnaden. I figur 5.13 så räknas kostnaden för batterifordon som om batteriet håller hela livslängden. Om man istället antar att batteriet måste bytas med jämna mellanrum, hur påverkas då kostnaden? Hur ofta batteriet måste bytas beror så klart på hur det används, och det är mycket olika för olika fordonstyper. Ett bra mått på hur snabbt ett batteri slits ut är att ange hur stor energi det har cyklat under sin livslängd, uttryckt i antal gånger batteriets fulla kapacitet.

För bilar där batteriet inte laddas mer än max en gång per dag, och det bara används till en liten del av sin fulla kapacitet de flesta dagarna, så kan batteriutnyttjandet ibland bli så lågt som 400C (400 gånger batteriets fulla kapacitet). Då måste batteribyten ske ofta (eller så förbrukar bilen inte så många kWh under sin livslängd). I Figur 5.14 så har det lagts till hur kostnaden för batteribyten skulle påverka driftkostnaden för batterifordon, om batteriutnyttjandet är 400C, 1800C eller 14000C. 400C motsvarar batteriutnyttjande i en bil som inte används så mycket, och oftast kör korta sträckor, 1800C är ett batteriutnyttjande som man kan få för en pendlingsbil som varje dag använder en stor del av sin batterikapacitet, 14000C gäller för en ändhållplatsladdad buss och är troligen en av de högsta batteriutnyttjandegraderna man kan uppnå i ett verkligt fordon. I

figur 5.14 ser man att vid 14000C utnyttjande så tillför kostnad för batteribyte inte mycket till elkostnaden. Vid 1800C utnyttjande så gör kostnaden för batteribyte att den effektiva driftskostnaden i stort sett dubblas, jämfört med kostnaden för bara elenergin. För ett batteriutnyttjande så lågt som 400C så är den effektiva driftskostnaden dyrast av alla de jämförda alternativen, ungefär 6 gånger så dyrt som elenergikostnaden. Med ett så lågt batteriutnyttjande så kommer driftskostnaden i stort sett bara vara kostnaden för batteriet. Å andra sidan så blir fordon med så lågt batteriutnyttjande så dyra att använda att andra drivlinor, eller en bilpool, kommer att vara attraktivare alternativ.



5.14 Kostnad för bränsle och el för de olika drivlinetyperna som funktion av energibehov under livslängden, med olika högt batteriutnyttjande för BEV.

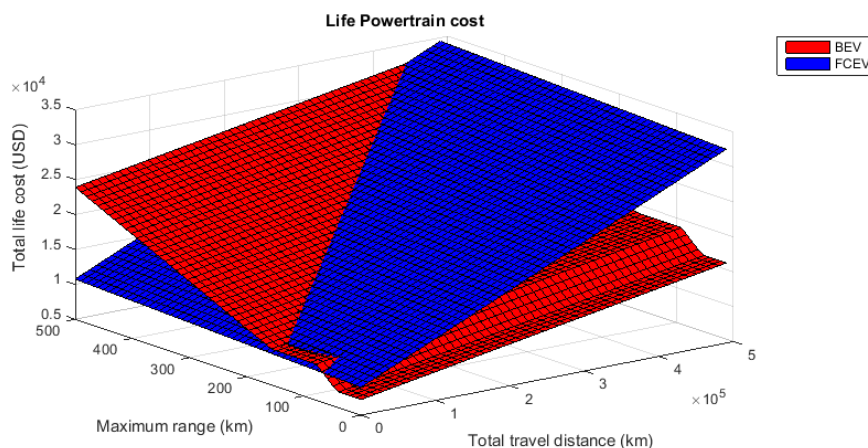
Det bör noteras att även andra drivlinor har begränsad livslängd och behov av utbyten eller reoveringar, vilka skulle kunna illustreras på motsvarande sätt. Som jämförelse så använder en personbil ca 15-30 MWh under sitt liv, en taxi ca 60 MWh och en buss ca 500 MWh.

## 5.5 JÄMFÖRELSE AV TCO FÖR OLIKA DRIVLINOR

Eftersom bränslepriser och kostnader för olika drivlinor skiljer sig åt så pass mycket så kommer det inte att finnas bara ett svar på vilken drivlinelösning som är billigast, utan det kommer att bero starkt på hur mycket lagrad energi det skall finnas ombord fordonet och hur mycket energi det kommer att förbruka under sin livslängd. I detta avsnitt så gör vi just en totalkostnadsjämförelse mellan de olika drivlinorna, för olika krav på fordonets räckvidd och olika körsträckor. I tidigare avsnitt så har vi hela tiden använt energimängd som lagras på fordonet och total energiförbrukning under livslängden som mått på olika lösningar. Det är de faktorerna som är kostnadsdrivande, men för att göra det lättare att tolka svaren så kommer vi i detta avsnitt att översätta lagrad energi ombord till en maximal körsträcka (på en "tank") och total energiförbrukningen översätts till en total körsträcka under livslängden. I och med denna översättning så kommer resultaten nedan att gälla bara fordon som drar 0.16 kWh/km (inklusive klimatanläggning m.m.) vilket gäller för typiska personbilar och t.ex. små skåpbilar. Fast jämförelserna kommer ge likadana resultat även för andra fordon, bara att värden uttryckt i kilometer kommer att skilja sig åt.

### 5.5.1 Drivlinejämförelse för olika fordonsnischer

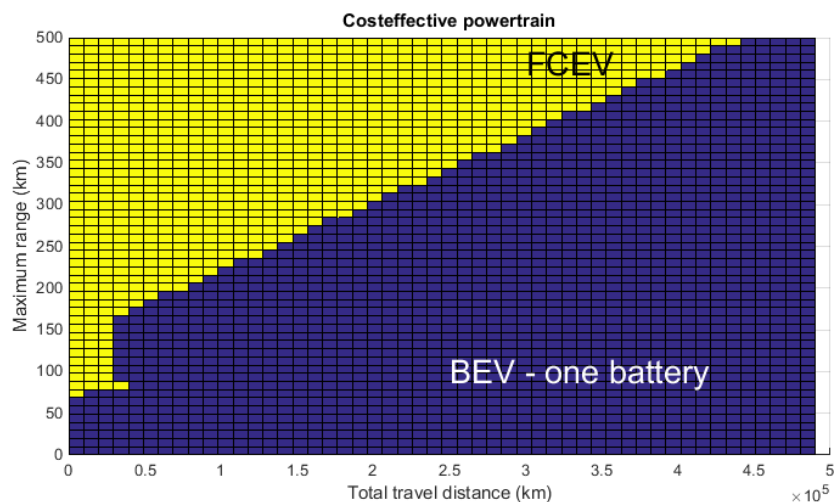
Vi börjar analysen av olika fordonsanvändningar, här kallat fordonsnisch, med en enkel jämförelse bara av BEV som inte behöver byta batteri under livslängden och en FCEV. För dem så räknar vi ut totalkostnaden under livslängden inklusive både kostnad för drivlina och kostnaden för "bränsle" under hela livslängden. Vi har tre olika saker som kan varieras för dessa fordon, topp effekt på drivlinan, maximal körsträcka på en "tank" och total körsträcka under fordonets livslängd. För att få en hanterligare jämförelse så låser vi topp effekten på drivlinan till 100 kW och varierar de andra två parametrarna. Då får vi totalkostnader som varierar med körsträcka per "tank" och total körsträcka som i figur 5.15. I figuren ser vi att det är stor skillnad på kostnaderna för BEV och FCEV. En mycket viktig faktor är att de två kostnadsfunktionerna lutar åt olika håll! Detta gör att det alltid kommer att finnas ställen där den ena är billigast samtidigt som den andra drivlinan är billigast för en annan typ av fordonsutnyttjande, under exakt samma förutsättningar. Grovt förenklat kan man säga att bränslecellsdrivlinans totalkostnad i huvudsak ökar med körd totalsträcka, medan batteridrivlinan har en mycket lägre kostnad kopplad till körd totalsträcka, medan den har en kostnad som starkt beror på maximal räckvidd på ett fulladdat batteri. Den stora skillnaden i hur kostnaderna varierar för dessa två drivlinetyper gör att vi kan ha stora fel i våra parametrar och ändå är det högst sannolikt att det finns användningssätt för fordon som är lämpliga för båda drivlinetyperna. Det är dock inte säkert att det är många fordon som verkligen körs på båda sätten, så därför kan det fortfarande bli en lösning som vinner en stor del av marknaden. Givet den kostnadsbild man ser i figur 5.15 så är det dock mycket troligt att både drivlinetyperna kommer finnas parallellt.



**5.15** Totalkostnad för olika drivlinealternativ under hela fordonets livslängd som funktion av max körsträcka per "tank" och total körsträcka under livslängd.

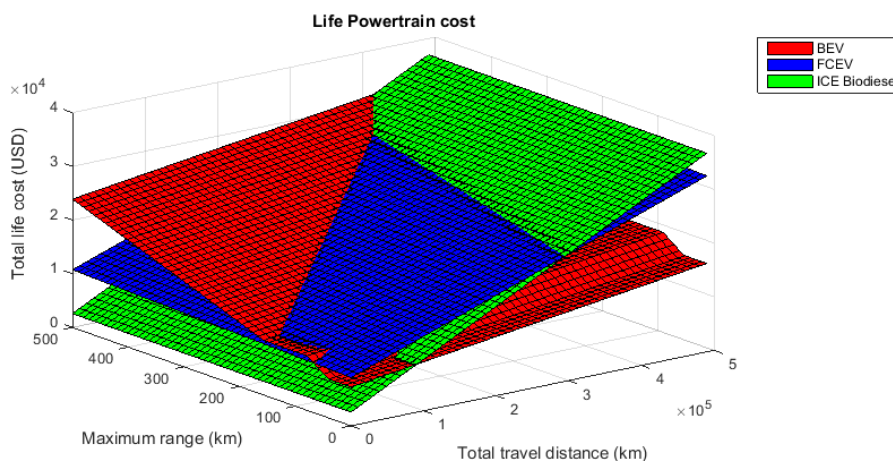
Resultatet från figur 5.15 kan också uttryckas som att en viss drivlina vinner kunderna inom ett visst område av de tänkbara fordonsanvändningssätten. Det är då den lösning som har lägst kostnad som vinner. I figur 5.16 så visas vilken lösning som vinner i vilket användningsområde för BEV och FCEV.



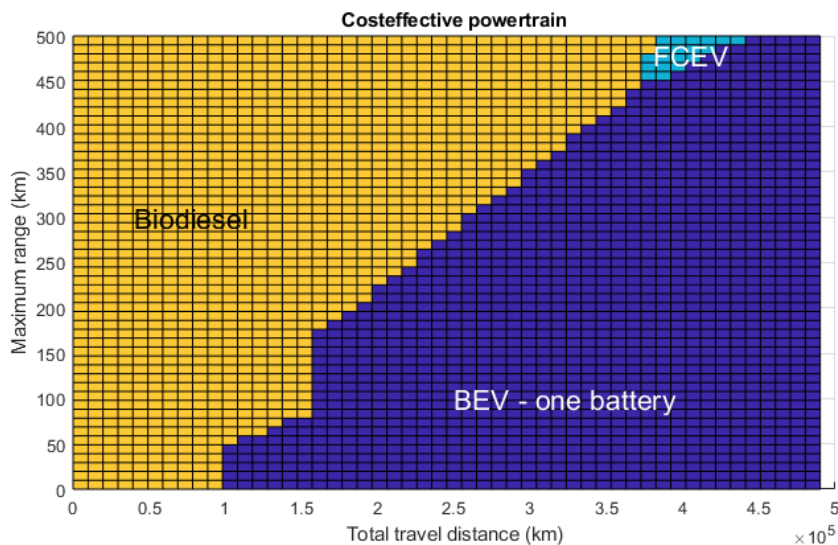


5.16 Vinnande drivlinelösning för olika fordonsanvändning.

Om vi i samma jämförelse lägger in en förbränningsmotor som drivs av biodiesel så fås resultatet i figur 5.17. Vi tar i dessa jämförelser inte med konventionell diesel, för den bedöms inte vara ett gångbart alternativ på sikt. Biodiesel alternativet har ytterligare en annan kostnadsbild, med mycket billigare drivlina, men dyrast bränsle av de tre. Därför kommer den att vinna då totala körsträckan inte är väldigt lång, som framgår i figur 5.18.

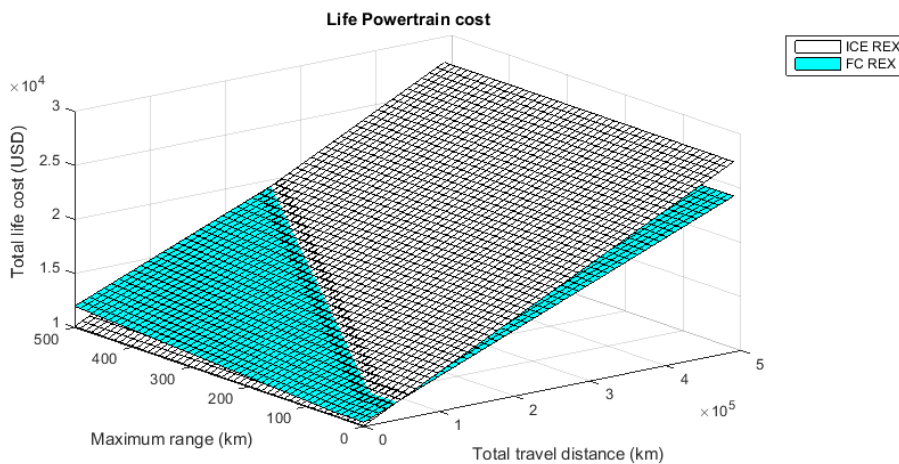


5.17 Totalkostnad för olika drivlinealternativ under hela fordonets livslängd som funktion av max körsträcka per "tank" och total körsträcka under livslängd.



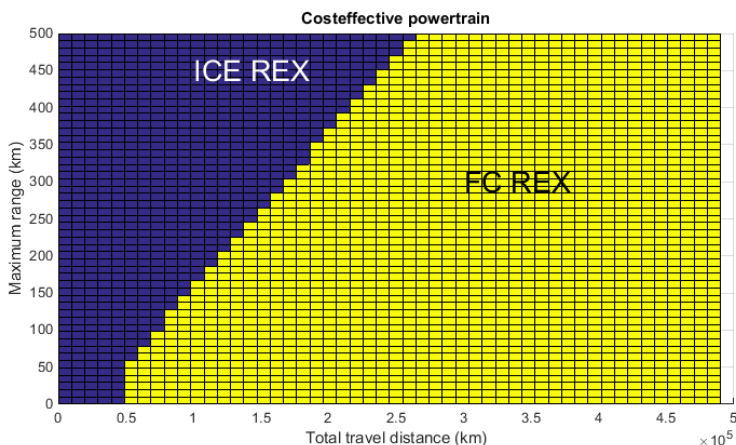
5.18 Vinnande drivlinelösning för olika fordonsanvändning.

Även batterifordon med räckviddsförlängare skall inkluderas i jämförelsen. Först jämförs bara två olika räckviddsförlängare med varandra i figur 5.19. Detta är inte en helt generell jämförelse, för den bygger på antagandet att drivlinorna med räckviddsförlängare används just så att 67 % av sträckan körs på el från elnätet och 33 % på energi från räckviddsförlängaren. Detta är rimligt för körning som en privat personbil, men kan vara fel för andra fordonstyper. Ett annat viktigt antagande är att batteriet är 10 kWh i dessa fordon.



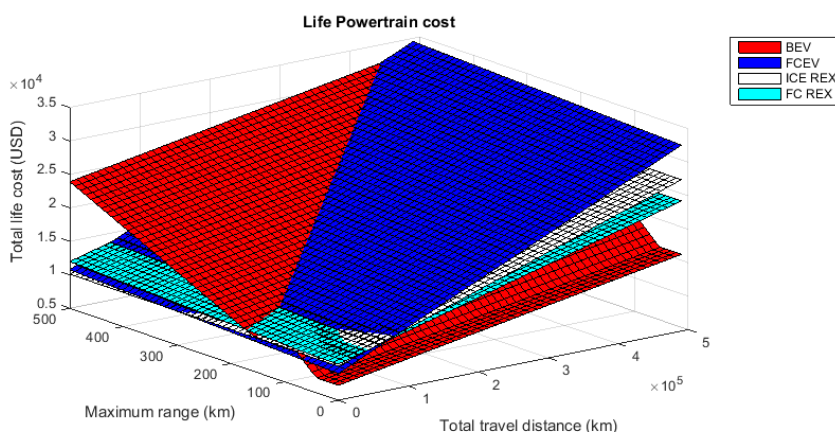
5.19 Totalkostnad för olika räckviddsförlängare under hela fordonets livslängd. OBS denna analys bygger på antagandet att körsträckefördelningen är sådan att 67 % kan köras på batteri och 33 % av sträckan körs på energi från räckviddsförlängaren.

Sinsemellan så kommer de två olika räckviddsförlängarna ha olika nischer de är bäst inom, förutsatt att man inte ännu hellre väljer en annan drivlina. Man kan då se att bränslecellen vinner framför allt om man kör långt under fordonets livslängd. Dock är dessa två drivlinors kostnadsfunktioner så pass lika att redan små variationer i kostnadsparametrar kan leda till att det ändras vilken av dem som är vinnaren i TCO jämförelsen.

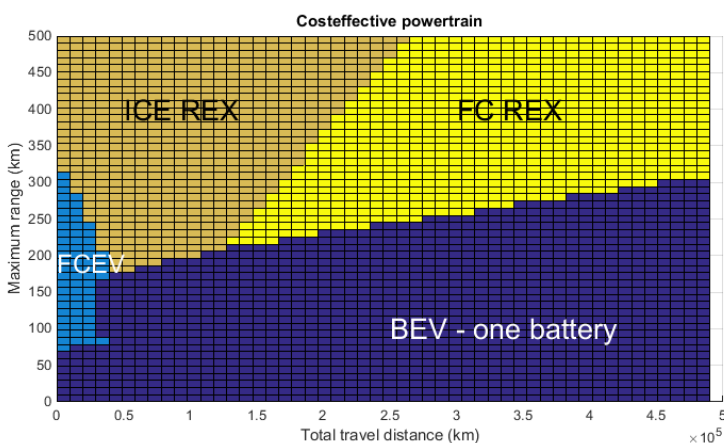


5.20 Vinnande räckviddsförlängare för olika fordonsanvändning.

Om vi nu jämför BEV, FCEV, FC REX och ICE REX så får vi resultaten i figur 5.21 och 5.22.

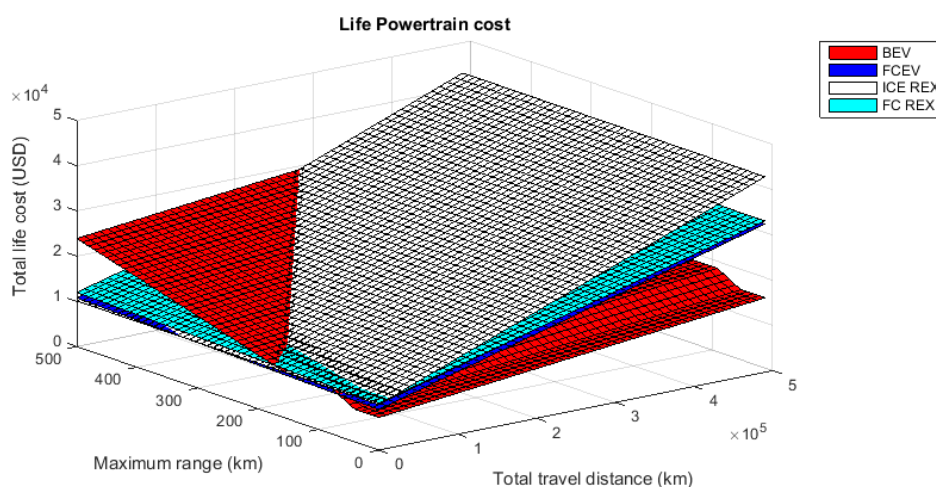


5.21 Totalkostnad för olika drivlinealternativ under hela fordonets livslängd som funktion av max körsträcka per "tank" och total körsträcka under livslängd.

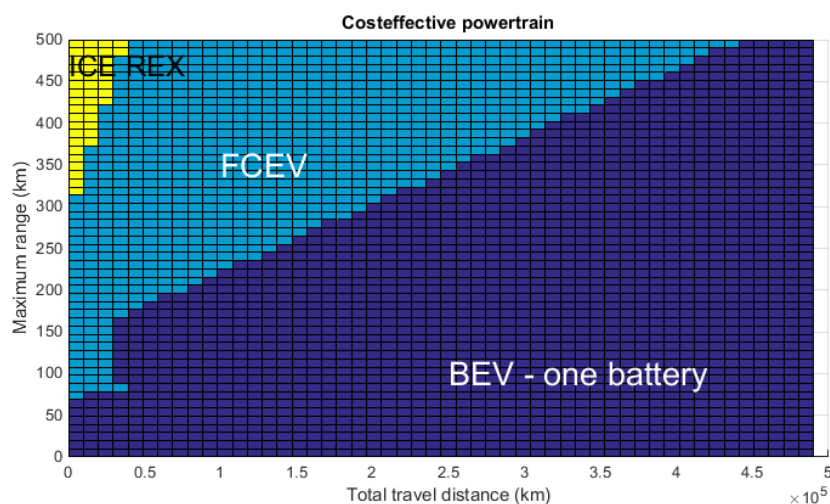


5.22 Vinnande räckviddsförlängare för olika fordonsanvändning.

I figur 5.22 så ser man att FCEV drivlinan nästan helt har trängts undan av de två räckviddsförlängar-drivlinorna. Resultatet att räckviddsförlängarna är så pass attraktiva beror starkt på antagandet om hur många procent av sträckan man kan köra på batteriet. Om man tänker sig mer extrema fordon som taxi, eller långfärdsfordon så kan man istället anta att bara en liten del av körsträckan körs på energi från elnätet/batteriet. I det här fallet har vi valt till 5 % av körsträckan på el. Då får man resultaten i figur 5.23 och 5.24. Under denna förutsättning visar sig räckviddsförlängare inte vara speciellt attraktiva från ett TCO perspektiv, utan det är bara i ett litet (och oviktigt hörn) av de möjliga användningssätten som räckviddsförlängaren skulle ha lägst TCO. Istället tar FCEV över där inte BEV har låg TCO.



**5.23** Totalkostnad för olika drivlinealternativ under hela fordonets livslängd som funktion av max körsträcka per "tank" och total körsträcka under livslängd, om man antar att bara 5 % kan köras på batteriet för ett fordon med räckviddsförlängare.



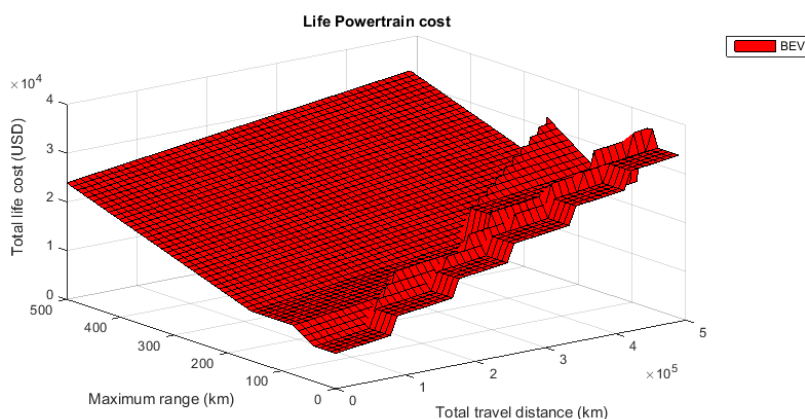
**5.24** Vinnande drivline lösning för olika fordonsanvändning om man antar att bara 5 % kan köras på batteriet för ett fordon med räckviddsförlängare.

Notera att den senaste jämförelsen med antagandet att bara 5 % av sträckan kan köras på batteriet är ett extremt fall, och det är inte säkert att det ens är rimligt för många av de olika sätten att använda fordon. Figur 5.24 skall därför inte ses som ett resultat i sig

själv, utan bara en indikation på behovet att undersöka räckviddsförlängare noggrannare. Skillnaden mellan figur 5.22 och 5.24 visar just på att resultatet är känsligt för antagande om körsträcka som körs på batteri.

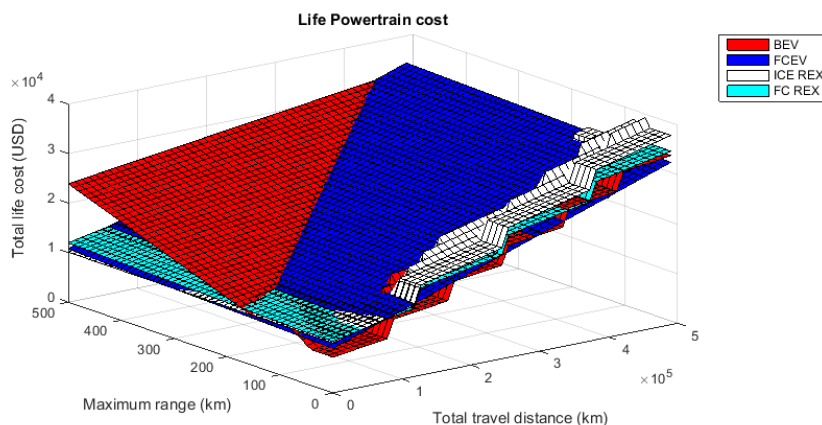
## 5.6 BATTERILIVSLÄNGDENS PÅVERKAN PÅ VAL AV DRIVLINA

I det tidigare avsnittet så görs alla jämförelser med batteridrivlinan under antagandet att batteriet aldrig behöver bytas. I detta avsnitt så analyseras effekten av batteribyte för olika batteriutnyttjande under livslängden. Om batteriet håller 2000C så kommer den totala körsträcka vid vilket batteriet behöver bytas att bero på hur lång körsträcka man kan köra på varje laddning. Har man en räckvidd på 100 km så kommer batteriet behöva bytas vid 2000 gånger den körsträckan, det vill säga 200'000 km. Räcker batteriet till 250 km körsträcka och håller 2000C så kommer det räcka upp till 500'000 km total körsträcka. Efter de körsträckorna måste man investera i ett nytt batteri och om man lägger den kostnaden på driftskostnaden så kommer TCO att ta ett steg uppåt just vid den kombination av max körsträcka och total körsträcka som motsvarar 2000C batteriutnyttjande. I figur 5.25 så ser man hur TCO ser ut då batteriet måste bytas vid 2000C. I figuren ser man flera steg i kostnaden, beroende på att man kan få flera batteri-byten om man kör mycket långt.

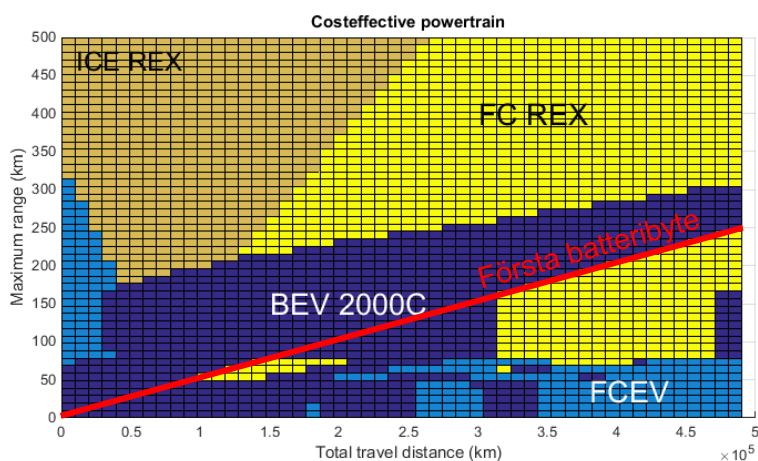


**5.25 Totalkostnad för BEV under hela fordonets livslängd, inklusive batteribyte vid 2000C, som funktion av max körsträcka per "tank" och total körsträcka under livslängd.**

I figur 5.26 så visas totalkostnad, med batteribyte vid 2000C, för alla de olika drivlinorna i samma diagram. I det så ser man att batteridrivlinorna blir dyra om man har kort maximal körsträcka och samtidigt hög total körsträcka. Utifrån denna kostnadsbild kan man ta fram vilken drivlina som är billigast vid olika användning, givet att batteriet byts vid 2000C. Detta visas i figur 5.26 och där ser man att BEV fortfarande ofta är en billig lösning, men det är inte längre lika attraktivt med BEV som har kort maximal körsträcka i kombination med lång total körsträcka.

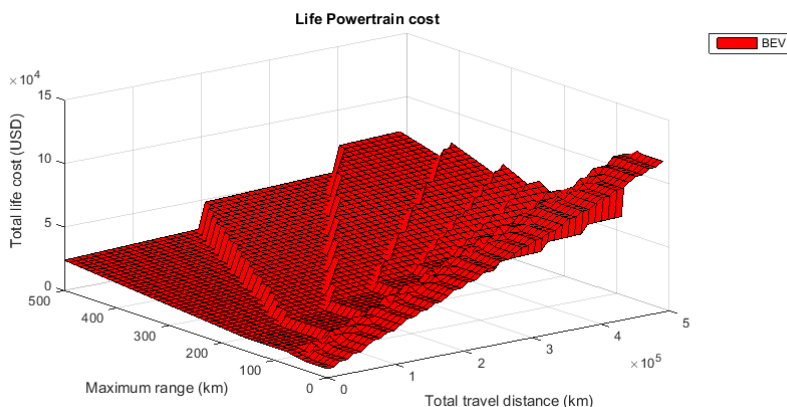


5.26 Totalkostnad för olika drivlinor under hela fordonets livslängd, inklusive batteribyte vid 2000C, som funktion av max körsträcka per "tank" och total körsträcka under livslängd.

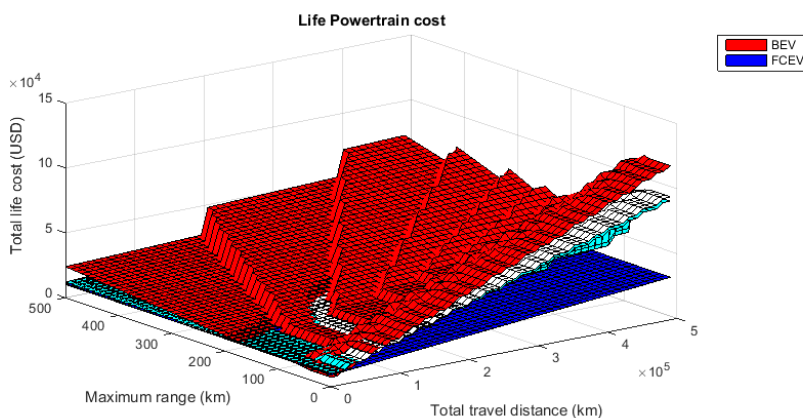


5.27 Vinnande drivline lösning för olika fordonsanvändning om batteriet måste bytas efter 2000C.

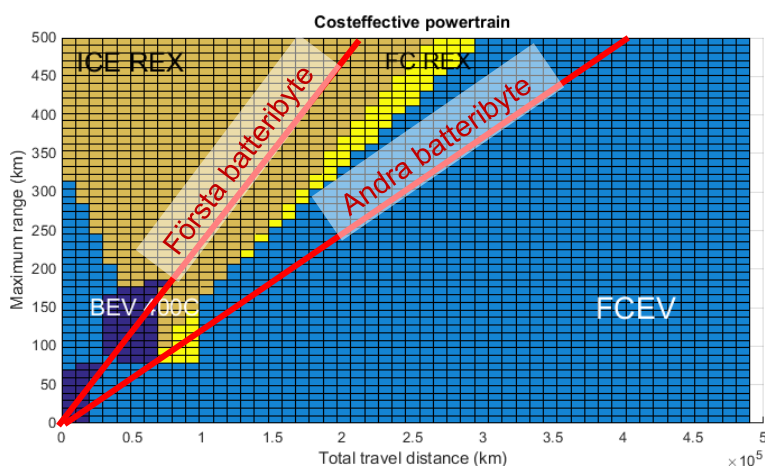
Om batteriet utnyttjas så dåligt att byte måste ske vid 400C så kommer totalkostnaden för en BEV att bli som i figur 5.28. Där ser man effekten av batteribyten som en trappa med högre och högre totalkostnad. Totalkostnaderna för de olika drivlinetyperna kommer att bli som i figur 5.29 och när man ur dem ser vilken drivlina som blir billigast för olika sätt att använda fordonet så får man resultatet i figur 5.30. Där ser man att BEV drivlinorna bara är kostnadseffektiva i ett litet segment och istället har bränslecellsdrivlinan tagit över hela det område som batteridrivlinor med lång batterilivslängd brukar vinna i.



5.28 Totalkostnad för BEV under hela fordonets livslängd, inklusive batteribyte vid 400C, som funktion av max körsträcka per "tank" och total körsträcka under livslängd.



5.29 Totalkostnad för olika drivlinor under hela fordonets livslängd, inklusive batteribyte vid 400C.



5.30 Vinnande drivline lösning för olika fordonsanvändning om batteriet måste bytas efter 400C.

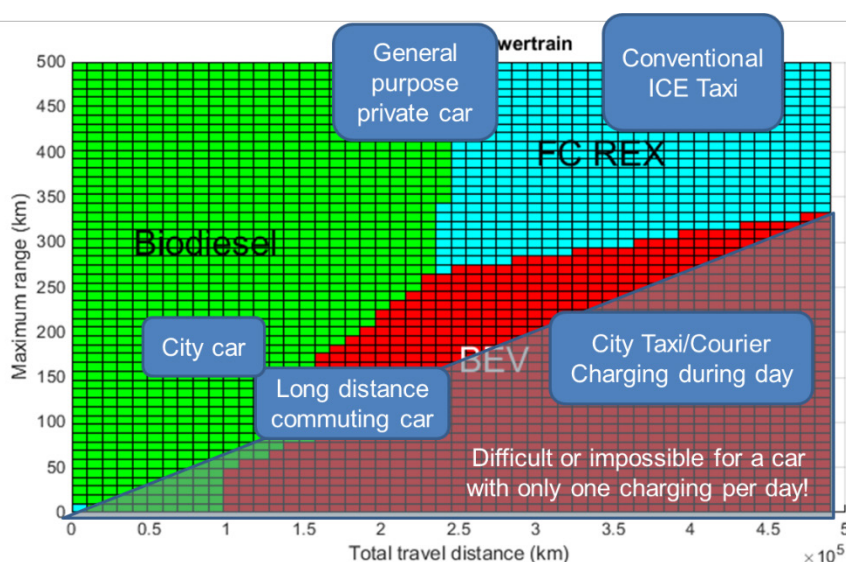
Dessa resultat visar att batteriutnyttjandet är en viktig nyckel för att batteridrivlinor skall vara billiga. Om man kan använda fordonet så att batterilivslängden är mycket högre än 2000C så kommer batteridrivlina att vara en vinnare för fordon med lång total

körsträcka, och med inte allt för lång räckvidd per laddning. Skulle batteriutnyttjandet sjunka mycket under 2000C så kommer batteridrivlinor ofta förlora mot andra alternativ, och kommer man så lågt som 400C batteriutnyttjande så är batteridrivlinan nästan aldrig det billigaste alternativet. Ur detta skall man vara försiktig att dra allt för detaljerade slutsatser, för hur högt batteriutnyttjande man kan få i praktiken kommer ofta även bero på hur fordonet används. Därför bör detta undersökas noggrannare. Dock kan man konstatera att det är svårt att få riktigt billiga batteridrivlinor om batteriutnyttjandet inte är högt.

Det finns en annan viktig insikt om hur man får högt batteriutnyttjande och det är att man i stort sett måste ladda flera gånger per dag för att kunna få riktigt högt batteriutnyttjande. Det kan inses om man antar att få fordon kommer att ha en ekonomisk livslängd på mycket mer än 10 år. Om ett fordon används alla vardagar i 10 år så är det 2600 vardagar. Om man varje dag kör slut på så mycket som 75% av maximal kapacitet så kommer batteriet, om det laddas en gång per dag, inte kunna cykla mer än ca 2000C under 10 år. Att i genomsnitt använda mer än 75% av maxkapaciteten är svårt, så de enda två sätten som batteriutnyttjande kan ökas till mer än 2000C är att livslängden på batteri och fordon påtagligt överstiger 10 år eller att det laddas två eller fler gånger per dygn. Av dessa alternativ så är flera laddningar per dygn det som sannolikt är rimligaste sättet att få upp batteriutnyttjandet till väsentligt mer än 2000C.

## 5.7 RESULTATEN FÖR NÅGRA OLIKA SÄTT ATT ANVÄNDA EN BIL.

I de tidigare avsnitten så har fordonsutnyttjandet alltid uttryckts i maximalt antal kilometer per laddning/tankning och total körsträcka under livslängden. För att relatera detta till kända fordon så har några typiska värden för olika typer av bilar ritats in i figur 5.31. Notera att det stora området som BEV vinner inom, inte är relevant för hur de flesta bilar i dag används, och en stor del av det området kan bara nås om fordonet laddas mer än en gång per dag.



5.31 Exempel på olika typiska sätt att använda bilar markerade i diagrammet från figur 5.18



## 5.8 SLUTSATSER OM OLIKA DRIVLINOR FÖR OLIKA FORDONSANVÄNDNING

Några av de viktiga slutsatserna från analysen av drivlinor för olika fordonsanvändning är:

- Kostnaderna för bränslecellsdrivlinor och batteridrivlinor har helt olika karaktär och därför är de bra och dåliga för olika användningssätt.
- Driftskostnaden med biodiesel i förbränningsmotor är högre än med vätgas i bränsleceller. Billigast är el från elnätet.
- Merkostnaden för att ha lång räckvidd på vätgas är mycket liten jämfört med merkostnaden för en lång räckvidd på batteri.
- Batteriutnyttjandet måste vara högt för att batterielbilar skall vara billigare än alternativen, typiskt 2000C eller högre.
- Kan man nå batteriutnyttjande på 5000C eller mer så har batterielbilar mycket låg TCO, men det kan bara nås om fordonet laddas flera gånger per dygn (eller batteriet lever mycket längre än 10 år, vilket verkar mindre sannolikt.).
- Drivlina med bränslecells-räckviddsförlängare verkar mer attraktiv än vanlig bränslecellsdrift, om körsträckorna är fördelade så att 67 % av totala sträckan kan köras på batteriet.

För bilar som körs som många personbilar idag, d.v.s. upp till ca 200000 km under livslängden och med lång räckvidd, så verkar det vara mest kostnadseffektivt med räckviddsförlängare driven på biodrivmedel, trots att bränslet är dyrare än vätgasen. För längre total körsträcka så är istället bränslecells-räckviddsförlängare billigare.

Denna studie har visat på många intressanta resultat och metoden har även möjliggjort ökad förståelse för vilka mekanismer som påverkar vilka drivlinor som är mest kostnadseffektiva. Dock är det viktigt att påpeka att det finns mycket mer som bör analyseras ytterligare innan man kan anse resultaten som säkra. Bland annat behöver det belysas bättre hur olika körsträckefördelning påverkar valet mellan räckviddsförlängare eller ej, och det behöver även undersökas mer hur batterilivslängden kan förväntas påverkas av hur fordonet används.

## 6 Slutsatser

Denna studie med det svåra namnet drivlinekonfigurationer med bränsleceller visade sig också vara mer komplicerad än många andra projekt inom teknikbevakningen. Studien består av två olika delar. Den första delen beskriver och analyserar hur bränsleceller hittills har använts i fordon och positionerats på marknaden. Bland resultaten kan märkas en tydlig dominans av drivlinor av hybridtyp både bland personbilar och bussar. Med detta menas ett fordon som huvudsakligen drivs med el från vätgasdrivna bränsleceller och batteripaketet används som en effektbuffert. Bland det fåtal fordon som har nått marknaden är detta den enda lösningen i nuläget. Bränslecellsfordonen på marknaden är i breda kundsegment men analysen i den första projektdelen indikerar att det är troligt att kommande modeller primärt kommer att vara i de lyxigare segmenten.

Bussutvecklingen följer två spår. Det ena spåret är med specifika bränslecellsstackar för bussar, vanligen från Ballard. Det andra spåret, som förefaller att bli dominerande, är att använda samma stackar som personbilarna men styra dem på ett annat sätt. Dessutom används normalt två stackar per buss. Toyota har i det här avseendet gått längst med de cirka 200 bussar som ska levereras i Japan under de närmaste åren genom att företaget även har valt att ha samma typ av vätgastankar som personbilen. Detta skiljer sig från övriga bussar, vilka använt vätgastankar med lägre tryck.

Kostnadsmässigt har naturligtvis möjligheten att använda samma hårdvara i tunga och lätta fordon stor betydelse då personbilar tillverkas i helt andra volymer.

Endast ett fåtal lastbilar ingår i data och det är därför svårt att uttala sig om dominerande teknikval i nuläget.

Projektets andra del omfattar en totalkostnadsanalys med olika drivlinor. Mot bakgrund av en del antaganden jämförs kostnaden för investering och drift av bränslecellsfordon, batterifordon, förbränningsmotorfordon med biodrivmedel, samt två olika varianter av batterifordon med räckviddsförlängare, en med bränsleceller och en med förbränningsmotor.

Analysen visar på karaktärsskillnad i hur kostnaden för bränslecellsfordon och batterifordon varierar i förhållande till dimensionerna räckvidd per tank och total körsträcka under fordonets livslängd. Det är tydligt att batteridrift är bäst när räckviddskraven är måttliga och den totala körsträckan är lång. Konsekvensen av detta är att batterifordon bör laddas flera gånger om dagen för att bli kostnadsmässigt attraktiva.

En jämförelse av alla alternativen visar att förbränningsmotorfordonet med biodiesel i kraft av sin låga investeringskostnad är attraktivast för tillämpningar med kort och måttlig körsträcka under fordonets livstid. I hörnet med lång total körsträcka och hyfsad räckvidd per tank (eller laddning) hamnar batterifordon med bränsleceller som räckviddsförlängare. Denna del av marknaden omfattar inte så många fordon men då de används mycket omfattar den en icke försumbar del av totalt transportarbete. Dock sträcker sig tillämpningsområdet ner till att tangeras den stora bulken av personbilar idag, dvs fordon som totalt körs cirka 20 000 mil och har en räckvidd på 50 mil.

Viktigt att notera är att analysen studerar kostnader. Fordonsmarknadens utveckling styrs som bekant av fler faktorer än kostnader, bland dem tycke och smak. Härvidlag skiljer sig kommersiella fordon från privata bilar då användarna av de förra gör mer

rationella investeringar. Dessutom har politiken stort inflytande då kostnaden för och utbudet av drivmedel har stor betydelse för alternativens konkurrenskraft.

Jämförs projektets första och andra del kan några skillnader noteras. En viktig skillnad är att bränsleceller som räckviddsförlängare uppvisar bättre totalekonomi än den idag dominerande lösningen med bränsleceller, dvs. ej laddbara bränslecellshybrider. Avgörande för denna slutsats är emellertid antagandet om att ett batterifordon med räckviddsförlängare till 67 procent körs på el från elnätet. Detta kan vara svårt i praktiken då det precis som för batterifordon torde innebära behov av mycket frekvent laddning, i synnerhet som batteripaketet som antagits i analysen bara är på 10 kWh.

En annan skillnad är att batteridrift ofta positioneras som lämpliga för små fordon som inte kör så långt medan bränslecellsdrift är för stora fordon med längre körsträckor. Kostnadsanalysen tar inte hänsyn till storlek (och vikt) men avseende körsträckor så bör batteribilar köras mycket för att vara konkurrenskraftiga. Det matchar inte segmentet stadsbil särskilt bra med undantag för taxi, möjligtvis. Bränslecellsfordonen ligger mer rätt i detta avseende.

Avslutningsvis kan det konstateras att resultaten av detta projekt snarare är många frågor än svar på dem. Dock är frågorna av en mer kvalificerad karaktär och möjligheterna att bygga vidare på analysen mycket goda. Det är också intressant att notera att analysen av drivlinor med bränsleceller i det här fallet i stor utsträckning också ledde till ökad kunskap om förutsättningarna för kostnadsmässigt attraktiva batterifordon av olika slag.

## NÄR PASSAR BRÄNSLECELLER BÄST?

De dominerande lösningarna för drivlinor med bränsleceller i bilar och bussar är hybrider. Det betyder att det är fordon som i huvudsak drivs med el från vätgasdrivna bränsleceller med ett batteripaket som buffert. Bränslecellsfordonen förekommer mest i breda kundsegment på marknaden. Den här rapporten indikerar att det är troligt att kommande modeller primärt kommer att finnas i de lyxigare segmenten.

Totalkostnaden för olika drivlinor visar på en skillnad i hur kostnaden för bränslecellsfordon och batterifordon varierar i förhållande till räckvidd per tank och total körsträcka under fordonets hela livslängd. Det visar sig att batteridrift är bäst när kravet på räckvidd är måttligt och den totala körsträckan är lång. Det står i kontrast till den allmänna uppfattningen att batteridrift är bäst för små fordon som inte kör så långt.

Ett fordon med förbränningsmotor som drivs med biodiesel är i kraft av sin låga investeringskostnad det bästa alternativet när fordonet körs korta och måttliga körsträckor under fordonets livstid. När det krävs en lång total körsträcka och hyfsad räckvidd per tank, eller laddning, är det mer ekonomiskt att ha ett batterifordon med bränsleceller som kan förlänga räckvidden. Det betyder att tillämpningen av den här typen av fordon närmar sig den stora massan av personbilar, det vill säga fordon som totalt körs cirka 20 000 mil och har en räckvidd på minst 50 mil.

### 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](http://www.energiforsk.se)