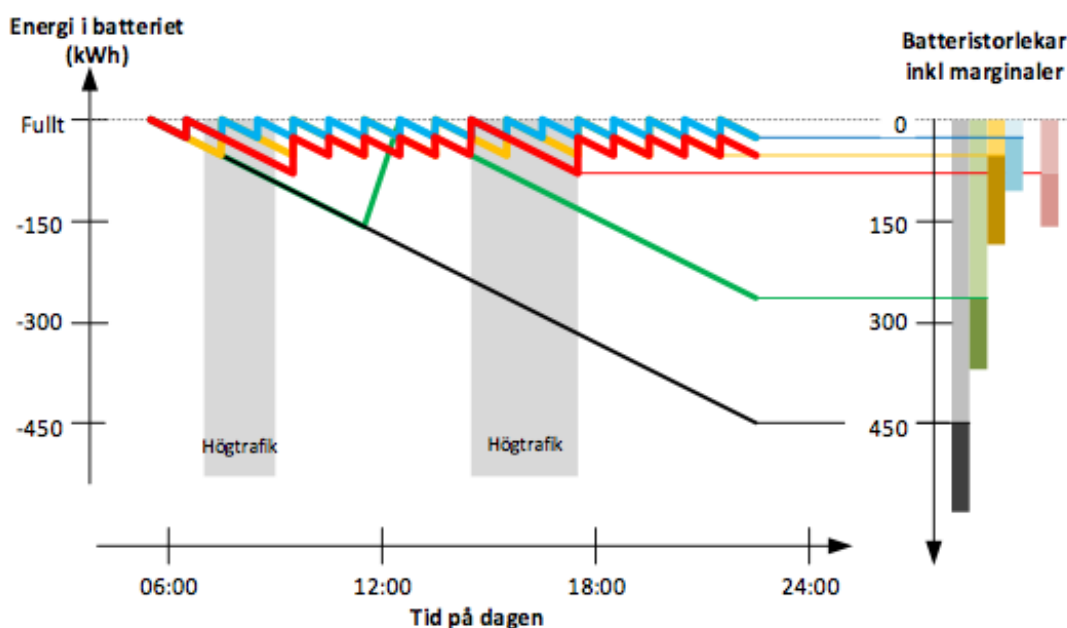


Analys av energiförsörjning för elektrifierade bussystem



Författare

Anders Grauers, Chalmers, Signaler och System
Oscar Olsson, Viktoria Swedish ICT
Niklas Carlsson, Göteborg Energi
Gunnar Ohlin, Lindholmen Science Park
Lars-Göran Rosenaren, Lindholmen Science Park

FFI Fordonsstrategisk
Forskning och
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary	3
3 Bakgrund.....	4
4 Syfte, frågeställningar och metod	6
4.1 Frågeställningar	6
4.2 Metod.....	6
4.3 Avgränsningar.....	6
5 Mål	7
6 Resultat och måluppfyllelse.....	8
6.1 AP2 Omvärldsbevakning	8
6.2 AP3 Specifikationer och förutsättningar.....	9
6.3 AP4 Beskrivning av alternativa energiförsörjningstekniker.....	13
6.4 AP5 Modellering och analys	16
6.5 Applicering av metoden på linje 18 och 19 i Göteborg	24
6.6 Måluppfyllelse	27
7 Spridning och publicering.....	29
7.1 Kunskaps- och resultatspridning.....	29
7.2 Publikationer	30
8 Slutsatser och fortsatt forskning.....	30
9 Deltagande parter och kontaktpersoner	30

1 Sammanfattning

Syftet med projektet har varit att öka kunskaperna inom området energiförsörjning för elektrifierade bussystem och att utveckla en metod som är användbar vid planering och byggnation av framtidens elbussinfrastruktur. Metoden är avsedd att användas av parter - infrastrukturägare, kollektivtrafikmyndigheter, fordons- och komponenttillverkare - som i samverkan beslutar om framtida satsningar inom området elektrifierad kollektivtrafik. Metoden ska fungera som stöd vid utvärdering eller utformning av system för att belysa hur man ska uppnå maximal nytta i förhållande till investerings- och driftskostnader. Ett fortsättningsprojekt - Energiförsörjningsalternativ för elektrifierade bussystem - har startats inom Demonstrationsprogrammet för elfordon med fler parter och med målet att ytterligare utveckla metoden samt bredda analysen till mer kompletta busstransportsystem.

Inom ramarna för detta projekt har elförsörjningsinfrastrukturen kopplat till bussars energiförbrukningssystem modellerats. Modellen har försetts med typiska parameter- och variabelvärden baserat på uppgifter från olika demonstrationsprojekt samt leverantörer av energi och utrustning. En metod för att analysera en kostnadseffektiv utformning av energiförsörjningssystem för elektrifierad busstrafik har utarbetats och validerats på två stombusslinjer i Göteborg. Metoden tar hänsyn till lokala och regionala förutsättningar avseende bland annat topografi, trafikbehov och befintlig kapacitet i elnät

Parter i projektet har varit AB Volvo, Chalmers, Göteborg Energi, Lindholmen Science Park, Viktoria Swedish ICT och Västra Götalandsregionen.

Projektet har finansierats av FFI och Västra Götalandsregionen.

2 Executive summary

Fully electric bus systems offers a potential to reduce fossil fuel dependency but have also other advantages as being emission free and silent. Various techniques can be used for supplying the bus with energy. Different concepts are currently tested all over the world and many cities aim for running all or a substantial proportion of their city buses on electricity within 5-10 years. In order to achieve these ambitious goals public transport authorities and operators need to take a system perspective in order to minimise cost. However, no method for analysing and comparing the systems overall cost has been available until recently.

This project has aimed to model the energy supply infrastructure related to the buses' energy consumption and storage taking into account other prerequisites outside the bus as electric net capacity, topography, climate, etc. Existing bus lines, timetables and passenger loads set the boundaries of the system. The main goal has been to develop a method that can be used when designing and planning the future electric bus system including the infrastructure for the supply of energy. The method is intended for public transport authorities and operators to plan what kind of buses and charging system is most appropriate from a lowest operating and financial cost perspective. The method can be used to analyse new combinations of buses and charging systems but also to compare existing combinations of buses and charging systems. The method may therefore be useful also for manufacturers to adapt their buses or infrastructure for different types of cities. Two light BRT bus lines have been used as a case study for validating the method.

The following alternatives to supply energy to the electric bus have been analysed:

1. Buses charged at the depot, typically with large energy optimized batteries
2. Buses opportunity charged typically at the end stations
3. Buses opportunity charged at bus stops and end stations
4. Buses charged partially or continuously during motion

An analysis of the costs to establish and run a tramway has been made to serve as a reference.

Results indicate that the costs for charging system and electricity connection have a low impact on the total annual operating costs for electric buses in general and especially when comparing electric bus system alternatives. Solely comparing investment costs might thus give a wrong indication of what electric bus system results in the lowest total cost for operating the bus lines. Infrastructure tends to have a long depreciation time and may therefore be relatively small total cost in relation to the operating costs. This is visualized by comparing the annual costs for the different bus systems.

The method also highlights the importance of looking at the total cost for the bus operation instead for an optimum of isolated problems such as in the trade-off between battery capacity and charger power as an example. Reducing the size of chargers and batteries to a minimum could increase the charge time and require an additional bus to operate the bus line to retain bus frequency. Unless this bus and driver are spared from another bus line it will be an added cost.

Operator costs stand out clearly as a significant cost item. High utilization of vehicles and drivers are therefore important. However, when the timetable is fixed and without dwell time for charging neither at depots or at end stations during the day, a relevant trade-off could be to add an extra bus as an option to increase the battery capacity on all buses. A planning tool will be required that supports various types of electric buses. Today's bus operation and dwell times are often adapted for combustion engine buses. Timetables for electric buses need special attention to synchronize buses into slots at common charge points and for certain cases also to add dwell time at end stations. Batteries and chargers could be improperly large if adequate time for charging is not accounted for.

Unique to this method is the wider system perspective and optimization of the total costs of operating an entire bus line. The analysis visualizes that the cost of the vehicle and battery accounts for a large cost. It does furthermore highlight that increased costs as a result from added time needed to recharge the vehicles is an essential cost factor. Additionally, the cost of charging system and energy is shown to have a lower annual cost impact.

The method is quite transparent. The parameters used can be observed and should be adjusted to reflect the circumstances prevailing in a city. The best use of the method is to use it in an iterative way, adjusting parameters (vehicle cost, depreciation time, range, etc) to study the effect they have on the total cost. The method has been developed primarily for public transport authorities that procure public transport to be able analyse what electric bus system has the lowest total cost depending on the city specific requirements. Companies developing electric buses and infrastructure can also use the method.

The project was divided in six work packages: Coordination, Business Intelligence/Environmental Scanning/Strategic foresight, Specification and Pre-requisites, Description of Competing Technologies, Modelling and Analysis and finally Discussion and Dissemination. Throughout the project the working method has been characterized by an interactive approach. An iterative process between the work packages rather than a linear logic process has tuned the scope and focus during the course of the project.

A new project together with a broader range of stakeholders also including bus operator and charging systems supplier has started to develop the methodology to be applied for entire bus systems.

3 Bakgrund

Persontransportarbetet med kollektivtrafik har mer än fördubblats sedan 1950-talet. Av allt resande inom Sverige på väg, järnväg och sjö utgör kollektivtrafiken idag 18 procent av antalet personkilometer. Det senaste decenniet har resandet med kollektivtrafik ökat i absoluta tal men även marginellt ökat som andel av det totala resandet.¹ Kollektivtrafiken är därför ett viktigt medel för att skapa tillväxt men spelar också en mycket viktig roll för att persontrafiken skall bli mer hållbar.

¹ http://www.trafa.se/PageDocuments/Lokal_och_regional_kollektivtrafik_2011.pdf

För att nå miljömålen i exempelvis Västra Götalandsregionen har ett strategidokument upprättats som stakar ut vägen². Dokumentet utgör ett viktigt underlag när kollektivtrafikmyndigheten ställer krav i upphandlingar som Västtrafik genomför. Eldrift pekats ut som en möjlighet med stor potential till energieffektivisering, minskade utsläpp och tystare trafik. Tåg- och spårvägstrafik är i dagsläget elektrifierade. Det finns en ambition att elektrifiera även busstrafik som har stor potential att minska bland annat koldioxidutsläpp, förutsatt att förnyelsebara energikällor och/eller kärnkraft utnyttjas. Kostnadsbildningen för olika varianter av elektrifierade bussystem behöver därför klarläggas. Det har saknats en metod för att uppskatta dessa kostnader relaterat till de prestanda som efterfrågas.

Helelektriska fordon med energilager behöver försörjas med energi intermittent - när bussen står stilla, rör sig, eller både och. Det finns ett antal alternativa tekniska lösningar att överföra energin från distributionsnätet till fordonens energilager. Det är möjligt att införa energilager i infrastrukturen och att bygga upp dedikerade nät. För energiöverföringen mellan infrastruktur och fordon är både konduktiva och induktiva tekniker möjliga och laddning kan ske underifrån, från sidan (även framför och bakom) eller ovanför fordonet. Det är även möjligt att byta batterier mot fulladdade sådana vid speciella batteribytestationer, s.k. battery swapping³. De krav som ställs på bussystemets transportkapacitet, maximala hållplatstider, annan hållplatsdynamik, topografi och inte minst väderleksförhållanden utgör signifikanta randvillkor för valet av elförsörjningslösningar.

De flesta elförsörjningslösningar som demonstreras i Sverige idag bygger på överföring genom konduktion. En pantograf fäst i laddstolpen trycks ned mot en kontaktskena monterad på bussens tak. Detta sker vid ändhållplatserna. Att enbart ladda fordonen vid ändhållplatserna sätter begränsningar för hur långt bussen kommer enbart på eldrift. Stora batterier är både dyra och tunga så ur fordonsperspektiv så önskas batteristorleken minimeras. Små batterier kräver dock att de energiförsörjs ofta om bussen skall köras helt på eldrift. Detta kräver tätare laddinfrastruktur, vilket är kostsamt och kan medföra ingrepp i stadsbild som kan vara svårt att få acceptans för.

Elektrifierade bussar studeras ofta ur ett fordonsperspektiv. Vid tiden för projektansökan var det svårt att hitta publicerade artiklar eller studier som belyste elbussar och tillhörande laddinfrastruktur ur ett systemperspektiv och försökte jämföra olika koncept och lösningar med varandra. Ett undantag var en tysk studie från Berlin, där en värdering av elektrifierade bussalternativ inklusive energiförsörjningsinfrastruktur gjorts⁴. Sedan dess har en rad studier publicerats som tar sig an problematiken från olika angreppspunkter med det gemensamma syftet att öka förståelsen hur hela systemet med elbussar bör dimensioneras och utformas^{5, 6, 7, 8}.

Frågorna som berörts i detta projekt är högst relevanta och intressanta att få svar på för bland annat regionala kollektivtrafikmyndigheter, trafikoperatörer och eldistributionsföretag. Hittills har ett antal demonstrationer genomförts, tex i Umeå⁹, Landskrona¹⁰, Stockholm^{11, 12} och i Göteborg^{13, 14}, vilka påvisar

² http://www.vgregion.se/upload/Regionkanslierna/Kollektivtrafikn%c3%a4mnden/Milj%c3%b6/Milj%c3%b6-och_Klimatstrategi_2013-01-31.pdf

³ <http://www.teslamotors.com/batteryswap>

⁴ X D. Göhlich, A Kunith, T Ly, "Technology assessment of an electric urban bus system for Berlin", *WIT Transactions on The Built Environment*, Vol 138, 2014

⁵ Kunith et al, *Optimization of fast charging infrastructure for electric bus transportation – Electrification of a city bus network*, EVS28 International Electric Vehicle Symposium, Goyang, 2015

⁶ O. Vilppo et al, *Feasibility of electric buses in public transport*, EVS28 International Electric Vehicle Symposium, Goyang, 2015

⁷ M. Rogge et al, *Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport - A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements*, *Energies*, DOI 10.3390/en8054587, 5(2015), 4587-4606.

⁸ <http://www.ebusplan.com/en/> - Your partner for the introduction of electric buses

⁹ <http://www.bussmagasinet.se/2014/05/snabba-steg-mot-elbussar-i-umea>

¹⁰ <http://www.slidein.se/om-projektet/>

¹¹ <http://www.bussmagasinet.se/2014/03/har-kommer-storstockholms-forsta-elbuss/>

¹² <http://corporate.vattenfall.se/nyheter/pressmeddelanden/2014/juni/laddhybridbussar-med-snabbladdning-demonstreras-i-stockholm/>

att det är fullt möjligt att bedriva elektrifierad busskollektivtrafik. Det är dock fortfarande öppet hur framtidens ekonomiskt rimliga elförsörjningsinfrastruktur och därtill kopplade bussutformningar ser ut. Syftet med projektet har därför varit att öka kunskaperna inom området och att utveckla en metod som är användbar vid planering och byggnation av framtidens elektrifierade bussystem.

4 Syfte, frågeställningar och metod

Syftet med projektet har varit att öka kunskaperna inom området och att utveckla en metod som är användbar vid planering och byggnation av framtidens elbussinfrastruktur. Metoden är avsedd att användas av parter - infrastrukturägare, kollektivtrafikmyndigheter, fordons- och komponenttillverkare - som i samverkan beslutar om framtida satsningar inom området elektrifierad kollektivtrafik. Metoden ska fungera som stöd vid utvärdering eller utformning av system för att belysa hur man ska uppnå maximal nytta i förhållande till investerings- och driftskostnader.

4.1 Frågeställningar

Den centrala frågeställningen projektet önskat belysa, och skapa en metod för att bestämma, är hur energiförsörjningssystemet för elektrifierad busstrafik ska utformas och dimensioneras för olika transportbehov. Projektet har därför generellt arbetat med att identifiera och avgränsa systemets väsentliga beståndsdelar så att kostnaden för dessa kan bestämmas eller lätt kan varieras. Mer specifika frågeställningar projektet arbetat med har varit att

- tydliggöra hur linjelängd samt trafikrelaterade krav som turtäthet, reglertid, kontinuerlig drift över dygnet och passagerarlast påverkar utformning och dimensionering, särskilt avseende batteristorlek i förhållande till laddeffekt och infrastruktur
- uppskatta belastning på elnätet som en effekt av teknikval och uppskatta kostnader för eventuell utbyggnad av elnätet
- tydliggöra konsekvenser av olika förutsättningar som topografi, klimat etc.

Målet har varit att ta fram en metod med vilken man ska kunna beräkna totala kostnader för olika alternativa energiförsörjningssystem. Metoden ska bidra till att skapa bra underlag vid beslut om framtida investeringar i elbussystem genom att möjliggöra jämförelser mellan olika elektrifierade bussystem samt mellan buss- och spårvagnsbaserade system.

4.2 Metod

Projektet har arbetat i sex arbetspaket: *AP1 Koordination*, *AP2 Omvärldsbevakning*, *AP3 Specifikation och förutsättningar*, *AP4 Beskrivning av alternativa energiförsörjningstekniker*, *AP5 Modeller och analys* och *AP6 Diskussion och spridning av resultat*. Projektets genomförande har präglats av en ständigt pågående interaktion mellan arbetspaketen och när nya insikter vunnits har dessa fått påverka projektets inriktning, omfattning och relevans.

4.3 Avgränsningar

Projektet har berört samhällsekonomiska kostnader för buller och emissioner men inte haft för avsikt att ta med dessa kostnader i modellen då utgångspunkten har varit att jämföra olika elektrifierade bussystem, som alla antas ha samma prestanda i detta avseende.

¹³ <http://www.bussmagasinet.se/2014/04/alla-gillar-laddhybridbuss-i-goteborg/>

¹⁴ <http://www.goteborgelectricity.se>

5 Mål

Huvudmålet med projektet har varit att ta fram en metod för robust och ekonomiskt fördelaktig utformning av energiförsörjningssystem för elektrifierad busstrafik med komplex hållplatsdynamik. Tanken är att den utvecklade metoden skall kunna användas för jämförelser mellan olika elektrifierade bussystem samt mellan buss- och spårvagnsbaserade system.

Inom ramarna för projektet har vi avsett att beskriva elförsörjningsinfrastrukturer med modeller som utnyttjas för att härleda totala kostnader för olika tekniska alternativ som finns till förfogande. Målet har varit att bestämma kostnaden för de olika potentiella teknikerna, vilken effekt som maximalt kan överföras, arkitekturer och systemegenskaper då effekten tillförs direkt från nätet till fordonen, eller då den överförs till mellanlager för att sedan snabbt och med hög effekt överföras när bussen är tillgänglig. Även andra egenskaper i form av utseende, funktion i vinterklimat etc kommer att studeras.

Metoden skall kunna användas vid framtida satsningar inom området elektrifierad kollektivtrafik och särskilt för att utforma system anpassade till lokala och regionala förutsättningar för att därmed nå maximal nytta i förhållande till investerings- och driftskostnader. Metoden skall därmed bidra till att FoU-satsningar bland annat inom fordonsindustrin leder till ökad konkurrenskraft och i längden fler arbetstillfällen.

Projektets mål har vidare varit att metoden ska utnyttjas som underlag vid kommande upphandlingar eller vid utveckling och drift av fungerande test- eller demonstrationslinjer som uppskattas av de resande men också av andra lokala parter, lokalt näringsliv, lokala beslutsfattare med flera. En väl utnyttjad testarena genererar större intresse och utgör en intressant forsknings- och innovationsmiljö samt skapar förutsättningar för fortsatt utbyggnad eller uppskalning.

Projektet har adresserat område A i FIFFI – ”tekniker för kraftöverföring mellan infrastruktur och fordon vid elektrifiering”. Specifikt har projektet avsett att analysera vilka elförsörjningsbehov som olika buss- och elöverföringstekniker ställer utifrån faktiska transportbehov. Dessa behov kan mötas av olika typer av elförsörjningsinfrastrukturer. Ett ytterligare mål med projektet har varit att skapa kunskap i form av ökad förståelse för komplexiteten i att åstadkomma en elektrifiering av kollektivtrafiken men också en metod för att hantera samma komplexitet i ett utvecklings- och planeringsskede.

Projektet adresserar vidare avsnittet i område B som berör Bus Rapid Transit (BRT) då metoden är avsedd att tillämpas bl a på bussystem för stora resandeströmmar som bara kan hanteras av system liknande BRT t ex stombussar. Tanken har varit att testa metoden på en stombusslinje i Göteborg.

Projektet adresserar vidare avsnittet i område C och D som berör överföring av information mellan infrastruktur och fordon respektive terminaler och trafik. Exempelvis, behöver information utbytas mellan t ex hållplatser med laddningsinfrastruktur och fordon för att optimera laddningstider i förhållande till trafikläget. Vidare avser projektet att beröra vilket behov av information eller system som krävs för att kontinuerligt optimera eller balansera distributionsnätet vid en framtida fullt utbyggd elektrifierad busstrafik.

Projektet avser att beröra område E på så vis att metoden avser att tydliggöra och därigenom *minimera negativa effekter av interaktion mellan fordon och infrastruktur*. Projektet avser här att få fram en metod som belyser hur olika energiförsörjningsstrategier kan orsaka t ex oönskad väntetid vid hållplatsstopp. Olika strategier kan minska förekomsten av ”bunchning”, d.v.s. att bussarna p.g.a. systemeffekter kan komma att köra i klungor istället för att vara utspridda i tiden.

6 Resultat och måluppfyllelse

Nedan följer en redogörelse för i projektet uppnådda resultat per arbetspaket. I delavsnittet *Måluppfyllelse* redogörs för hur väl projektet har nått uppställda mål.

6.1 AP2 Omvärldsbevakning

Samtliga parter har deltagit i omvärldsbevakningen. Information om vad som händer i Sverige och utomlands inom området för elektrifierade bussystem har inhämtats dels genom aktivt sökande inom specifika intresseområden, då detta påkallats, dels genom att kontinuerligt ta del av nyhetskällor inom de egna organisationerna eller genom nyhetsbrev, tex Busstmagasinet, OMEV, electrive.com.

Genom ett aktivt deltagande under Nordic Electric Bus Initiatives (NEBI), där preliminära resultat från projektet presenterades, ökade exponeringen av projektet och genom de många kontakter som knöts ökade informationsflödet in i projektet. NEBI hölls i Göteborg 1-2 september 2015 av Lindholmen Science Park på uppdrag av Nordic Energy Research, VINNOVA och Energimyndigheten.

6.1.1 Databas över demolinjer och test med elbusstrafik

Som en del av arbetspaketet anlidade Martin Borgqvist på SP för hjälp med att skapa en databas för elbusstrafik runt om i världen men med ett fokus på det som händer i Europa. Databasen innehåller både exempel på busslinjer med enstaka bussar samt linjer där ett flertal eller samtliga bussar är elektriska. För närvarande innehåller databasen ett drygt 70-tal exempel där ett 50-tal är mer utförligt beskrivna.

Baserat på kontinuerlig omvärldsbevakning samt den mer fokuserade informationsinsamling SP stod för kan följande slutsatser dras:

- fler och fler elbussförsök planeras
- försöken blir mer storskaliga och långvariga - hela linjer elektrifieras
- 12 meters eller mindre bussar är vanligast men det finns exempel på elektrifierade 18-metersbussar
- det finns få exempel på helelektriska BRT/stombusslinjer – ett demonstrationsprojekt av elektrifierad BRT skulle troligtvis få stor uppmärksamhet
- projekten med ändhållplatsladdning blir fler och fler
- städers ambitioner inom området är tydliga och ambitiösa
 - o Paris har som mål att 80 % av alla 4500 stadsbussar ska vara elektrifierade 2025
 - o I London ska 2020 alla 300 single deck bussar vara emissionsfria (elektrifierade eller vätgas) och alla 3000 dubbeldäckare ska vara hybrider
 - o Eindhoven ska ha ett helt elektrifierat transportsystem 2020
 - o Istanbul ska ha 25 % elektrifierade bussar 2019
 - o Liknande mål med varierande men fortfarande hög grad av elektrifiering finns uppsatta för ett flertal städer, bland annat Oslo, Stockholm

I ett globalt perspektiv är depåladdade bussar med stora energioptimerade batterier absolut vanligast. Detta är kopplat till den tidiga utvecklingen av elbussar i Kina där dessa kraftigt subventionerats av två huvudsakliga skäl, den dåliga luftkvaliteten samt en aktiv industripolitik. Batteriteknik baserad på LiFePO₄ premieras.

Försöken med elbusstrafik i Europa kan indelas i två huvudsakliga kategorier: de som görs i samarbete med lokal fordonstillverkare eller industriparter och de som görs utan sådan medverkan. I den senare kategorin har det varit vanligt med småskaliga försök med en eller ett fåtal depåladdade, mestadels kinesiska, bussar som körts under en begränsad tid. Denna typ av försök har kunnat genomföras utan större investeringar i laddinfrastrukturen och har därför varit ett enkelt sätt att demonstrera elbussar för allmänheten.

Utvecklingen går nu mot en uppväxling av försöken till mer reguljär drift i större skala. Några exempel med depåladdade bussar från BYD är värda att nämnas. I Ängelholm trafikeras 2 linjer med totalt 5 BYD-bussar

sedan vintern 2015/2016. I oktober 2015 vann BYD en tender omfattande 9 bussar i Budapest och i London ska BYD och ADL gemensamt leverera 51 bussar till Transport for London¹⁵.

Ett hinder för upphandling och snabb adoption av ändhållplatsladdade elbussar i kollektivtrafiken är att det saknas en standard för laddinfrastrukturen. Ett europeiskt standardiseringsarbete har dock startats och en europeisk standard förväntas vara klar 2019 och därefter en internationell under 2020. För att underlätta för städer att anamma den nya tekniken har busstillverkarna, Irizar, Solaris, VDL och Volvo samt elinfrastrukturföretagen Siemens, ABB och Heliox gjort en överenskommelse att deras produkters gränssnitt ska vara kompatibla sinsemellan redan innan en standard finns på plats.

Slående för elbussutvecklingen i Europa är att de många mer eller mindre lokala testprojekt som lokala

6.1.2 Ökat intresse för analysmetoder

Vid tiden för ansökan konstaterades att det fanns ett behov av ett projekt likt vårt. Det enda exempel som förelåg var en artikel som beskrev en metodik för att välja utformning av energiförsörjningssystem i Berlin. Sedan projektstart har inte bara antalet försök och demonstrationsprojekt med elbussar ökat, ett flertal projekt liknande detta som nu slutrapporteras har identifierats^{16, 17, 18}.

I Tyskland erbjuder ebusplan, ett företag kopplat till RWTH Aachen, utbildningar och workshops, möjlighetsstudier, konceptutveckling och konsulting på temat elektrifierade bussystem¹⁹.

6.2 AP3 Specifikationer och förutsättningar

I detta arbetspaket definierades "spelplanen" och "reglerna" inom vilka olika elförsörjningsalternativ skall jämföras. För att kunna göra en jämförelse med olika alternativ och svara på vad som är en bättre lösning än en annan lösning så måste man dels ha definierat krav på vilken busstrafik som systemet skall fungera för. Kraven för busstrafiken förklaras i avsnittet *Specifikationer* nedan. Lösningen skall sedan även uppfylla vissa andra villkor, som inte i sig själva är direkta krav på busstrafiken, men som sätter gränser inom vilka lösningar måste hålla sig. Dessa faktorer som lösningarna skall hålla sig inom beskrivs under avsnittet *Förutsättningar*, och de kan liknas vid ytterlinjerna på spelplanen inom vilka alla spelare måste befinna sig. Till sist är det viktigt att definiera vad målet är, mot vilket de olika energiförsörjningslösningarna skall mätas. Till stor del är detta mål att de totala kostnaderna för att driva bussarna skall minimeras, men det finns även faktorer som inte kan mätas i pengar direkt, men som är positiva eller negativa vid en jämförelse mellan olika energiförsörjningssystem. Dess mål som lösningarna jämförs med beskrivs i avsnittet *Utvärderingskriterier* nedan.

6.2.1 Specifikationer

Som input till hela analysen är kravet på vilken busstrafik som skall utföras, vilka bussar som körs och när, hur många resande de har på olika sträckor och var busslinjer och hållplatser är förlagda.

I detta projekt så är detta inte föränderligt i analysen av de olika energiförsörjningssystemen, utan anses helt fast. Det finns så klart en möjlighet att en viss teknologi skulle göra det billigare att planera busstrafiken på ett annat sätt, t.ex. att flera små bussar skulle kunna bli billigare med en viss teknik. Den typen av anpassningar finns inte med i denna analys.

De huvudsakliga sätten att beskriva den busstrafik som skall utföras är att beskriva

- busslinjernas sträckning och höjd över havet, var de har hållplatser,
- hastighetsprofiler för bussarnas körning längs linjerna
- tidtabellen för när bussarna kör

¹⁵ <http://www.bussmagasinet.se/2015/10/byd-pa-europeisk-offensiv/>

¹⁶ Kunitz et al, *Optimization of fast charging infrastructure for electric bus transportation – Electrification of a city bus network*, EVS28 International Electric Vehicle Symposium, Goyang, 2015

¹⁷ O. Vilppo et al, *Feasibility of electric buses in public transport*, EVS28 International Electric Vehicle Symposium, Goyang, 2015

¹⁸ M. Rogge et al, *Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport - A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements*, *Energies*, DOI 10.3390/en8054587, 5(2015), 4587-4606.

¹⁹ <http://www.ebusplan.com/en/> - Your partner for the introduction of electric buses

- stopptider på olika hållplatser
- schemaläggning för hur enskilda bussindivider kör (bussomloppen)

Bussomloppen sågs till en början som en självklar del av den specifikation som alla system skulle följa, men allt eftersom analysen fördjupades blev det klart att det kan vara olämpligt att helt låsa bussomloppen, eftersom de olika typerna av energiförsörjningssystem fungerar olika bra beroende på detaljer i hur bussomloppen är planerade. Vi har i analysmetoden lagt till steg där bussomloppen kan anpassas efter olika energiförsörjningssystem och eftersom detta är ett steg som är en av nyckeluppgifterna då en bussoperatör planerar sin verksamhet så kommer det undersökas mer i detalj i ett uppföljningsprojekt.

Det finns även annan mer detaljerad information som inte har lika stor påverkan på valet av energiförsörjningssystem, men som kan vara bra att inkludera om man vill ha en mer noggrann dimensionering av systemen. Detta är bland annat:

- Antal passagerare på olika delsträckor och olika tider (då det påverkar energiförbrukningen)
- Utomhustemperaturer och deras variationer

6.2.2 Förutsättningar:

Förutsättningarna för att kunna bygga energiförsörjningen är olika för olika linjer och bör beskrivas innan man börjar analysera olika energiförsörjningsalternativ. Förutsättningar är till exempel:

- Var finns tillgång till elnät att ansluta bussarnas elförsörjning till?
- Hur dyrt det är att gräva för kablar och var man kan eller inte kan lägga kablar och bygga laddstationer eller annan utrustning.
- Rörliga kostnader för elenergi och effektuttag
- Fasta kostnader för att bygga och abonnera på en viss effekt
- Rasttider för förarna,
- Var man har problem med ljud och dålig luft (för eventuell analys av dual-mode bussar)

6.2.3 Utvärderingskriterier:

Det finns otroligt många olika kostnader förknippade med att bygga och driva busstrafik. Som tur är måste inte alla kostnader analyseras, utan det är bara de kostnader som skiljer sig åt mellan bussar med olika energiförsörjningsalternativ som måste analyseras. Exempel på viktiga kostnader att analysera är:

Kostnad för bussarna:

- Batterier
- Utrustning för att ta emot elenergin från infrastrukturen (Kontakt, strömavtagare, induktiv pickup),
- Eventuell generator/motor (APU – Auxiliary Power Unit) som backup till eldrift

Infrastrukturkostnader:

- Laddare/likriktare,
- Utrustning för att få över elenergin till bussarna (såsom stolpar med pantograf eller induktiv sändarspole),
- Eventuella lokala energilager för att minska den topp effekt som dras från elnätet
- Kablar för att ansluta till elnätet,
- Kostnad för uppkoppling mot elnätet (effektberoende) inklusive eventuell ny utrustning som behöver byggas,
- Eventuellt kabelnät som byggs bara för elförsörjningssystemet och som binder ihop och fördelar effekt mellan olika delar av elförsörjningssystemet.

Faktorer som inte uttrycks som kostnader:

- Skillnader i robusthet för fel och störningar (i görligaste mån dimensioneras systemen så att de skall vara lika i detta hänseende, men det är inte alltid möjligt fullt ut och eventuella skillnader behöver tas med i analysen)
- Enkelt utbyggbart system - Kan man bygga ut stegvis eller måste allt byggas på en gång?

- Robusthet
- Batterivikt - projektet har inte satt en kostnad på batteriets vikt och dess påverkan på antal passagerare bussen kan ta

De olika systemen skall så långt det är rimligt dimensioneras så att de uppnår samma funktion och liknande robusthet. Det betyder att det kan behöva ske små ändringar i turlistorna för att ge tid för viss laddning. När sådana ändringar görs så skall merkostnader för dem inkluderas. Det kan vara merkostnader i form av behov av en extra buss, extra laddare i backup, lön till förare om bussen måste stå still extra länge, restidskostnad om restider för passagerare påverkas. De extrakostnader, särskilt lönekostnader, som uppstår om restider eller stilleståndstid ökar är så höga att det nog är sällsynt att det skulle vara värt att sänka genomsnittshastigheten eller låta föraren vänta extra under laddning. Robusthetsanalys görs i en separat delrapport.

6.2.4 Kostnadsmodeller

Det finns flera möjliga problem med att skapa kostnadsfunktioner bara utifrån prisuppgifter och prisuppskattningar som man får från företag, och beroende på hur man skall använda sina prismodeller och vilka slutsatser man vill dra från sin studie så kan det finnas flera möjliga sätt att bygga sina kostnadsmodeller. Några orsaker till att man kan få problem är till exempel att:

- Priser på en omogen marknad ofta initialt sätts av kundens värde av produkten och inte av kostnaden för produkten. Med tiden så kommer dock konkurrens mellan olika leverantörer leda till att priserna sjunker ner mot produktionskostnaden.
- Om man skall bygga långsiktiga strategier baserat på analysen, så är det inte dagens prisbild som man vill ha, utan en framtida prisbild. Speciellt för produkter som är specialutvecklade för den tillämpning man analyserar så kommer försäljningsvolymerna och därmed priserna att påverkas av vilken strategi man väljer. Därmed så behöver man anta att priset för varje system man analyserar gäller just om det systemet också blir en av huvudstrategierna som de flesta aktörer väljer.
- Om man vill dimensionera delar i ett system så är det också viktigt att kostnadsfunktionen ger rättvisa relativa skillnader mellan olika storlekar på samma komponent. Det kan alltså vara viktigare att variation i priser för olika komponentstorlekar är någorlunda rätt, än att prisnivån är helt korrekt. Det beror dock så klart på vad för slutsatser man vill dra.

I detta projekt har vi avsett att göra ett analysverktyg som skall vara underlag för långsiktiga strategier för utveckling och uppbyggnad av infrastruktur för att försörja bussar med el. Eftersom det är stor skillnad på komponentstorlek mellan de olika system vi jämför så gör det att vi lägger hög vikt vid att prisets förändring med storlek är rimligt och speglar den långsiktiga variationen om produkterna och tillverkningen anpassas för just de storlekar som väljs. Vi vill alltså inte modellera de kostnadssteg som ofta förekommer då en marknad är anpassad till en viss typisk storlek på en komponent.

I vårt analysverktyg bygger vi därför kostnadsmodeller i första hand utifrån vissa teoretiska resonemang, istället för att kurvanpassa till de prisuppgifter man får på dagens marknad. De prisuppgifter vi har använts dock till att justera nivåer på priserna i de mer teoretiska modellerna.

Principer för de antagna kostnadsmodellerna:

- Pris skall alltid öka med ökande storlek. Det finns fall då detta inte gäller i verkliga inköp.
- Trappstegseffekter i priset bortses från i vårt verktyg som är avsett för att analysera vitt skilda system, på lång sikt.
- Priser går inte linjärt mot noll då komponentstorleken minskar, utan priset per storleksenhet ökar då storleken minskar. Hur stor denna effekt är beror på typen av komponent som analyseras. Om komponenten har dyra kring-system i form av t.ex. ett styrsystem med många sensorer och ställdon som inte förenklas då komponenten blir mindre så blir priset per storleksenhet mycket högre för små komponenter än för stor. För andra system, som har få delar som inte beror på storleken, så kommer priset per storleksenhet variera mindre med komponentens storlek.

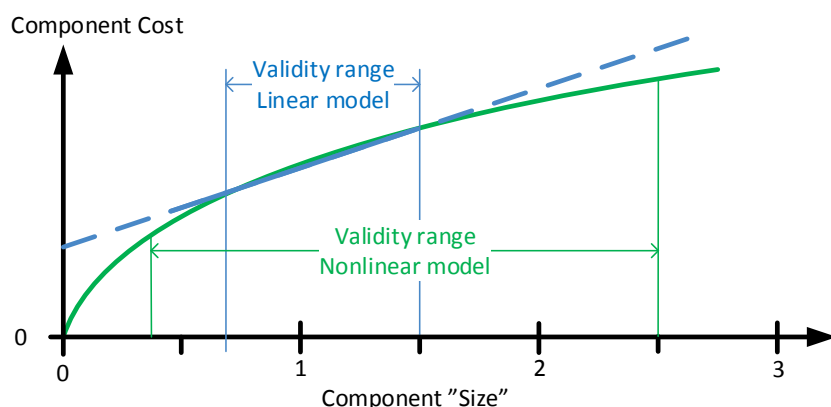
Det finns stora osäkerheter i kostnadsmodellerna, vilket måste hanteras genom att göra en robusthetsanalys med relativt stor variation i de antagna priserna.

Det finns ofta trappstegseffekter som gör att kostnaderna inte stiger konstant utan istället kan vara relativt konstant inom ett område, för att sedan ta ett steg uppåt då man gör en större ändring i konstruktionen för att klara högre effekter. Till exempel så kan man i kraftelektronik behöva parallellkoppla flera transistorer för att komma över en viss effektnivå.

Dessa trappstegseffekter har vi valt att inte ta med i vår analys, på grund av att de inte nödvändigtvis speglar hur kostnadsbilden på lång sikt blir, för om man antar att en viss storlek på laddare blir lämplig för bussar så kommer komponenter tas fram för just den storleken och konstruktioner optimeras om för det. Då kommer trappstegseffekter att försvinna med tiden.

Ofta så finns det även en startkostnad som kan vara ganska hög, till exempel för att bygga en laddare. Det kan vara kostnader för styrsystem, anslutningspunkt till elnät, fundament med mera. Dessa kan verka oberoende av storleken, men ser man på andra existerande teknologier så är dessa startkostnader lägre på små system än på stora. Det gör att priscurvan inte är linjär utan mer ser ut som den gröna kurvan i Figur 1 nedan.

Om effektområdet som analyseras inte varierar allt för mycket så är det rimligt att använda en linjär kostnadsfunktion, som den blåa kurvan i Figur 1. Den linjära kostnadsmodellen har oftast ett begränsat giltighetsområde, t.ex. variation på 2-3 gånger i storlek. En olinjär modell fungerar normalt bra i ett betydligt större intervall, men skall även den användas med viss försiktighet då man går utanför det område som man har prisuppgifter för.

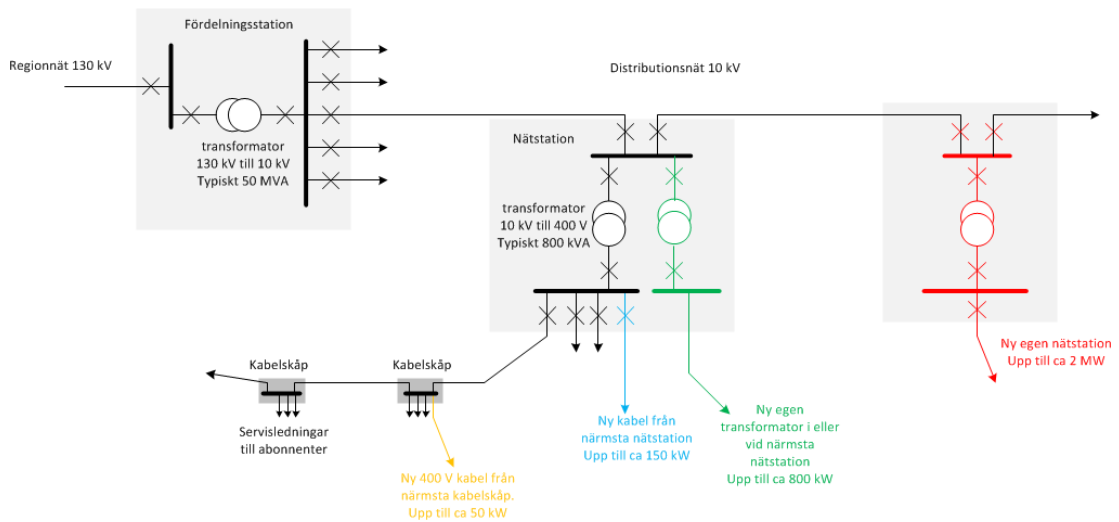


Figur 1 Exempel på skalning av kostnader för en komponent när storleken ändras.

Ett bra exempel på kostnader som oftast har mycket tydliga trappsteg är kostnaden för att dra fram el till laddare. Trappstegen beror på att man oftast kan hitta en möjlig anslutningspunkt närmare den önskade laddarplatsen ju lägre effekt man skall kunna ansluta. Några exempel på steg i elanslutningskostanden är följande:

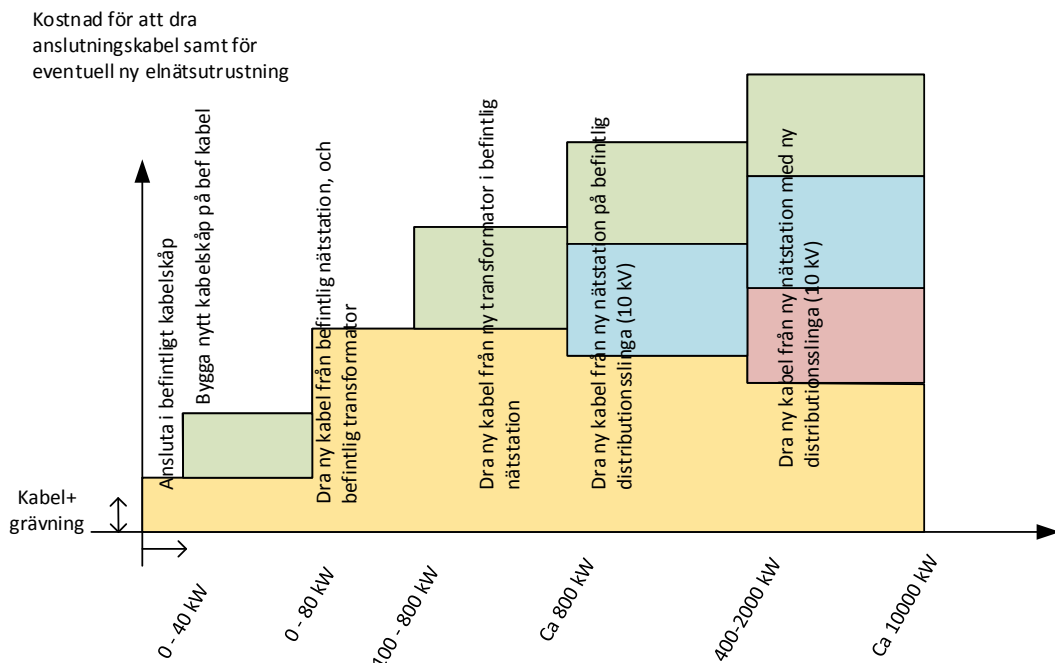
- Ansluta till närmsta 400 V kabelskåp (om det finns ledig kapacitet på kabeln) typiskt 20-50 kW, typiskt avstånd ca 50-100 m
- Dra egen ny 400 V kabel från närmsta nätstation (om det finns ledig kapacitet i trafo) typiskt 150 kW (med dubbla kablar 300 kW), typiskt avstånd 100-500 m.
- Egen ny trafo i befintlig nätstation (om det finns plats) 500-1250 kW eller så byggs den precis bredvid befintlig nätstation
- Egen ny nätstation + egen ny 10 kV matning till den upp till 2500 kW

I Figur 2 nedan visas några av de olika alternativen för anslutning till elnätet.



Figur 2 Exempel på olika elanslutningspunkter i ett elnät, och olika behov av att bygga ny utrustning (de färgade delarna är nybyggda).

Beroende på att det finns tydliga steg i hur anslutningen måste göras, beroende på hur hög effekt som skall anslutas så får man typiskt en kostnadsfunktion som liknar trappstegen i Figur 3 nedan. Notera att steg kommer vid olika effekter på olika ställen, beroende på hur elnätet är utbyggt och vilken outnyttjad kapacitet som finns på olika platser. Det är inte heller självklart att alla stegen finns på alla ställen. Om det, till exempel, inte finns någon outnyttjad kapacitet så kan man redan vid låga effekter behöva ta till steget att bygga helt ny nätstation. Trots att elanslutningskostnaden har så tydliga steg så har vi hittills valt en linjär modell. Dels för att man inte kan välja systemlösning efter kostnadsstegen på en enskild laddarplats, utan valet av systemlösning behöver fattas baserat på "medelkostnader" för de olika laddarplatser som är aktuella, och då kan man anta att trappstegen ligger olika på olika ställen och därmed blir den genomsnittliga kostnaden mer utjämnad.



Figur 3 Exempel på kostnadstrappa för att ansluta laddare med olika effekt till elnätet.

6.3 AP4 Beskrivning av alternativa energiförsörjningstekniker

Arbetet har bestått av att beskriva de olika tekniker som kan användas för att överföra elektrisk energi till fordonen och som har behandlats under projektet. Vissa tekniker skiljer sig i sin principiella funktion men har ändå samordnats inom en kategori eftersom de har kunnat modelleras på samma vis. De olika

energiförsörjningsalternativen har kategoriserats efter var någonstans som energin överförs till fordonet och inte hur. Om överföringen av energi exempelvis skedde konduktivt eller induktivt har därför kunnat hanteras på samma sätt i modellen. Parametersättningen av de ingående komponenterna som på något sätt påverkar kostnader eller har påverkan på driften har däremot gjorts för respektive kategori. Projektet har av praktiska skäl huvudsakligen fokuserat på parametersättningen av de energiförsörjningstekniker som finns kommersiellt på marknaden.

6.3.1 Depåladdning

Elbussar konstruerade för laddning vid depån har generellt idag en batteriräckvidd på upp till 300 km på en laddning under gynnsamma förhållanden, vilket kan vara tillräckligt för att genomföra en hel dags transportarbete. Busstypen har en användningskaraktäristik som liknar en buss med förbränningsmotor i den meningen att laddning endast behövs någon eller några gånger per dag. Inga laddare är nödvändiga längs rutten som körs. På grund av räckvidden är det en mycket flexibel elektrisk buss när det gäller förmågan att anpassa sig till olika busslinjer och möjligheten att ersätta en traditionell innerstadsbuss utan ändringar av sträckningen. I depån behövs en laddare per buss med tillräcklig effekt för att i huvudsak ladda batteriet under natten men också för att eventuellt hinna fylla på det igen under dagen beroende på tidtabell. Det energioptimerade batterikemin, LFP eller NMC, är optimerad för att möjliggöra lång elektrisk räckvidd och låg vikt. Kapaciteten varierar vanligtvis mellan 250 och 350 kWh men bort emot det dubbla förekommer.²⁰ Trots ett högt effekt-viktförhållande så upptar batteriet en stor del av bussens tyngd men även en stor volym. Storleken och vikten påverkar energiförbrukningen och även antalet tillåtna passagerare ombord.

Batteriets storlek och därmed räckvidd har stor påverkan på kostnaden för denna typ av buss. Om bussens räckvidd inte är tillräcklig för ett helt dagspass krävs dessutom att bussen återvänder till depån under dagen vilket driver kostnaden för förartimmar, antal körda mil och eventuellt antalet bussar. Behöver bussarna laddas under dagen fordras laddare med förhållandevis hög effekt för att minska stilleståndstiden. Batterikemin är sådan att den inte tillåter väldigt snabb laddning och batteristorleken bör dimensioneras för att tåla den högre effekten och en extra laddning per dag. Trots att bussarna laddar relativt långsamt under natten så innebär det ändå inte att kostnaden för elanslutningen blir försumbar eftersom alla bussar laddar samtidigt.

6.3.2 Laddning vid ändstationerna

Återkommande laddning vid ändstationerna tillåter bussen att bära ett mindre batteri, vanligtvis omkring 50 till 90 kWh.²¹ Batteriet är oftast överdimensionerat jämfört med behovet för en envägsresa för att göra det möjligt för bussen att av något skäl hoppa över en laddning. Batterikemin för den snabba laddning som krävs är ofta LTO som är optimerad för hög effekt. Nackdelen med denna batterikemi är att den är både tyngre och dyrare än andra kemier optimerade för energitäthet. Laddning av batteriet tar vanligtvis mellan tre till sex minuter beroende på storleken på batteriet och effekt som installeras i laddaren. Längre sträckor kräver större batterier och även längre laddningstider eller högre laddningsström. Den effekt som installeras är vanligen mellan 150 och 500 kW per laddare.²² Högre effekt innebär kortare stopptider men kan ha en inverkan på batteriets livslängd. Den tid som krävs för att ladda påverkar också antalet bussar som kan ladda varje timme. Eftersom flera bussar kan dela på en och samma laddare kan laddinfrastrukturen utnyttjas mer effektivt än vid exempelvis nattladdning.

Så länge ändstationerna är de samma och längden på rutten är ungefär oförändrad är den ändhållplatsladdade bussen flexibel och kan hantera omdirigeringar. Att starta en busslinje med ändhållplatsladdning kräver däremot planering för att identifiera och installera laddare på lämpliga platser. Laddare kan i princip placeras var som helst längs rutten, men det är oftast mest fördelaktigt vid ändstationerna för att så få passagerare som möjligt ska behöva vänta på att laddningen ska bli klar. Busstypen lämpar sig därför sämre på linjer som saknar naturliga ändhållplatser såsom exempelvis

²⁰ NOW-gmbh, *Projektübersicht 2015/16 Hybrid- und Elektrobus-Projekte in Deutschland*, https://www.now-gmbh.de/content/5-service/4-publikationen/1-begleitforschung/now_projektuebersicht_bus_web.pdf, accessed on 2016-03-24

²¹ Solaris, *Urbino 18 electric*, https://www.solarisbus.com/vehicle/urbino-18-electric#goTo|urbino1_scene1, accessed 2016-03-24

²² Heliox, *Opportunity charging*, <http://heliox.nl/opportunity-charging>, accessed 2016-03-24

ringlinjer. Tidtabellen kan dessutom behöva justeras för att tillåta de något längre väntetiderna vid ändstationerna. Den höga effekten och den autonoma laddningen kräver en automatiserad kontakt för att ansluta mellan buss och laddningssystemet.

Det som främst är kostnadsdrivande för denna typ av buss är tiden som bussen behöver stå still och ladda efter varje rutt. Laddtidens längd kan påverka kostnaden för antalet väntande förare samt ett eventuellt ökat antal bussar som behövs för att bedriva trafikarbetet. En kort laddtid måste ställas mot kostnaden för att öka laddarnas effektöverföringskapacitet. Även batteritypen som krävs för att hantera de höga laddströmmarna har ett relativt högt pris i förhållande till lagringskapaciteten.

6.3.3 Laddning vid busshållplatser

Med laddare placerade på flera hållplatser kan tiden då passagerare stiger på och av också användas för att överföra tillräcklig energi till bussen. Ingen ytterligare stopptid för laddning krävs därför under dagen. Med kortare avstånd mellan laddningstillfällen kan de effektoptimerade batterierna göras ännu mindre, typiskt mellan 30 till 40 kWh.²³ Emellertid kan batteriet inte göras extremt litet eftersom det måste vara tillräckligt stort för att hantera den höga effekten och de många laddcyklerna per dag. Storleken på batteriet måste också vara tillräckligt för att hantera fel, såsom att en laddare tas ur drift eller att ändringar görs på rutten. På grund av den kortare batteriräckvidden blir ett bussystem som laddas vid ändhållplatser begränsat till utvalda linjer med endast kortare ändringar.

Konceptet kräver laddare med hög effekt installerade längs vägen. För att minska kostnaderna för nätanslutning kan laddarna förses med energilagring, såsom en superkondensator. Det lokala energilagret kan då laddas med en låg ström när det inte finns någon buss vid hållplatsen och sedan snabbt överföra energin till bussen när den anländer.

Till skillnad från ändhållplatsladdade bussar påverkar längden på rutten inte batteristorleken som normalt bara behöver nå till nästa stopp. Antalet laddstationer kommer emellertid att öka med längden på rutten. Denna typ av bussystem är sannolikt mest lämplig på sträckor med mycket tät busstrafik för att utnyttja laddarna i hög grad. Laddning vid busshållplatser kräver en automatisk kontakt, precis som för bussar som laddas på ändstationer. Det korta fönstret för laddning ställer höga krav på att kontakten snabbt kan ansluta till bussen och överföra energi med hög effekt.

Antalet laddare och det faktum att relativt hög effekt överförs under kort tid får till följd att investeringar i laddstationerna blir förhållandevis kostsam. Beroende på den befintliga tillgången på effekt i elnätet blir antingen kostnaden för att bygga ut elnätet eller installera energilagring vid laddstationerna ytterligare stora kostnadsposter. Trots att batteristorleken har kunnat minskas innebär batteritypen som krävs för att hantera de höga laddströmmarna att batteriet ändå blir relativt dyrt.

6.3.4 Laddning under färd

Laddning medan bussen kör tar bort eventuell extra stilleståndstid för att ladda batteriet. Energiöverföringen sker exempelvis genom luftledning eller trådlöst med induktiv teknik. Den induktiva energiöverföringstekniken kan döljas i vägen till skillnad från luftledning som sannolikt liknar luftledning för trådbussar.

Storleken på batteriet som krävs beror på längden av den väg som inte är elektrifierad. Förhållandet mellan det elektrifierade avståndet och hela ruttens längd avgör också om batteriet bör optimeras för hög effekt eller hög energi. Bussarna är begränsade att spendera en viss minsta tid i laddningsläge för att hinna ladda tillräckligt med energi för att klara resterade delen av rutten. Bortsett från denna minsta tid är det möjligt att göra avvikelser från rutten. Det är däremot svårt att flytta eller ändra på en rutt. Detta fenomen beskrivs ofta i spårvägssammanhang som spårfaktorn. Om flera bussar befinner sig på samma sträcka kan de laddas samtidigt förutsatt att tillräcklig kapacitet finns tillgänglig.

Att bygga laddinfrastruktur längs med en sträcka kan vara kostsamt beroende på längden och effektöverföringskapaciteten och bussarnas batteristorlek. Batteritypen och dess kostnader påminner i övrigt

²³ Olivier Augé, *Project TOSA 2013, Proceedings of UITP, Geneva, Switzerland, 26-30 May, 2013*

om de för bussar som laddas vid ändhållplatser. Om flera linjer delar på laddningen längs med en gemensam delsträcka kan det uppstå svårigheter att planera ett körschema som inte leder till att bussarna tvingas köra onödigt ofta. Beroende på energiförsörjningstekniken bör också risken för tidsförluster beaktas som uppstår till följd av att bussen behöver stå still för att återansluta till elnätet efter att ha kört på en sträcka utan elnät eller tvingats att köra om en annan framförvarande buss.

6.3.5 Batteribyte

Principiellt påminner en batteribytesstation om en laddare med en väldigt hög effekt som kan ladda batteriet på kort tid och skulle därför på så vis kunna analyseras av modellen. Den korta "laddtiden" sker på bekostnad av ökade batterikostnader till följd av det ökade antalet batterier som behövs. Batteribyte har inte analyserats i detalj delvis för att ingen fordonstillverkare i Europa erbjuder tekniken men också för att den ställer krav på affärsmodeller och systemfrågor som inte kan hanteras av modellen. Lösningen förutsätter exempelvis de skrymmande batteribytesstationer som ska kunna finnas i närheten av rutterna som trafikeras. För att flera bussar, från potentiellt olika tillverkare, ska kunna utnyttja samma batteribytesstation krävs vidare att storleken och gränssnitt för batteriet standardiseras. Det kan även finnas en risk att batteriinvesteringen behöver kunna särskiljas från själva bussen om ett batteri inte "tillhör" en buss.

6.3.6 Elvägar

Elvägar är en teknik för laddning under färd som innebär att energilagret på fordonet kan minskas på bekostnad av att infrastrukturen för energiöverföring byggs ut. Elvägar förknippas ofta med stora vägar och motorvägar mellan städer men liknar principiellt tekniken laddning under färd. Det som skiljer elvägar från annan laddning under färd är att den är tänkt att nyttjas av andra tunga fordon och potentiellt även personbilstrafik vilket skulle medföra att flera kan dela på kostnaden för infrastrukturen. Det ska även vara möjligt att automatiskt ansluta till elvägen i högre hastigheter. Denna teknik ligger flera år fram i tiden och ställer krav på utvecklade affärsmodeller. Busstrafik mellan städer har inte varit fokus i projektet och elvägar har därför inte undersökts mer noggrant.

6.4 AP5 Modellering och analys

I detta avsnitt så presenteras först hur analysprocessen är uppbyggd och i vilken ordning olika steg i analysen görs. Sedan presenteras modelleringen av funktionen hos energiförsörjningssystemet, och hur simuleringsmodellen för det är uppbyggd. Till sist förklaras den ekonomiska modellen för att räkna ut total kostnader för de olika energiförsörjningsalternativen.

6.4.1 Analysprocessen

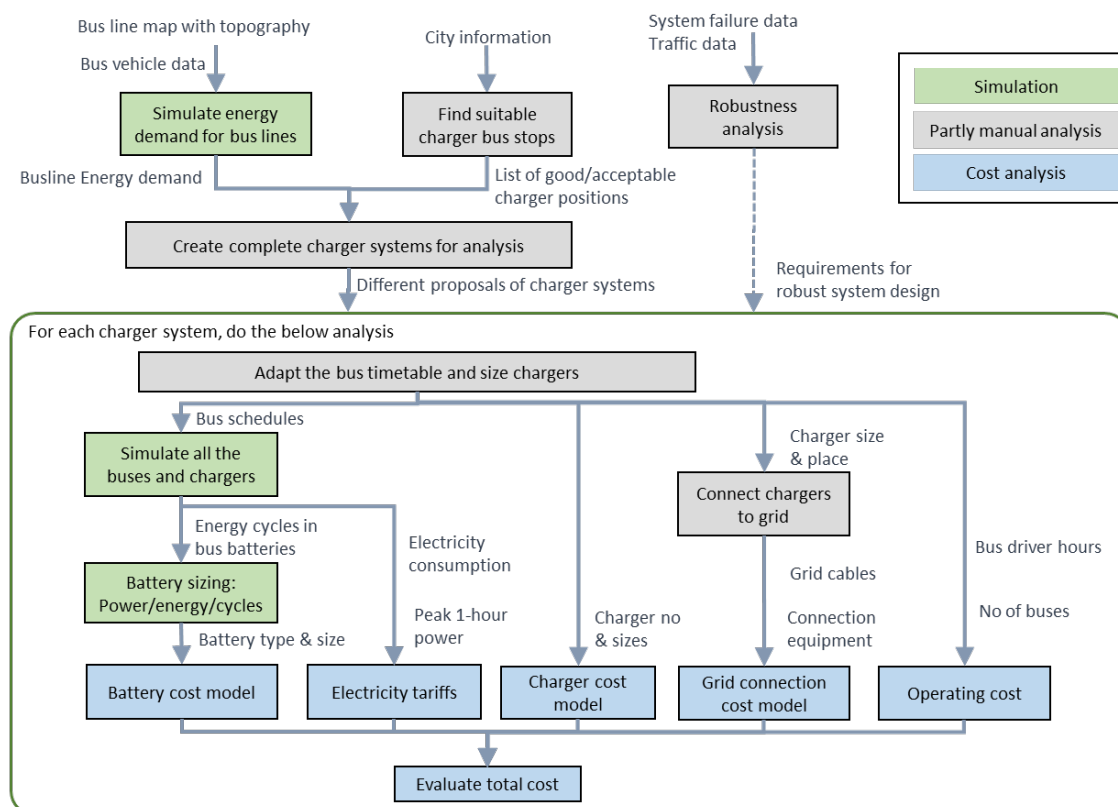
I Figur 4 nedan visas en översikt av de olika stegen i analysprocessen och hur de hänger ihop.

Analysprocessen startar från de specifikationer och förutsättningar som har bestämts för den eller de linjer som skall analyseras. De huvudsakliga stegen är:

- Att simulera fram energiförbrukningen längs de analyserade busslinjerna. Notera att det bara är förbrukad energi som beräknas, och laddning är inte inkluderad. Denna förbrukningsprofil utgör sedan ett underlag då man skall välja placeringar för laddare.
- Parallellt med beräkningen av energiförbrukning så analyseras hur lämpliga olika hållplatser är för laddare. Det är ett flertal olika aspekter som skall bedömas, som hur lätt det är att bygga laddaren, hur bussarna använder hållplatsen och hur väl en laddare kan utnyttjas på den platsen.
- Kunskapen om olika laddarplaceringar och energiförbrukningen längs linjen används för att välja placering av laddare. Typiskt kan man ta fram flera olika alternativa förslag till laddarplaceringar som sedan jämförs genom att analysera dem i de följande stegen.

Analys av valda laddarförslag:

- För varje förslag på laddarplacering så kan det behövas att göras justeringar i tidtabell och bussomlopp för att kunna utnyttja de laddare som analyseras. Det ger ju inte så bra förståelse för de olika förslagen om de analyseras för en tidtabell som är direkt olämplig för ett visst förslag.
- Baserat på de tidtabeller och bussomlopp som tagits fram så simuleras bussarna över en eller flera dagars trafik som valts för att vara representativ för all körning bussarna gör. Resultaten från detta är batteriernas laddningsprofiler över dagen för alla bussarna och alla de olika laddarnas effektöverföring under hela dagen.
- Energiprofilerna för batterierna används sedan för att dimensionera ett batteri som klarar alla olika kraven med önskad livslängd. Förutom energiprofilerna så baseras dimensioneringen även på krav på effekt både för att ladda och att köra bussarna, samt robusthetskrav om hur många laddningar en buss skall kunna missa utan att köra slut på batteriet.
- I ett parallellt steg till simuleringen av bussar och laddare så analyseras elanslutning av laddarna som valts. Den analysen avgör på vilket sätt laddarna kan anslutas och vilken nybyggnad som krävs i elnätet för att ansluta dem.
- Då alla ovanstående steg är gjorda så finns informationen som krävs för att beräkna kostnader. Kostnaderna är uppdelade på nedanstående delar:
 - Batterikostnad, som bestäms av antal bussar och storlek på batteriet, samt eventuella batteribyten.
 - Eltariffer, som är de kostnader som man betalar löpande för elabonnemang och energi samt effektavgifter. Dessa baseras på den effektprofil som simuleringen ger för varje laddare.
 - Laddarkostnad beräknas från antal laddare och deras storlek och typ
 - Elanslutningskostnad beräknas från de anslutningssätt som analysen visat krävs.
 - Driftskostnad beräknas från antal bussar som krävs, hur många timmar och kilometer de kör och hur många förartimmar som krävs.
- Till sist sammanställs totalkostnaden, och eventuella andra skillnader mellan systemen för att kunna visa hur bra de olika alternativen är.



Figur 4 Analysprocessens olika steg och hur de hänger ihop.

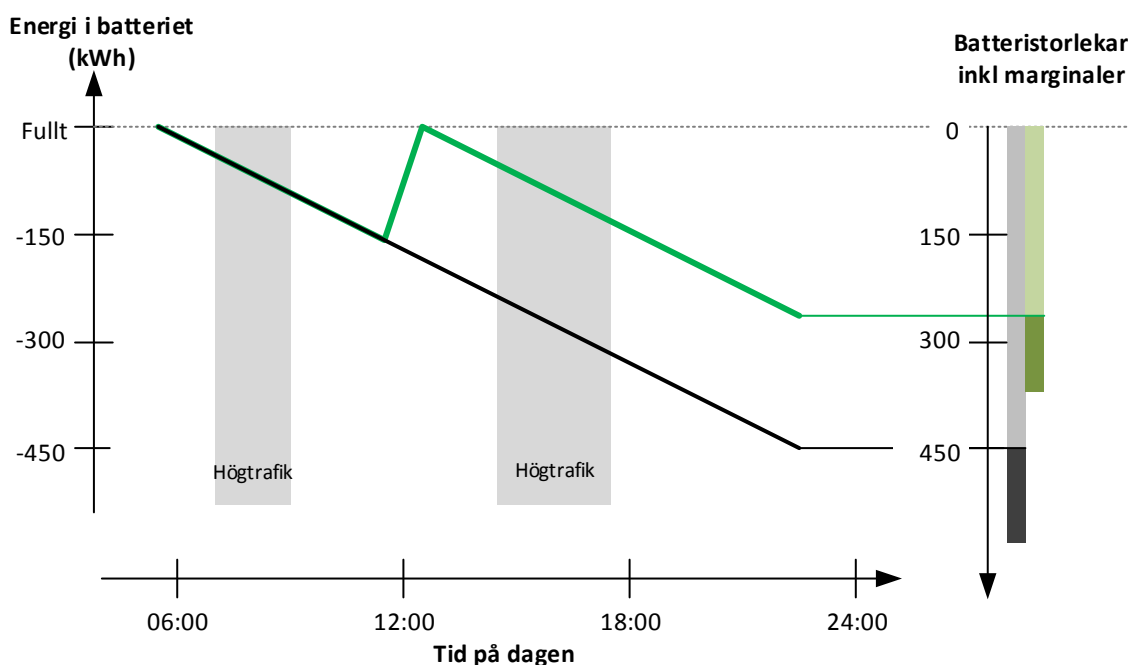
6.4.2 *Modell av energiförsörjningssystemet och bussarnas funktion*

Huvudprincipen för att analysera och simulera funktionen hos laddarsystemet och bussarna är en effekt- och energiflödesbaserad modell, som visas i Figur 5. Denna modell visar vilka olika delsystem som inkluderas i analysen och hur deras energiflöden kopplar till varandra. På många sätt är denna modell en relativt enkel modell att simulera, men det som är ovanligt och komplicerat är att bussarna hela tiden byter vilka laddare de är kopplade till. Det betyder att det inte finns någon fast fysikalisk modell som säger hur de olika storheterna kopplar till varandra, utan modellen byter hela tiden struktur allt eftersom tiden går och bussarna kör runt. Denna komplexitet hanteras genom att vi definierar en korskopplingsmatris som talar om vilken buss som kopplar till vilken laddare. Denna korskopplingsmatris kommer alltså varieras med tiden över hela dagen och den bestäms av bussomloppen och laddarplaceringen. Som tur är kan den beräknas i förväg, och under själva simuleringen så behöver simuleringsprogrammet bara läsa av ur matrisen. Den blir alltså mycket stor, men ändå relativt lätt att använda.

Ett viktigt delresultat i analysen är den energi som bussarna förbrukar över dagen, och utifrån den och vilka laddare som finns kan man räkna ut hur energin i batteriet varierar över dagen.

Depåladdning bara på natten: Först kan man beräkna den energi som bussen behöver för att köra hela dagen och hur den varierar över dagen. En typisk energiförbrukning under dagen kan då se ut som den svarta kurvan i Figur 6. Den visar att med bara laddning på depån under natten skulle det behövas minst ett batteri om 450 kWh för att energi skall räcka. För att klara av åldring av batteriet och lite andra osäkerhetsfaktorer så behöver batteriet göras större än den energi som man får fram med energikurvan. I Figur 6 visas det som att det läggs på lite marginal på batteristorleken. Lite förklaring om hur man kan bedöma denna marginal framgår i ett senare avsnitt.

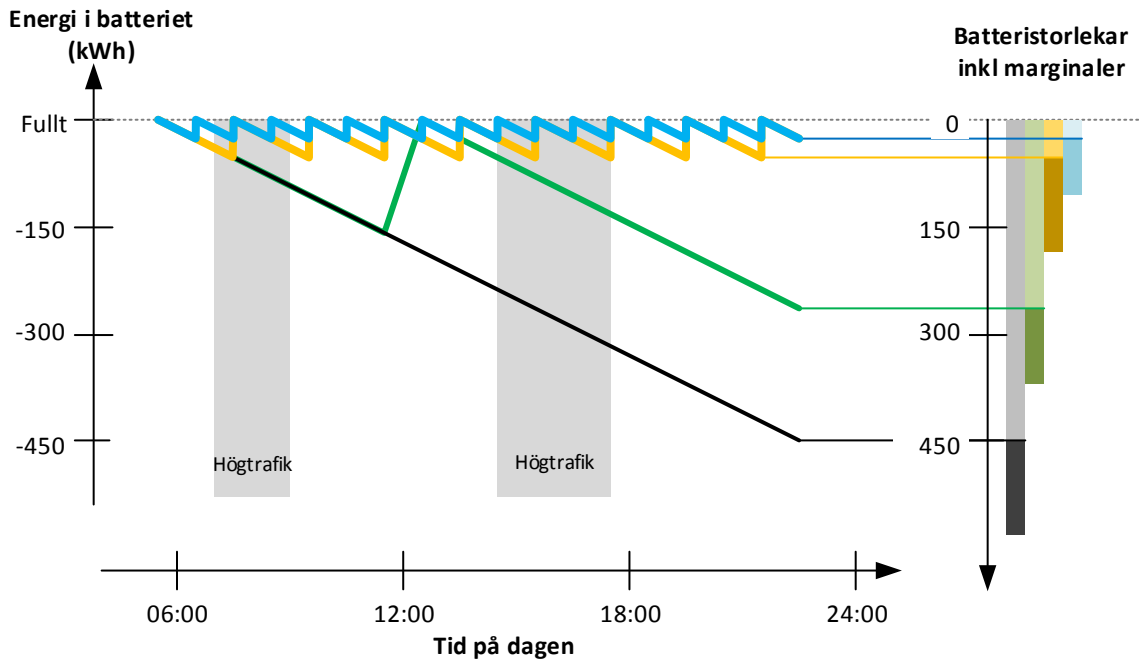
Depåladdning på natten samt extra laddning vid depån under lågtrafik mitt på dagen: Med detta sätt att ladda bussarna så kör bussen till depån under lågtrafik, mitt på dagen, och laddar upp batteriet innan den kör ut i trafik igen. Man får då den gröna energikurvan i Figur 6 för batteriet, och som man kan se så har den mindre variation av batterienergi över dagen och följaktligen kan batteriet göras mindre. I detta fall räcker teoretiskt ca 250 kWh, fast med lite marginal skulle mer än 350 kWh krävas.



Figur 6 Energi i batteriet över en hel dag för nattladdade bussar (svart), respektive bussar som nattladdar samt laddar extra i depån under lågtrafik mitt på dagen (grön).

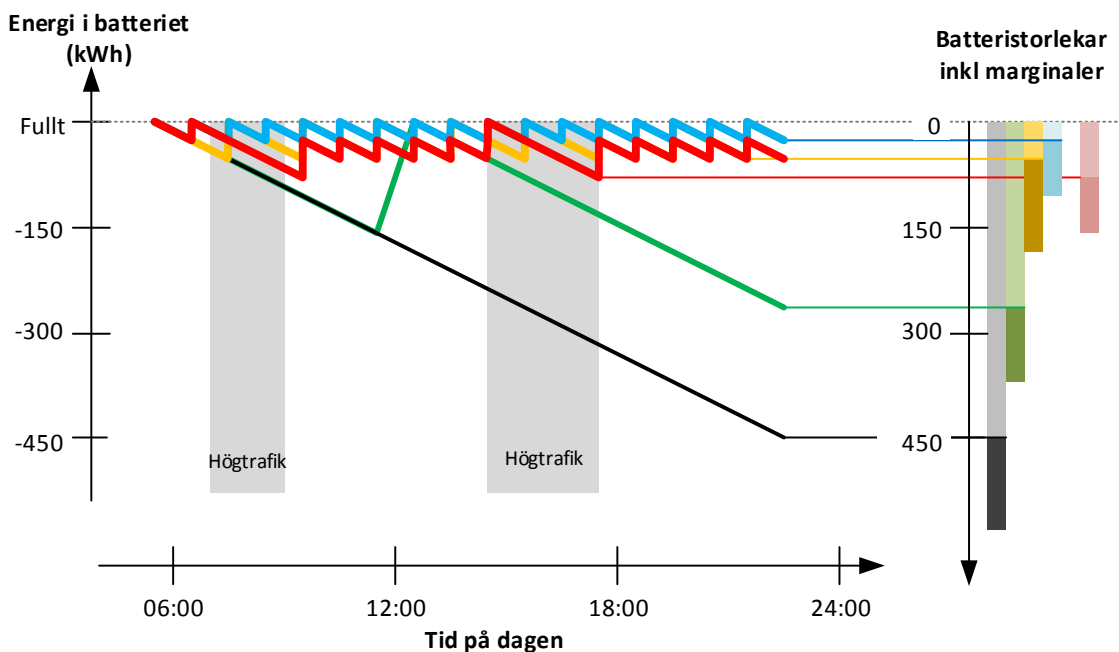
Nästa steg är att ha en laddare bara på ena ändhållplatsen: Med denna lösning så fylls batteriet på helt varje ToR längs linjen och eftersom denna buss hinner köra ca 8 ToR under dagen så blir batteriets energicykler nu ca 8 ggr mindre än med nattladdning. Denna lösning visas som den orange:a linjen i Figur 7. Med denna lösning så reduceras storleken på batteriet väsentligt jämfört med depåladdning, men istället blir antalet laddningscykler ca 8 ggr högre, vilket påverkar behovet av batterimarginal.

Att ha en laddare på vardera ändhållplats: Det ger ytterligare en halvering av storleken på varje energicykel, och istället dubblas antalet cykler. Detta visas med den blå energikurvan i Figur 7.



Figur 7 Energi i batteriet över en hel dag för bussar som laddar på en ändhållplats (orange), respektive båda ändhållplatserna (blå).

Det finns en nackdel med att ändhållplatsladdning kan kräva längre stilleståndstid och därmed kan det krävas fler bussar för att upprätthålla önskad turtäthet. Detta är kritiskt framför allt under högtrafik då alla bussar normalt måste köra hela tiden för att hålla turtätheten. Det kan gå att råda bot på detta genom att ha ett system med ändhållplatsladdare i båda ändar av linjen, men inte utnyttja dem under högtrafik, utan bara ladda tidigt på morgonen, mitt på dagen, eller på kvällen. Med den strategin får man den röda energicykelkurvan i Figur 8. Denna kräver en batteristorlek som är lite större än vid ständig laddning på båda ändhållplatser, men istället kan man minimera antalet bussar genom att man i högtrafik, då man har högst turtäthet, inte tillåter laddning.



Figur 8 Energi i batteriet över en hel dag för bussar som laddar vid båda ändhållplatserna, utom just under rusningstrafik.

6.4.3 Batteridimensionering

Eftersom energicyklerna för batteriet blir helt olika för olika typer av laddarsystem så kommer batterierna behöva dimensioneras olika för de olika systemen. Eftersom vi skall jämföra kostnader för systemen, för att hitta den bästa lösningen, så är det ju mycket viktigt att systemen också har jämförbar prestanda och jämförbar livslängd. Batteridimensioneringsdelen av metoden har till uppgift att se till att batterierna anpassas till de olika laddarsystemen just så att de skall ha samma prestanda och samma livslängd. Det är många faktorer som påverkar batteriets dimensionering och de måste alla beräknas för att kunna svara på vilket som är det minsta batteri som kan användas med ett visst laddarsystem och ändå uppfylla prestandakrav och livslängd. De faktorer som tas med i batteridimensioneringen i denna metod är:

- Åldring på grund av antal och djupet hos de olika energicyklerna i batteriet.
- Effektkrav för laddning som sätter en minimistorlek på batteriet som beror på laddarnas effekt.
- Effektkrav för körning av bussen som beror på bussens vikt, men inte påverkas av laddarsystemet annat än om batterierna blir så stora att de påtagligt påverkar bussens vikt.
- Variationer i energiförbrukning beroende på olika utetemperatur eller trafikförhållanden. Dessa kan antingen vara med genom att bussarnas battericykler simuleras fram för olika dagar, med olika temperatur och olika stor mängd förseningar. Om man gör så kommer temperaturberoendet automatiskt med vid dimensionering för olika cykeldjup. Man kan även hantera variationerna p.g.a. temperatur och trafik genom att uppskatta hur mycket det ökar en battericykel och bara lägga till det vid dimensioneringen av batteriet.
- Robusthetskrav (t.ex. att kunna missa en laddning utan att få problem att följa tidtabellen)
- Förlust av kapacitet under livslängden. Detta gör att batteriet bara får dimensioneras så att det i extremfallen använder max så stor del av batteriets kapacitet som batteriet har kvar vid slutet av sin livslängd. Traditionellt så räknar man med att det är 80% av kapaciteten då batteriet var nytt.

6.4.4 Kostnadsfunktion

Kostnadsberäkningen har gjorts i två steg där den initiala investeringen har beräknats först och därefter en beräkning av årliga kostnader. Den initiala investeringen för bussystem med batteridrivna fordon är idag högre jämfört med motsvarande bussystem med bussar utrustade med förbränningsmotorer. Siffrorna anses relevanta att presentera eftersom stora investeringar både kan vara svåra och ta lång tid att besluta om. Endast den totala investeringen har presenterats och hänsyn har inte tagits till vilken aktör det är som kommer vara kostnadsbärare. Därtill har driftskostnaderna adderats och de fasta kostnaderna har tagits upp som årliga kostnader där med hänsyn taget till avskrivningstider och ränta. Optimeringen och utvärderingen av systemen har huvudsakligen gjorts baserat på de årliga kostnaderna då de blir har ansett vara mer rättvisande ur ett långsiktigt perspektiv.

Kostnader som är teknikoberoende har exkluderats. Exempelvis exkluderas kostnader för depå, hållplatser, fordonsanpassning, försäkring, tvätt, klottersanering, administration och trafikledning.. Även om de teknikoberoende kostnaderna inte påverkar kostnadsskillnaden mellan de olika alternativen så kommer det vara kostnader som inte syns i modellen men som ändå ska adderas till slutresultatet.

6.4.5 Beräkning av investeringskostnader

Investeringskostnaden är en viktig faktor att ta hänsyn till eftersom det initialt kan utgöra jämförelsen mellan de olika bussystemen. Stora initiala investeringskostnader kan också innebära ett hinder vid valet av bussystem och naturligtvis också en risk särskilt vid obeprövad teknik.

De fasta kostnaderna som krävs för att göra analysen innefattar främst hårdvaran och installation. Kostnader som uppstår på infrastruktursidan upptas främst av för nätstationer, bussladdare, energilager, kabeldragningen däremellan samt installationskostnaderna. Kostnader för laddstolpar skiljer ganska mycket mellan olika tillverkare och beroende på överföringseffekt. Priser som används i modellen är linjära inom samma överföringsteknik och skalar med effektöverföringskapaciteten. Kostnaden för den infrastruktur som krävs för laddning under färd beror dessutom på antalet bussar som beräknas kunna kräva effekten simultant. Kostnaden för att ansluta laddpunkterna till elnätet har varierat beroende på avståndet till närmaste anslutningspunkt med tillräcklig effekt men också om kabeldragningen gjordes i tät bebyggelse, gles bebyggelse eller landsbygd. Den motsvarande energiöverföringsinfrastrukturen för HVO- och gasbussar tas också med i beräkningarna. På fordonssidan inkluderas själva bussen där energilagret

beräknas separat beroende på om det är effekt- eller energioptimerat. Kostnaderna för bussen skiljer sig markant mellan olika tillverkare, tillval och avtals-specifika förutsättningar. Då dessa skillnader varierar kraftigt och därmed utgör stora osäkerheter har ett enhetligt pris använts för samtliga elbussar för att kunna göra en rättvis jämförelse.

6.4.6 Beräkning av årliga kostnader

Elbussar har en hög investeringskostnad men lägre driftskostnader jämfört med en buss med förbränningsmotor varför endast en beskrivning av investeringskostnaderna kan ge ett missvisande intryck av bussystemets totala kostnad. För att försöka göra en mer rättvis beskrivning av de faktiska kostnaderna har de fasta kostnaderna delats lika mellan åren för avskrivningstiden och är oberoende av när de inträffar. Investeringskostnaderna har omvandlats till årliga kostnader enligt nedan formel:

$$A = \frac{NNV * p}{1 - (1 + p)^{-n}}$$

A = årliga kostnader, NNV = nettonuvärde, p = kalkylränta och n = avskrivningstid

I metoden läggs de årliga rörliga driftskostnaderna för förare, energi och underhåll ovanpå de fasta kostnaderna som är fördelade per år. Förarkostnaderna är en väsentlig kostnad som ibland förbises i tron att den inte skiljer sig mellan de olika bussystemen. Det har visat sig att det kan istället i motsats kan vara den utslagsgivande faktorn mellan de olika alternativen. Skillnaden är exempelvis den tid det innebär att köra till depån eller vänta på att en laddning ska bli klar innebär en ökad kostnad både i form av ytterligare förartid men också i att eventuellt ytterligare fordon behövs för att bibehålla turtätheten. Avståndet till depån är därför en faktor som påverkar förarkostnader men också ett minsta avstånd som batteriet måste dimensioneras för att hantera i samband med start och avslut av ett pass. Förarkostnaden, som har stämts av med Västtrafik samt operatör har parametersats som en fast kostnad per timme med ett procentuellt påslag för icke värdeadderande tid.

Transportkapaciteten per fordonsslag och timme samlades in för att kunna uppskatta en nödvändig turtäthet och därmed antalet bussar och turer per timma. I slutändan användes ändå körsträckor baserade på dagens tidtabell, framtaget av operatör, som grund för beräkningen av antalet bussar och körtider och antalet avgångar per timme då det bedömdes ge en mer rättvis jämförelse. Data om linjernas topografi och längd samt bussarnas hastighet längsmed linjen loggades för att kunna beräkna energiförbrukningen, batteristorlek och batterislitage.

I energikostnaden ingår abonnemangskostnader, effekttariff, nätavgift och slutligen energikostnaden för elbussarna samt bränslekostnader för bussar med förbränningsmotorer. Energi och drivmedelskostnader avser dagens pris och baseras på uppgifter från Göteborg energi, offentliga källor samt från operatörer.

Avskrivningstiderna för har stämts av med operatörer och upphandlare för att motsvara de upphandlingstider som gäller i Göteborg idag. Längden på avskrivningstiderna har väldigt stor påverkan på de årliga kostnaderna. Det enligt operatörer sannolikt att avskrivningstiden är kortare än den faktiska livslängden och att upphandlingstiderna skulle kunna förlängas. För trådbussar i drift i Landskrona används som exempel en avskrivningstid som är dubbelt så lång som den som används i Göteborg. Den förlängda avskrivningstiden innebär däremot en ökad underhållskostnad. Med en oförändrad avskrivningstid har underhållskostnaderna antagits vara samma för alla elbussar men något högre för bussar med förbränningsmotorer.

Resultatet från kostnadsfunktionen är utöver en jämförande beskrivning av de årliga kostnaderna även en kostnad per kilometer. Resultatet har stämts av med upphandlare samt flertalet rapporter för att säkerställa beräkningarnas rimlighet.

Som en känslighetsanalys gjordes även beräkningar för framtida bussystem. Istället för ett antaget årtal har de elektriska bussarna, exklusive batteri, antagit ha nått samma pris som en motsvarande buss med förbränningsmotor har idag. Dessutom har batterikostnaden halverats jämfört med dagens pris. Slutligen har kostnaderna för tekniken för energiöverföring beräknats har minskat något i takt med ökad

mognadsgrad och högre produktionsvolym. Avskrivningstiden har även förlängts för att likna bussens faktiska livslängd.

6.4.7 Förslag på fortsatt arbete

Stråvan har varit att göra en så rättvis kostnadsjämförelse som möjligt mellan de olika energiförsörjningsteknikerna. Det kan konstateras att bussomloppen som de ser ut för bussar med förbränningsmotor inte är optimala för bussar som behöver längre tid på sig att överföra energin. Framtagning av korrekta bussomlopp för flera parallella linjer är komplicerat och tidsödande men kommer vara nödvändigt för att kunna göra en helt rättvis jämförelse.

I modellen har den adderade kostnaden till följd av tyngden och volymen för batteriet inte inkluderats. En ökad vikt påverkar energiförbrukningen och i förlängningen antalet tillåtna passagerare ombord vilket påverkar kostnaderna. En hög vikt kan dessutom i vissa fall hindra bussar från att trafikera vissa broar.

Kalkylen har i första hand hanterat direkta kostnader som följd av elektrifieringen. Sekundära samhällsekonomiska kostnader, såsom minskat buller och antal partiklar är inte inkluderade. Dessa påverkar inte jämförelsen mellan de olika elbussalternativen men är relevanta om en helt rättvis jämförelse ska göras med bussar med förbränningsmotor.

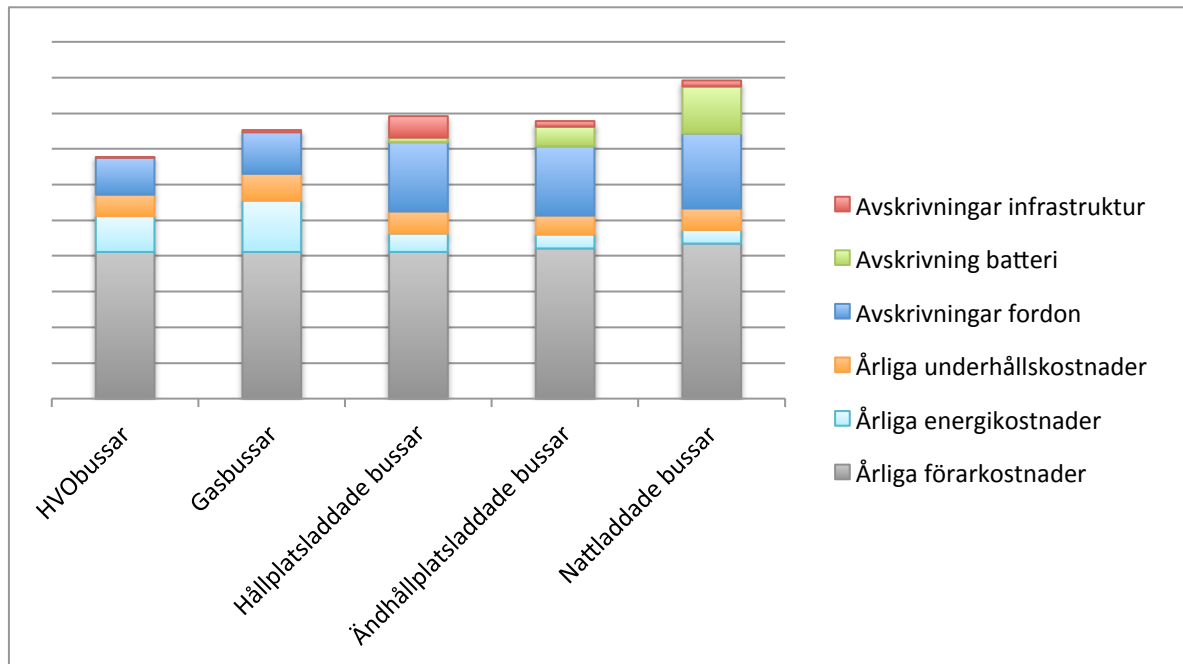
Projektets referensgrupp har efterfrågat att totalkostnaderna redovisades separat för de olika aktörerna. Det kommer få stor påverkan för driftskostnaderna och risken om exempelvis en stad tillhandahåller laddinfrastrukturen som kan utnyttjas av bussoperatörerna. Då det till stor del är en förhandlingsfråga har denna typ av uppdelning inte rymts inom projektet.

6.5 Applicering av metoden på linje 18 och 19 i Göteborg

En jämförelse av de olika elbussystemen gjordes för två linjer motsvarande linjerna 18 och 19 i Göteborg.

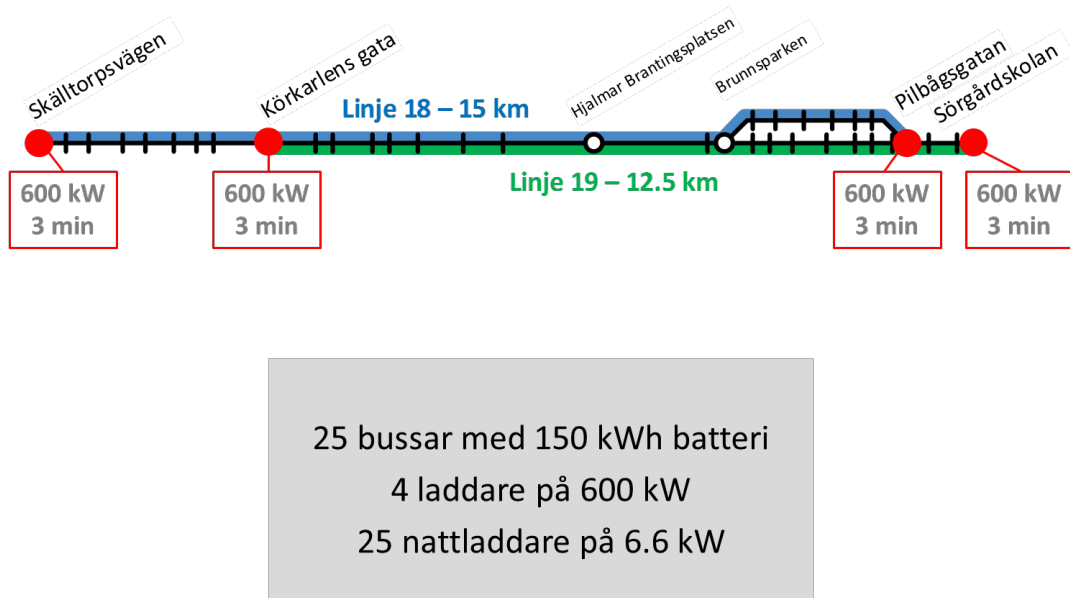
Följande resultat är endast tillförlitliga under de förutsättningarna som antagits gälla för de beskrivna linjerna och kan inte extrapoleras till godtycklig busslinje. För att en jämförelse ska bli relevant för en annan linjedragning krävs att korrekt data för just den busslinjens förutsättningar importerar i modellen. Metoden används lämpligast tillsammans med aktörer för att iterativt studera hur olika parametrar påverkar den totala kostnaden.

Linjerna 18 och 19 går till stor del parallellt med gemensamma hållplatser och är 15 respektive 12,5 km långa, enkel väg. Sammanlagt på de båda linjerna kör det i dagsläget som flest 25 bussar under högt trafik. De årliga kostnaderna för att trafikera dagens tidtabell på linje 18 och 19 med olika busstyperna har jämförts i Figur 9. Resultaten har tagit hänsyn till dagens upphandlings- och avskrivningstider vilket har stor påverkan på de årliga kostnaderna.



Figur 9 Årliga kostnader inklusive avskrivning och ränta för motsvarande linje 18 och 19

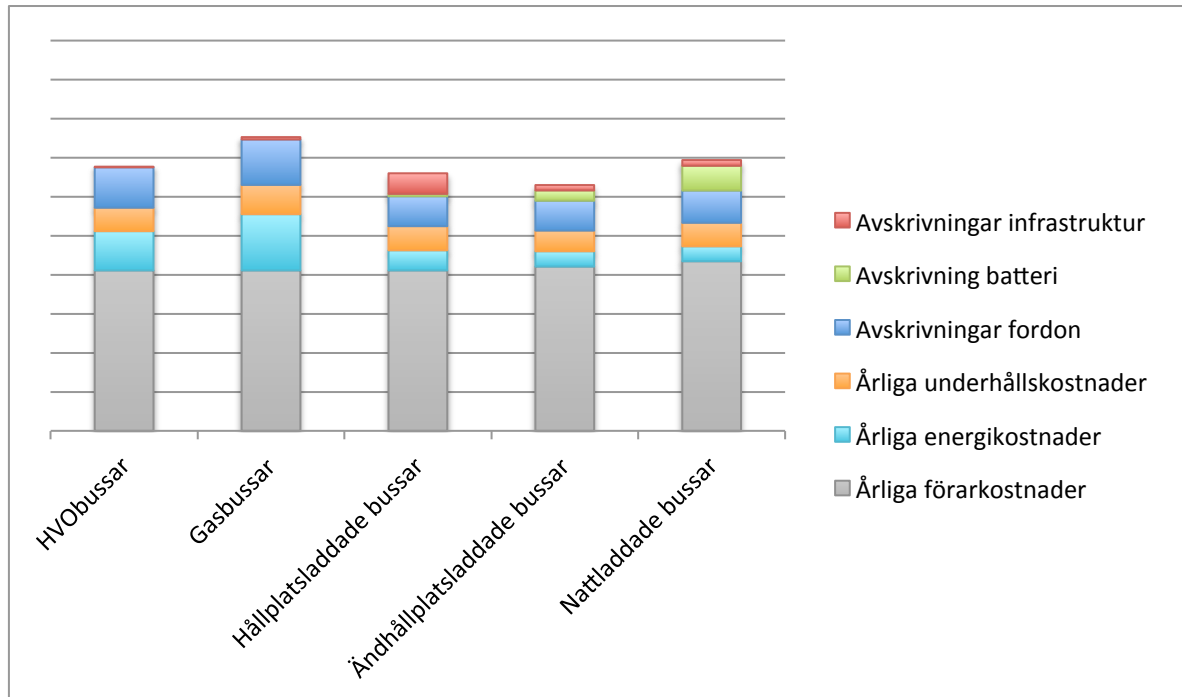
Resultaten från beräkningarna visade att laddning vid ändhållplatserna var det mest ekonomiska alternativet av de elbussystem som jämfördes. Kostnaderna för att trafikera linjerna med ändhållplatsladdade bussar uppgick till 37,9 kr/km. Motsvarande kostnad för trafik med HVO-bussar uppgick till 33 kr/km. Hur linjerna skulle se ut enligt modellen har beskrivits i Figur 10 nedan.



Figur 10 Schematisk bild av linjesträckning och laddarnas placering längs med linje 18 och 19

Intressant att notera är att modellen föreslår laddare med ovanligt hög överföringseffekt. Kostnaden för en kombination av ett laddningssystem och batteri som klarar höga överföringseffekter visar sig vara en mindre del av den totala investering jämfört med extra kostnader för att bussar ska tvingas stå still onödigt länge för att ladda efter varje rutt.

Figur 11 visar resultatet av kalkylen för samma linjer i ett framtida scenario. I beräkningarna har kostnaderna för batterierna halverats och avskrivningstiderna förlängts för att matcha elbussarnas livslängd. Vidare har priset för en elbuss utan batteri justerats till att motsvara priset för en jämförbar buss med förbränningsmotor. Detta är ett mycket troligt scenario på en mognare marknad eftersom en elbuss är en lika enkel eller enklare konstruktion än en förbränningsmotorbuss. Dessutom har kostnaden för laddinfrastrukturen reducerats i takt med att tekniken har mognat och skalfördelar uppnåtts. Resultaten antyder att elbussar på sikt kan bli ekonomiskt fördelaktiga jämfört med dagens bussar med förbränningsmotor.



Figur 11 Årliga kostnader inklusive avskrivning och ränta på lång sikt för motsvarande linje 18 och 19

6.5.1 Påverkan på elnätet

Inledningsvis körs endast vissa enstaka busslinjer på el och dessa kommer servas av ett fåtal utplacerade laddare. Strömförsörjningen löses då relativt enkelt inom det befintliga distributionsnätet. Under utvecklingsfasen kan dessutom eventuella problem (avbrott) till/inom laddutrustningen anses vara accepterat.

Ju fler linjer som elektrifieras, desto högre kommer kraven på driftsäkerhet på elförsörjningen till själva laddaren även bli. Den förlåtande fasen har övergått till vardag hos allmänheten.

Strömförsörjningen till en helt elektrifierad busstrafik på samtliga linjer kommer att behöva genomgå en utvecklingsfas i ett systemperspektiv. Vid full utbyggnad av elektrifierad busstrafik kommer det i vissa känsliga områden (centrum, stora kommunikationspunkter) finnas behov av helt separata distributionsnät med säker redundans som servar enbart busssladdarna/nätet.

6.5.2 Referensfall Spårväg

Spårvagnssystem skiljer sig fundamentalt från hur bussystem är uppbyggda. Modellen konstruerades ursprungligen främst med förutsättningen att den skulle kunna jämföra olika typer av bussystem och deras respektive energiöverföringsinfrastruktur. En stor del av kostnaderna för ett spårvagnsnät ligger förutom i själva fordonen till stor del i investeringen av tråd och räls samt underhåll av detta. För en rättvis jämförelse mellan spårvagnar och elbussar krävs därmed att motsvarande väg och vägunderhåll inkluderas i kostnaderna för att bygga och drifva ett bussystem. I en korrekt jämförelse bör dessutom kostnader inkluderas för att anpassa närliggande miljö och eventuella byggnader för att hantera spårvagnens större svängradie. Andra kostnader kan uppkomma om trafiken ska ha en egen fil samt om anpassningar av broar

krävs för att klara ett ökat axeltryck. Då denna typ av analys låg utanför modellens tänkta användningsområde gjordes en enklare analys av linje 19 i Göteborg för att beskriva den ungefärliga kostnadsfördelningen mellan alternativen vanlig busstrafik, BRT-system och spårvagn. Kostnaderna för att bygga spårväg kan skilja sig betydligt beroende på de geografiska förutsättningarna och kraven och analysen ämnar inte vara heltäckande.

Nuvärdeskostnaden beräknades för drift av de olika systemen i 40 år och inkluderade både fordons-, energi-, infrastruktur-, underhålls- och personalkostnader. Slutsatsen var att trafikarbetet kunde utföras med busstrafik till ungefär en halverad kostnad jämfört med spårvagnstrafik. Referensberäkningen granskades av konsultfirman Projektengagemang för att verifiera rimligheten i de antaganden som gjordes vid beräkningen.

6.6 Måluppfyllelse

Huvudmålet för projektet att ta fram en metodik för robust och ekonomiskt fördelaktig utformning för elektrifierad busstrafik med komplex hållplatsdynamik har uppnåtts. Under detta arbete har nya insikter vunnits både inom och utom projektet vilket har fått påverka det fortsatta arbetet. Tidigt framkom t ex att utöver elförsörjningsinfrastrukturen måste fordonens batteri inkluderas. Det är ganska ovanligt men synnerligen väsentligt att offentligt medfinansierade F&I-projekt drivs på detta sätt. På det sättet har tillgängliga resurser utnyttjats på ett effektivt sätt och metodikens relevans fördjupats. Det ser dessutom ut som att ett angrepp som inkluderar en ekonomisk analys med kostnader kartlagda i detalj är unik, vilket gör att kostnadseffektiva lösningar kan väljas för olika behov.

Ambitionen att ta hänsyn till komplex hållplatsdynamik har utvidgats till att inkludera de totala bussomloppen då det visar sig att dessa och deras eventuella förändring måste inkluderas i den totala analysen. Systemgränsen för studien har alltså utvidgats. Det gäller också för detaljerade modeller för batterilivslängdspåverkan och därmed kopplade kostnader som funktion av olika laddningsstrategier. Fler aktörer än planerat har konsulterats bl a bussoperatörer och batteriexperter. Gränsen har flyttats tillbaka i andra områden, t ex för laddning vid samtliga hållplatser vilket åtminstone för den närmaste framtiden verkar mycket kostsamt. Relevansen i arbetet har förstärkts och det har väckt ett väckt mycket stort intresse. Naturligtvis ligger också pionjärarbetet med metodiken bakom detta.

Frågan om robusthet inte bara i metodikens utsagor i förhållande till verkligheten, utan också i det totala transportsystemets funktion såsom det påverkas av fel i de alternativa energiförsörjningssystemen och störningar som initialt uppstår i trafiken, har tagits på stort allvar. Därför har en omfattande feleffektanalys (ref) tillkommit där kostnader för olika reservlösningar för energitillförsel alltså inte bara orsakade av fel i energiförsörjningen utan också av trafikstörningar har analyserats. Inom projektet skulle om resurser funnits tillgängliga den mycket viktiga avvecklingen av trafikrelaterade störningar tagits upp i detalj. Olika alternativa trafiklösningar kan få mycket olika kostnadskonsekvenser t ex som resultat av en broöppning eller hinder på vägen. Batteribussar har t ex lättare att ta sig förbi hinder än trådbundna bussar och spårvagnar.

Metodiken visar att tider för hållplatsladdning, resandetransferering vid hållplatser och linjetillryggaläggande är kritiska parametrar för batteridrivna bussar. De kan kortas med olika fordons- och infrastrukturrelaterade åtgärder vilket påverkar deras konkurrenskraft. Likaså är den totala transportkapaciteten av stor betydelse. Det har visat sig att den kan höjas i BRT-system genom att ett antal bussar då efterfrågan är stor kör i tåg-/konvojformation. Det görs manuellt i Istanbul. Det förs en diskussion om ett kompletterande projekt där möjligheten utforskas att stödja elektrifierad körning av detta slag med automatik.

Det har visat sig svårt att få fram prognoser för framtida buss- och batterikostnader. Massproduktionen har ännu inte kommit igång. Batterikostnader har allmänt sett minskat mer än förväntat och det finns mycket optimistiska prognoser i omlopp. De batteridrivna bussarna masstillverkas inte ännu fullt ut. Dagens trådbussar är dyrare än förbränningsmotordrivna bussar. Användningstiden är dock ofta längre, vilket även förutspås för batteridrivna bussar. För trådbussar tillkommer en omfattande infrastruktur vars avskrivningstid ofta är ännu längre. För att den skall vara relevant krävs att stadens transportnät är stabilt. Totalkostnader för system med förbränningsmotordrivna bussar verkar på kort sikt vara lägst.

Ett delmål för projektet var alltså att bygga upp en metod som kan användas vid analys av framtidssatsningar inom elektrifierad kollektivtrafik. Under projektets gång har olika typer av intressenter önskat att metodiken utnyttjas för analys av olika lokala och regionala kollektivtrafiksystem, vilket är ett tecken på att detta mål har uppnåtts. Framstegen i projektet har inneburit att Chalmers bjudits in att delge resultat från projektet, samt delta i andra projekt utöver det ansökta fortsättningsprojektet. Intressenterna har också velat fortsätta F&U-arbetet. Demonstrationsprojekt planeras där metodiken kommer till användning förutsatt att en finansiering kan ordnas.

När det gäller olika tekniker för kraftöverföring mellan infrastruktur och fordon har insatsen varit begränsad eftersom nu tillgänglig ändhållplatsladdning visat sig kostnadsmässigt attraktivt. I andra Europeiska studier har också detta alternativ prioriterats av olika skäl. I omvärldsbevakningen följs dock utvecklingen och kostnadsinformation söks för teknik för ultrasnabb laddning. Bl a två planerade stombusslinjer i Göteborg är objekt för testning av metodiken. I en omfattande analys av bussomlopp tillsammans med operatörer skapas en bas för anpassning av laddningstider till det planerade trafikläget. Målet är att minimera oönskad stilleståndstid ur ett totalt system- och kostnadsperspektiv. I ett parallellt projekt har en trådbusslinje studerats, varför kostnadsbilderna för sådana system är tillgängliga. När det gäller hopklumpning av bussar på linjer så är en strategi att vänta med följande buss om kapaciteten är tillräcklig. Då skapas också möjlighet till extra laddning.

I den ursprungliga projektplanen diskuteras elektrifieringens betydelse för CO₂-reduktion. Verkligheten har förändrats så till vida att förbränningsmotordrivna bussar nu ofta körs på CO₂-neutrala drivmedel. Vidare har det tillkommit ett långsiktigt mål, att endast utnyttja uthålliga bränslen, vilket gör att uranbaserad el inte bör utnyttjas. Bussar drivna på el från nätet är därför ur denna synvinkel inte självklart mer attraktiva än bussar med förbränningsmotorer. I stadskärnor är dock el-bussarnas energiförbrukning lägre än hybridbussars drivna med uthålliga bränslen. Vidare är emissioner av ljud, gaser och partiklar lägre. Mellanformer som kan visa sig optimala för vissa linjer är nätladdade el-bussar med hjälpkraftaggregat, eller bussar med två moder, en fullständigt elektrisk respektive en hybridmod, vilka dels laddas från nätet, dels förses med uthålligt bränsle.

7 Spridning och publicering

7.1 Kunskaps- och resultat spridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	x	<p>Resultat och lärdomar från projektet har kontinuerligt spridits via deltagarna till parternas organisationer.</p> <p>Preliminära resultat från projektet presenterades vid NEBI i Göteborg, 1-2 september 2015.</p> <p>En presentation avseende en kostnadsjämförelse mellan att trafikera en stombusslinje i Göteborg med bussar som körs på biodiesel eller biogas eller två elektrifierade alternativ har gjorts för Västra Götalandsregionen.</p> <p>Resultaten från projektet har presenterats vid en slutkonferens med representanter från parterna i projektet samt från Volvo bussar och Göteborgs stads trafikkontor, m fl.</p> <p>Resultaten kommer att presenteras vid NEBI2 i Helsingfors den 11 maj, 2015.</p> <p>En halvdagskurs, <i>Elbussar – Möjligheter och begränsningar</i>, avsedd för den som jobbar med utveckling, användning eller upphandling av busstrafik kommer att hållas den 17 maj. Om kursen blir lyckad kommer fler tillfällen att anordnas.</p> <p>En artikel har lämnats in till Electric Vehicle Symposium (EVS) 29 i Montréal (19-22 juni) där projektet kommer att presenteras. EVS är den största internationella konferensen för elektrifierade fordon.</p>
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	x	<p>Ett fortsättningsprojekt är startat - Energiförsörjningsalternativ för elektrifierade bussystem. I projektet ingår nuvarande projektparter + Keolis och Opbrid.</p> <p>Metoden som utvecklats inom projektet kommer också att användas i <i>Beslutsstöd för införandet av elbussar i linjetrafik</i> - ett projekt som drivs av Blekinge Tekniska Högskola och i vilket ett flertal svenska städer deltar.</p>
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	x	<p>Potentiellt kan resultaten från projektet ha viss inverkan på produktutvecklingsprojekt. Modellen/analysen har kommit fram till resultat avseende dimensionering av storlek på energilagrar som ej finns på marknaden idag</p>
Introduceras på marknaden	x	<p>Metoden skulle kunna tjänstefieras och säljas</p>
Användas i utredningar/regelverk/ tillståndsärenden/ politiska beslut	x	<p>Projektet har haft som mål att validera metoden genom att applicera den på en stombusslinje i Göteborg. Stombusslinjerna 18/19 har modellerats och kostnadsberäkningar gjorts för att identifiera det mest kostnadseffektiva alternativet att elektrifiera linjerna. I analysen har även biodiesel- och biogasbussar tagits med som jämförelse. Resultatet har presenterats för Västra Götalandsregionen och utgör del av ett underlag för beslut om inriktningen i kommande upphandlingar.</p> <p>Lindholmen Science Park tillsammans med Chalmers och Viktoria Swedish ICT studerar på Skånetrafikens uppdrag alternativ för en elektrifiering av Landskronas busstrafik. Utredningen är avsedd att fungera som beslutsstöd inför kommande upphandling.</p>

7.2 Publikationer

Olsson, O., Grauers, A. and Pettersson, S. (2016) *Method to analyze cost effectiveness of different electric bus systems*, EVS29, June 19-22, Montréal, Québec, Canada,

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Intresset för detta projekt har varit stort i Sverige och det är tydligt att det också finns ett intresse för problematiken runt om i världen. I takt med att utvecklingen går från småskaliga försök med enstaka bussar till ren upphandling av elbusstrafik i delar av städer, hela städer eller regioner ökar behovet av förstå vilken teknik som passar för vilket trafikarbete. Detta kommer att studeras i det fortsättningsprojekt, Energiförsörjningsalternativ för elektrifierade bussystem, som startats med finansiering från Energimyndigheten.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

AB Volvo (Intressent), Johan Svenningstorp

Chalmers, Signaler och System(Utförare), Anders Grauers

Göteborg Energi AB(Intressent), Niklas Carlsson

Viktoria Swedish ICT (Utförare), Oscar Olsson

Lindholmen Science Park AB (Projektledare), Gunnar Ohlin och Lars-Göran Rosengren

Västra Götalandsregionen (VGR) (Intressent), Leif Magnusson/Hans Fogelberg