

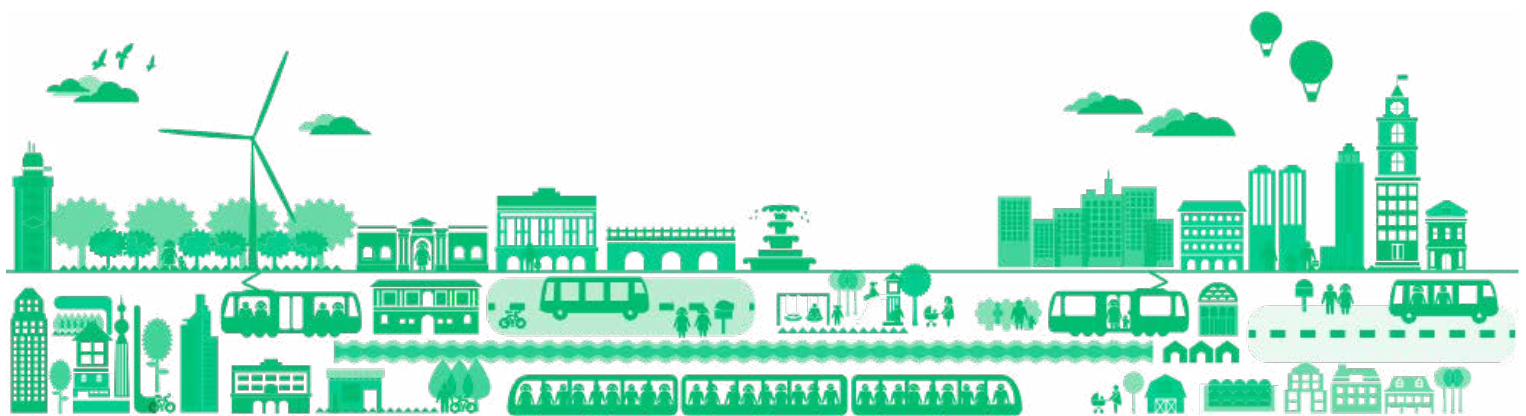


K2 OUTREACH 2021:2

Elbussen är här!

Lärdomar och kunskapsluckor i forskning om elbussar

Vendela Åslund, Fredrik Pettersson-Löfstedt och Hans Danielson



Datum: mars 2021
ISBN: 978-91-986323-9-2
Tryck: Media-Tryck, Lund

De slutsatser och rekommendationer som uttrycks är författarnas egna och speglar inte nödvändigtvis K2:s uppfattning.

K2 OUTREACH 2021:2

Elbussen är här!

Lärdomar och kunskapsluckor i forskning om elbussar

Vendela Åslund, Fredrik Pettersson-Löfstedt och Hans Danielson

Innehållsförteckning

1. Elbussen är här!	10
2. Lärdomar om omställningen till elbussar	12
2.1. Lärdomar från studier om teknikval	12
2.1.1. Total ägandekostnad påverkas av lokala förutsättningar	12
2.1.2. Livscykelkostnader – en bredare ansats	13
2.2. Lärdomar om elbussens integration i kollektivtrafiksystemet	14
2.2.1. Omställningstakt – hur många elbussar och när?	14
2.2.2. Var ska man bygga laddinfrastruktur?	15
2.3. Lärdomar från demonstrationsprojekt	16
2.3.1. Offentlig finansiering och risktagande	16
2.3.2. Elbussar ställer nya krav på upphandling och samverkan	17
2.3.3. Elbussar ställer nya krav på operativ planering	18
2.3.4. Elbussar kan både låsa upp och låsa in	18
3. Vilka kunskapsluckor kan identifieras?	19
4. Referenser	22
5. Appendix 1 Metod för litteraturgenomgången	24

Förord

År 2016 publicerade K2 en översikt över elektrifiering av busstrafik i Sverige. Rapporten beskrev de enstaka pilotprojekt eller demonstrationer som då pågick. Idag ser situationen väldigt annorlunda ut. Omställningen till elbussar pågår nu för fullt, både i Sverige och internationellt. Forskningen har en viktig roll att spela genom att följa och utvärdera vilka lärdomar som kan dras när fler städer och regioner väljer att elektrifiera busstrafiken. I den här rapporten presenteras resultaten från en genomgång av befintlig forskning när det gäller elbussar. Rapporten har tagits fram inom ramen för projektet E(+)bus som fokuserar på fallstudier av stadstrafik i Sverige. E(+)bus, är finansierat av Trafikverket, Bussbranschens Riksförbund och Energimyndigheten och pågår under åren 2020 – 2023. I projektets referensgrupp medverkar även andra offentliga och privata aktörer som är involverade i busstrafikens elektrifiering.

Lund, mars 2021

John Hultén

Föreståndare K2

Sammanfattning

Busstrafiken genomgår just nu en snabb förändring där elbussar introduceras i snabb takt. I svenska och europeiska städer, såväl som i andra delar av världen, finns ett stort intresse för elbussar. Den snabba teknikutvecklingen, i kombination med krav och mål om att minska transportsystemets utsläpp, är viktiga drivkrafter för elektrifieringen. Medan batteridrivna elbussar för några år sedan mest förekom i test och demonstrationsprojekt rullar nu elbussar från många olika tillverkare, med olika val av laddlösningar, i den ordinarie trafiken.

För att förstå vad införandet av elbussar på bred front betyder finns det ett behov av att utvärdera många olika aspekter, både avseende den direkta planeringen och driften av kollektivtrafiken, men även i ett vidare samhällsligt perspektiv där omställningen till elbussar kan beröra frågor kring stadsplanering och samhällsutveckling.

Den snabba förändringstakten gör att det är angeläget att studera omställningen och att lösa problem som kan uppstå för att uppnå en så effektiv och hållbar busstrafik som möjligt. Syftet med rapporten är att identifiera lärdomar och kunskapsluckor om omställningen till elbussar. Detta görs genom en genomgång av relevant vetenskaplig litteratur publicerad mellan 2016 och 2020.

I rapporten besvaras följande frågeställningar:

- a. Vilka lärdomar kan man dra om omställningen till elbussar utifrån befintlig forskning?
- b. Vilka kunskapsluckor kan identifieras i genomförd forskning?

I rapporten drar vi lärdomar från studier om teknikval, lärdomar från studier om elbussens integration i kollektivtrafiken och lärdomar från demonstrationsprojekt.

När det gäller lärdomar om studier av teknikval konstaterar vi att olika studier har kommit fram till olika resultat när det gäller att besvara frågor av typen ”vilken lösning avseende teknik och laddinfrastruktur är bäst?” Svaret på den typen av frågor beror dels på vad man menar med ”bäst” (avses exempelvis billigast, mest energieffektivt, störst reduktion av miljöpåverkande utsläpp, eller minst påverkan på befintligt trafikupplägg). Dessutom visar resultaten från olika studier att lokal kontext, som stadsstruktur, längd på busslinjer, typ av trafikupplägg, driftskrav, finansieringsmodell, och vilket typ av bränsle som jämförs med eldrift, har stor påverkan på vad som kan anses vara ”bäst”.

Studier som presenterar lärdomar om elbussens integration i kollektivtrafiken besvarar exempelvis frågor om i vilken takt elbussar bör införas för att minimera kostnader och energianvändning, eller var laddinfrastruktur bör lokaliseras. Resultat från studier i den här kategorin belyser att omställningstakten, d.v.s. hur snabbt elbussar bör introduceras, beror på vilka mål man vill uppnå (exempelvis minskning av utsläpp i förhållande till kostnader) samt vilket bränsle man ställer om ifrån (exempelvis om omställningen sker från diesel till el, eller från gasbuss till el). Frågor kring lokalisering av laddinfrastruktur är förstås också högst beroende av lokal kontext och plats specifika egenskaper. Resultat

från forskningen indikerar att elbussar kan innebära lägre driftskostnader än biodiesel och biogas, men att investeringskostanderna för fordon och laddinfrastruktur för elbussar är högre.

Lärdomar från genomförda satsningar rör främst erfarenheter från demonstrationsprojekt, eftersom dessa hittills utgjort majoriteten av befintliga projekt. Den här kategorin av studier identifierar också ett antal svårigheter och möjligheter för införandet av elbussar i stor skala. Forskningen belyser behovet av att offentlig sektor är beredda att finansiera och att städer som infört elbussar tidigt har varit villiga att ta risker. Forskningen diskuterar också att elbussar kan påverka befintliga praktiker för upphandling av trafik exempelvis genom att involvera nya aktörer (som företag som tillverkar laddinfrastruktur och elnätsägare), samt genom att idag gängse kontraktstider stämmer dåligt överrens med livslängd och avskrivningstider för fordon och batterier.

Det finns också operativa utmaningar och möjligheter med att införa elbussar. Det finns exempelvis forskning som menar att processerna för planering av linjenät behöver utvecklas för att ta hänsyn till typ av laddinfrastruktur och var laddinfrastruktur kan placeras. Enligt detta synsätt bör linjedragningen och utformning av tidtabeller anpassas och utformas med hänsyn till fordonens laddningstid.

Andra lärdomar från forskningen handlar om inlåsningseffekter vad gäller elbussar. Inlåsningseffekterna kan betraktas från två olika perspektiv. Dels kan det vara så att det befintliga kollektivtrafiksystemet är så starkt och etablerat att det utgör en svårighet i omställningen till elbussar. Omvänt så kan elektrifiering av busstrafiken också ha en inlåsningseffekt i sig på grund av den fasta laddinfrastrukturen. Exempelvis innebär depåladdning att bussen har en begränsad körsträcka innan den måste laddas igen, och tilläggladdning begränsar flexibiliteten av busslinjen då bussen blir beroende av laddstationers placering..

I rapporten identifieras också ett antal kunskapsluckor där det behövs mer forskning om elbussar

- Tekniken fungerar väl – men det saknas kunskap om uppskalning

Det finns indikationer på att teknik och lösningar som passar i en mindre skala kanske inte är lämpliga i en större omställning. Det behövs alltså mer forskning som följer upp erfarenheter där elbussar använts i ordinarie drift under en längre tidsperiod.

- Elbuss – byte av drivmedel eller del av en större omställning?

Många studier utgår från att elbussarna ska passa in i befintliga trafikupplägg och att de ska införas inom ramen för befintliga processer för upphandling och planering. En kritik mot detta förhållningssätt är att det begränsar potentialen i omställningen till en elektrifierad busstrafik. Exempelvis saknas kunskap om vilka möjligheter och utmaningar det finns för en övergång till elbussar som en del av en större omställning till ett elektrifierat transportsystem, eller vilka möjligheter elektrifiering innebär för att bussen ska kunna spela en annan och ny roll i städernas utveckling.

- Höga investeringskostnader – en minskande barriär?

En central barriär för införandet av elbussar handlar om höga investeringskostnader för fordon/batterier och laddinfrastruktur. Den snabba teknikutvecklingen gör att de antaganden som görs inte alltid är relevanta i ett senare skede. Det behövs mer forskning

som följer upp och uppdaterar lägesbilden kring kostnader för fordon, infrastruktur och drift av elbussar i ordinarie trafik.

- Land, stad, busslinje – kontextens betydelse

Var studien är genomförd är viktigt eftersom omställningsprocesserna ser olika ut i olika länder och i olika städer. Förutsättningar som linjenät, längd på linjer, trafikupplägg och turtäthet har stor påverkan på vad det innebär att införa elbussar (ex avseende kostnader och påverkan på utsläpp) och det behövs mer forskning för att kunna jämföra resultat från olika kontexter.

- Ansvarsfördelning och samverkansutmaningar

Frågor om avtalsformer och fördelning av ansvar och risker när det gäller investeringar och drift är viktiga eftersom kollektivtrafikens organisering ofta innebär att fördelarna med billigare drift inte direkt tillfaller de aktörer som belastas med kostnader för investeringar i infrastruktur. Det behövs mer forskning om den här typen av frågor som ger kunskap om hur och på vilka grunder beslut om teknikval och upplägg för elektrifierad busstrafik fattas i samverkansprocesser mellan olika aktörer.

- Fordon och marknad i förändring

Det finns många aktörer på elbussmarkanden, väletablerade traditionella fordonstillverkare såväl som för branschen nya aktörer, som fordonstillverkare specialiserade på elbussar och företag som sysslar med utveckling och tillverkning av laddinfrastruktur. Denna utveckling väcker frågor kring gemensamma standarder för fordon, depåer och annan infrastruktur och om val av teknik och fordon innebär inlåsningar eller andra utmaningar, exempelvis vid övergång mellan olika operatörer.

- Vad innebär en lyckad omställning till elbussar?

Omställningen till elbussar pågår för fullt och är på sina håll, exempelvis i en del mindre svenska städer, redan genomförd. Det finns därför skäl att samla de erfarenheter och den kunskap som dessa städer kan bidra med. Detta kräver andra utvärderingsmetoder än de som i dagsläget fokuserar på själva omställningen, snarare än på driften. En viktig frågeställning som behöver besvaras är vad en "lyckad" satsning på elektrifierad busstrafik innebär och på vilka grunder kan man göra en sådan bedömning?

1. Elbussen är här!

Busstrafiken genomgår just nu en snabb förändring där elbussar introduceras i hög takt i samband med att trafikavtalen förnyas. I vissa fall införs elbussar i ordinarie trafik genom befintliga avtal.

En kartläggning från 2016 av erfarenheter från omställning till elbussar i Sverige och i Europa visade att dessa vid tillfället rörde test- eller demonstrationsprojekt, men att intresset för elbussar fanns i flera städer [1]. Intresset har växt sedan dess och det har skett ett skifte från test- och demonstrationsprojekt med några få fordon till att elbussar blir del av den ordinarie kollektivtrafiken [2]. I början av 2020 fanns det i Sverige 257 elbussar i trafik [3]. Under 2020 pågick ett antal större upphandlingar där elbussar kommer att införas i stor skala i svenska städer (exempelvis Göteborg, Jönköping och Malmö) och antalet fordon kommer att öka markant under kommande år.

Många europeiska städer och städer i andra delar av världen påvisar en liknande utveckling. I Europa har tidigare forskning visat att den snabba teknikutvecklingen i kombination med krav och mål om att minska transportsystemets utsläpp bidrar till den höga omställningstakten från fossila bränslen till förnybara drivmedel i allmänhet, och elektrifiering i synnerhet [4] [5]. I början av 2020 fanns det i EU, Island, Norge och Schweiz sammanlagt 2736 batteridrivna bussar och ca 4900 trådbussar i drift [3]. Så medan batteridrivna elbussar för några år sedan mest förekom i test och demonstrationsprojekt [1] rullar nu elbussar från många olika tillverkare, med olika val av laddlösningar, i den ordinarie trafiken. Den snabba förändringstakten gör att det är angeläget att studera omställningen och att lösa problem som kan uppstå för att uppnå en så effektiv och hållbar busstrafik som möjligt.

Omställning till elbussar innebär en rad utmaningar och möjligheter, av vilka många är nya och okända för kollektivtrafikens aktörer. Förutom rent tekniska utmaningar gällande fordon, batterier och laddinfrastruktur innebär elektrifieringen utmaningar och/eller möjligheter för:

- Elförsörjning, effektuttag och påverkan på lokala och regionala energisystem;
- Organisering av busstrafiken, avseende omlopp, tidtabellplanering, framkomlighet, utformning av depåer m.m.;
- Avtalskonstruktioner och upphandlingsformer. Utvecklingen av infrastruktur och depåer, samt dyrare inköpskostnader för fordon och skillnader mellan kontraktslängder och avskrivningstider kan innebära ett behov av förändringar av nuvarande praktik;
- Samspel med digitalisering/automatisering;
- Samhällsplaneringsaspekter, exempelvis avseende hur elektrifiering möjliggör att busstrafiken kan ”vävas in” i en attraktiv stadsmiljö och hur depåer och hållplatser kan lokaliseras och utformas.

Att förstå vad införandet av elbussar på bred front betyder innebär alltså att det finns ett behov av att utvärdera många olika aspekter, både avseende den direkta planeringen och driften av kollektivtrafiken, men även i ett vidare samhällligt perspektiv där omställningen till elbussar kan beröra frågor kring stadsplanering och samhällsutveckling.

Syftet med den här rapporten är att identifiera lärdomar och kunskapsluckor om omställningen till elbussar. Detta görs genom en genomgång av relevant vetenskaplig litteratur publicerad mellan 2016 och 2020.

I rapporten besvaras följande frågeställningar:

- a. Vilka lärdomar kan man dra om omställningen till elbussar utifrån befintlig forskning?
- b. Vilka kunskapsluckor kan identifieras (exempelvis vilka svagheter har de genomförda studierna, vilka perspektiv saknas helt) i genomförd forskning)?

Resultaten i rapporten baseras på en genomgång av vetenskapliga artiklar som vi har delat in i tre kategorier: i.) studier om teknikval, ii.) studier om elbussens integration i kollektivtrafiksystem och iii.) studier av demonstrationsprojekt. För mer information om tillvägagångssättet för att identifiera artiklar, se appendix 1.

Lärdomar från litteraturgenomgången presenteras i kapitel 2. Baserat på resultaten från litteraturgenomgången för vi sedan en diskussion om kunskapsluckor i kapitel 3.

2. Lärdomar om omställningen till elbussar

Med utgångspunkt i de tre kategorierna (studier av teknikval, elbussens integration i kollektivtrafiksystem och demonstrationsprojekt) gör vi här en genomgång av resultat och lärdomar från i olika studier.

2.1. Lärdomar från studier om teknikval

Inför elektrifiering av busstrafik ställs beslutsfattare inför olika teknikval där val av laddstrategi är det val som oftast diskuteras i litteraturen [7], [8]. De två laddstrategier som är vanligast förekommande är depåladdning och tilläggs-laddning. Strategier som ”battery-swapping”, att urladdat batteri byts ut mot ett fulladdat, eller laddning via elvägar, nämns i litteraturen men är ännu inte så vanliga.

Depåladdning sker ofta nattetid och kräver ett stort batteri. Begränsningar i batterikapacitet och därmed räckvidd för bussen kan utgöra ett hinder för vilka linjer som kan elektrifieras. För att kunna vara i drift en längre tid och köra långa sträckor behöver bussen återvända till depån för att laddas ytterligare under dagen.

Tilläggs-laddning kan ske både vid ändhållplatser och vid hållplatser längs med linjen. Pantografladdning är ett exempel på tilläggs-laddning. Tilläggs-laddning kräver ofta ett mindre batteri och därför är investeringskostnaden för fordon lägre än den för depåladdning. Däremot kräver tilläggs-laddning större investeringar i laddinfrastrukturen då det krävs fler laddningsstationer.

För att bedöma vilken teknik och vilken laddstrategi som är lämplig för ett särskilt fall används olika kostnadsmodeller, exempelvis totala ägandekostnaden (på engelska Total Cost Ownership (TCO)), eller livscykelkostnader (på engelska Life Cycle Cost (LCC)). Valet av kostnadsmodell för beräkningarna är viktigt för att metoderna har olika systemgränser som innebär att de fokuserar på att jämföra olika aspekter. Detta påverkar i sin tur resultaten studierna kommer fram till och om resultat från olika studier är jämförbara.

2.1.1. Total ägandekostnad påverkas av lokala förutsättningar

Den totala ägandekostnaden inkluderar kostnader för inköp och drift. Det blir därför viktigt att ta hänsyn till vilka operativa krav som ställs på den linje som ska elektrifieras, vilket medför att lokala förutsättningar är väldigt viktiga i val av laddstrategi [7], [8], [11].

Ett exempel på lokala förutsättningar är tidtabeller och linjedragning i bussnätet och dessa är särskilt viktiga att beakta för att kunna välja en effektiv laddstrategi [7], [8]. Eftersom

dessa förutsättningar varierar från fall till fall betyder det också att resultaten varierar beroende på i vilken kontext den appliceras.

Exempelvis visar en jämförelse av elbussar med tilläggsaddning med alternativen biometan och Hydrogenated vegetable oil (HVO) att den totala ägandekostnaden för elbussen kan vara både högre och lägre än alternativen, när modellen testades på ett svenskt fall [8]. Detta berodde på variationer i kostnaderna relaterade till tidtabell och linjeegenskaper, till exempel frekvens och busslinjens längd [8]. Förutom att indata beror på den lokala kontexten så behöver även hänsyn tas till skillnader i pris för drivmedel, avskrivningstid för fordon och personalkostnader vilka påverkar total ägandekostnad och gör det svårt att göra jämförelser mellan olika platser [8].

En studie som utvecklar en optimeringsmodell för att underlätta beslut om val av laddstrategi illustrerar också utmaningen med att dra generella lärdomar från studier genomförda i en specifik kontext [21]. Elbussars laddningsbehov och tidtabellsegenskaper ligger till grund för optimeringsmodellen.

Till skillnad från andra studier som ofta fokuserar på enstaka busslinjer eller en specifik stad, testas denna modell i två städer: Aachen i Tyskland och Roskilde i Danmark. Städerna skiljer sig åt något, i Aachen är turtätheten på busslinjerna konstant, och i Roskilde är frekvensen olika i hög- och lågtrafik. I Aachen är det bara stadsbusstrafik som omfattas, medan det i Roskilde också finns regional busstrafik. Studien visar att bussar som kräver tilläggsaddning var bättre i båda fallen ur energieffektivitetssynpunkt, jämfört med depå-laddning. Däremot krävs fler bussar för att klara driftskrav vilket ökar den totala ägandekostnaden. När den totala ägandekostnaden jämförs mellan fallen visar resultatet att den lokala kontexten är väldigt viktig och att det kan vara svårt att dra några generella slutsatser.

De här studierna visar på svårigheten att jämföra olika fall. Att den lokala kontexten, där stadsstruktur, driftskrav, finansieringsmetod etc. omfattas, är så viktig för resultatet av sådana modeller förklarar varför de flesta studier av denna typ enbart behandlar enstaka fall.

I en modell av total ägandekostnad ingår även prognoser om prisutvecklingen för olika drivmedel och antaganden om hur priserna för batteri och laddinfrastruktur kan tänkas utvecklas i framtiden [7], [8]. Indata för en del av driftskostnaderna kan också vara baserade på demonstrationsprojekt. Detta gör att kostnaderna och kostnadsutvecklingen inte alltid är representativ för en större omställning som omfattar mer än en linje, eller för en satsning som sker en tid efter det initiala demonstrationsprojektet.

2.1.2. Livscykelkostnader – en bredare ansats

Antaganden om prisutveckling och indata från demonstrationsprojekt används även i beräkningar av livscykelkostnader. Den här typen av beräkningsmodell gör även anspråk på att fånga aspekter såsom energieffektivitet och miljö- och klimatpåverkan. Problematik med prognoser för kostnadsutveckling och beroendet av indata från demonstrationsprojekt återfinns även här. Dessutom beror energikostnaden för elbussar på hur elen är producerad, det vill säga om den är förnybar eller ej [12], [13], [15]. Det finns däremot fler likheter mellan resultaten av dessa studier som är värda att nämna.

En jämförelse mellan el-, diesel och hybridbussar visar att inköpskostnaden av elbussar är mycket högre än alternativen vilket har stor inverkan på livscykelkostnader men att driftskostnaderna, särskilt energikostnaderna, är lägre [11], [12], [15], [16]. En vanlig slutsats är att de lägre driftskostnaderna kan ”väga upp” de höga investeringskostnaderna, men att elbussen i nuläget har en högre livscykelkostnad än andra alternativa drivmedel. Prisutvecklingen och effektivisering av tekniken anses kunna göra elbussen konkurrenskraftig jämfört andra drivmedel inom några år [12]–[16]. Eftersom det finns fler miljö- och klimatfördelar med elbussen i drift jämfört med diesel så positioneras därför elbussen som ett effektivt val för en omställning till fossilfria drivmedel [12], [15]–[17].

En studie där olika laddstrategier ställs mot varandra visar att tilläggsaddning vid ändhållplats har lägre livscykelkostnad än depåladdning och tilläggsaddning längs busslinjen [11]. Trots att tilläggsaddning innebär högre kostnader för laddinfrastruktur så visar denna studie att det är främst kostnaden för batteriet som driver de högre livscykelkostnaderna för depåladdning och påverkar livscykelkostnaden i högre grad än andra faktorer, varför depåladdning har högre livscykelkostnad än tilläggsaddning. Intressant att notera är att i Sverige är depåladdning den vanligaste laddstrategin [1], [2] vilket tyder på att även andra faktorer än kostnaden påverkar valet.

Värt att minnas är dock att det ofta är enskilda linjer som analyserats. Om flera linjer elektrifieras kan laddinfrastruktur nyttjas av fler bussar, särskilt i fallet med tilläggsaddning längs med linjen. Detta är något som modellen för livscykelkostnad inte tar hänsyn till. Detta utgör en svårighet att livscykelkostnad som bedömningsverktyg i en större satsning på elbussar som innefattar mer än enstaka linjer [11]. En laddstrategi kan anses bättre än en annan när enbart en linje eller ett fåtal linjer betraktas, men kanske inte är lämplig i en senare fullskalig omställning. Detta är särskilt viktigt då ett demonstrationsprojekt eller test vidareutvecklas till införande av elbussar i drift.

Precis som modeller för total ägandekostnad är modeller för livscykelkostnader kontextkänsliga. Detta beror på att olika faktorer varierar mellan olika platser och över tid. Osäkerhetsfaktorer omfattar exempelvis antaganden om framtida drivmedelspriser och antaganden om kostnadsutvecklingen för teknik och batterier. Framförallt så innebär den snabba teknikutvecklingen när det gäller fordon och batterier att resultaten från studier om kostnader för olika teknikval är färskvara. Lärdomar från sådana studier riskerar att snabbt bli inaktuella.

2.2. Lärdomar om elbussens integration i kollektivtrafiksystemet

Den andra huvudkategorin av studier försöker exempelvis utreda i vilken takt elbussar bör införas för att minimera kostnader och energianvändning, eller var laddinfrastruktur bör lokaliseras.

2.2.1. Omställningstakt – hur många elbussar och när?

En studie jämför fyra olika scenarion för omställningen till elbussar baserat på EU:s mål om fossilfria fordonsflottor år 2050 [18]. I det första scenariot görs en omställning av bussflottan så fort som möjligt och alla fordon elektrifieras på samma gång. I det andra

scenariot föregås omställningen av ett test- eller demonstrationsprojekt, vid vilkens slut hela fordonsflottan elektrifieras. Scenario ett och två kallas aktiva scenarion och bygger på att det finns bidragsformer som underlättar omställningen. Scenario tre och fyra är stegvisa omställningar av fordonsflottan, i scenariot tre byts ”traditionella” bussar ut allt eftersom nya elbussar köps in. Scenario fyra är det mest passiva scenariot, där väntas teknikutvecklingen in för att i ett sent skede ställa om till elbussar när priset för tekniken är så lågt som möjligt.

Omställningen i svenska städer fram till slutet av 2020 har störst likhet med scenario två och tre, där demonstrationsprojekt har genomförts på i flera städer [1], [2]. Den lokala kontexten, stadens och bussnätverkets storlek avgör dock om omställningen sker genom en stegvis ersättning av gamla bussar eller om hela busflottan elektrifieras vid ett tillfälle. Dessa scenarion möjliggörs ju också av att det finns olika stödformer för omställningen, i Sverige finns exempelvis Elbusspremien, Klimatklivet och Stadsmiljöavtal vilket kanske påverkar omställningstakten.

Avvägningar mellan kostnadseffektivitet och energieffektivitet kan också påverka beslut om omställningstakt [20]. Viktiga aspekter i att utveckla en sådan strategi kan handla om mål om elektrifiering, teknikval och kostnadsoptimering. I en fransk studie visade sig den optimala omställningsstrategin vara övergå från diesel till gasbussar för att invänta en prissänkning av elbussteknik och att sedan övergå till elbussar med en blandning av depå- och tilläggs-laddning.

I Sverige har redan många städer gått över från dieselbussar till andra drivmedel som biogas eller etanol och har således redan investerat i förnybara drivmedel. Här har alltså övergången till mer hållbara drivmedel redan börjat varför lärdomarna från ovannämnda studier kanske inte är direkt applicerbara. Däremot lyfter denna typ av studier en rad frågor som är värda att undersöka, exempelvis hur tidigare gjorda satsningar på förnybara drivmedel i kollektivtrafiken påverkar elektrifiering och teknikval, samt hur mål på olika nivåer påverkar omställningstakten och vilka teknikval som görs.

2.2.2. Var ska man bygga laddinfrastruktur?

Särskilt intressant blir stadsspecifika egenskaper när lokalisering av laddinfrastruktur diskuteras. Att säkerställa tillgänglig och effektiv laddning är en komplex fråga som alla städer behöver ta hänsyn till i omställningen till elbussar. När det gäller lokaliseringen av laddinfrastruktur är utgångspunkten oftast att elbussen ska ha minsta möjliga påverkan på driften vad gäller linjedragning och tidtabeller jämfört med en buss med förbränningsmotor, samt att laddningen ska ske på ett så kostnads- och energieffektivt sätt som möjligt [22], [25], [26].

En studie presenterar en modell som optimerar spridningen av laddinfrastruktur för elbussar i stadsmiljön och testar sedan modellen på Stockholms busstrafik [26]. I studien identifieras busshållplatser i anslutning till tåg- och tunnelbanestationer, ändhållplatser samt hållplatser i innerstaden som lämpliga för att lokalisera infrastruktur för tilläggs-laddning. Detta innebär att ca 400 av Stockholms nästan 11 500 busshållplatser anses potentiellt intressanta som laddstationer [26].

Hur många hållplatslägen i Stockholm som behöver utrustas med laddningslösningar beror dock på om modellen optimeras med hänsyn till kostnad eller energianvändning.

Om systemet optimeras med hänsyn till energianvändning krävs fler hållplatslägen med laddningsmöjlighet, vilket förstärks innebär då högre investeringskostnader. Studien visar dock att de lägre driftskostnaderna för elbussar kan agera som motvikt för de högre investeringskostnaderna för laddinfrastruktur. Oavsett om man väljer att optimera för kostnad eller energianvändning är kostnaden för elbussar i Stockholm marginellt lägre än referensfallet med biodiesel [26].

Studien från Stockholm belyser betydelsen av hur mycket laddinfrastruktur och var den lokaliseras för avvägningen mellan att minska kostnader och minska energianvändningen. Detta är en utmaning som många städer ställs inför i omställningen till elektrifierad busstrafik. Denna studie visar dock att i just det fallet som studeras så bidrar elbussar positivt till både minskade driftskostnader samt minskad energianvändning i jämförelse med biodieselbussar. Frågan om de höga investeringskostnaderna för laddinfrastruktur kvarstår dock, vilket belyser att det kan krävas andra finansieringsalternativ och affärsmodeller än de idag tillgängliga för att möjliggöra en storskalig och energieffektiv omställning.

Den snabba teknikutvecklingen och osäkerheter kring kostnadsutveckling för olika laddstrategier är förstärks även här en viktig aspekt. Den faktiska utvecklingen i Stockholm där depåladdade elbussar verkar vara den föredragna lösningen indikerar också att lärdomarna från just den här studien har haft begränsad betydelse för de beslut om elbussar som fattats.

2.3. Lärdomar från demonstrationsprojekt

Lärdomar från genomförda satsningar rör främst erfarenheter från demonstrationsprojekt, eftersom dessa hittills utgjort majoriteten av befintliga projekt. Genom att samla olika aktörers perspektiv och erfarenheter och genom att granska projekten kan ett antal svårigheter och möjligheter för en kommande storskalig satsning identifieras [9], [27], [31], [32], [34]. Svårigheter som identifieras kretsar främst kring finansiering och upphandling.

Det finns också forskning som ifrågasätter trenden med att planera för elbussar från perspektivet att omställningen ska passa in i befintligt system [22], [24]–[27]. Elektrifiering av bussar i kollektivtrafiken behöver inte enbart innebära övergång till ett annat drivmedel, utan omställningen kan även bidra till ett annorlunda och förnyat kollektivtrafiksystem. Upphandlingsformer, ansvarsfördelning och planering av drift är några aspekter av kollektivtrafiksystemet som anses kunna förnyas för att bättre passa förutsättningarna för elbussar i drift [27], [29], [35].

2.3.1. Offentlig finansiering och risktagande

Forskningen visar att de höga initiala kostnaderna för elbussar och laddinfrastruktur är ett centralt hinder för en större omställning till elektrifierad busstrafik [9], [27], [31], [32], [34]. Hur denna barriär kan överbryggas har studerats i städer i många olika länder.

Trots skillnader mellan fallstudierna visar resultatet av studien vissa företeelser i satsningen på elbussar kan observeras runtom i världen. En sådan företeelse är att

förekomsten av offentliga bidrag är en viktig faktor för en omställning till förnybara drivmedel [32]. I diskussioner kring kostnader för elbussar är avvägningen mellan lägre driftskostnader, men högre investeringskostnader för elbussar jämfört med alternativen den springande punkten. Med tanke på att kostnader för investeringar och besparingar för driften ofta gynnar eller belastar olika organisationers budgetar är det en intressant fråga om lägre driftskostnader agerar som motvikt till höga investeringskostnader i praktiken. Därför är det intressant att undersöka om bidragsformer såväl som organisatoriska strukturer påverkar elektrifieringen.

De höga investeringskostnaderna innebär att investeringar i ny teknik som fortfarande är under utveckling innebär ett risktagande [30], [31]. Ett sätt att begränsa risken är att vänta så länge som möjligt med investeringen för att säkerställa att den senaste tekniken är tillräckligt utvecklad, testad och kanske dessutom billigare [30], [31]. Ett annat sätt att begränsa risken är att investera i teknik som bäst passar in i befintligt system [30], [31].

Det finns också en risk att städer som inför elbussar tidigt blir ”testkaniner” och upptäcker att tekniken som man investerat i anses föråldrad inom några år [30], [31]. I Sverige finns ett antal demonstrationsprojekt som förberedelse inför en större omställning till elbussar. Dessutom finns exempel på flera fall som redan har genomgått eller genomgår en omställning, varför oron kring ny teknik som nämns kanske inte är ett fullt så allvarligt hinder i Sverige. Däremot kan teknik som fungerar väl i ett demonstrationsprojekt visa sig vara olämplig i en större satsning [30], [31].

2.3.2. Elbussar ställer nya krav på upphandling och samverkan

Innovativa upphandlings- och kontraktsformer i omställningen till elbuss, som skiljer sig från existerande ”traditionella” former, anses kunna minska riskerna med elektrifiering [30], [32]. I dessa särskilda former för upphandlingen förenas olika intressenter och nya aktörer involveras. Det leder till en riskfördelning mellan aktörerna som minskar osäkerheten i att investera i ny teknik [30], [32]. Att operatörer leasar elbussar och laddinfrastruktur under avtalstiden, och att en offentlig myndighet istället står för de högre investeringskostnaderna identifieras som en sådan innovation. Såsom avtalsmodellerna ser ut i Sverige är det i praktiken den offentliga sektorn som både väljer teknik och som betalar, så behovet av en sådan innovation i en svensk kontext ser något annorlunda ut.

En studie hävdar att den befintliga upphandlingsprocessen i Sverige inte är lämplig eller tar tillräcklig hänsyn till elbussars förutsättningar, specifikt vad gäller laddstrategi och teknikval [29]. Istället föreslås en alternativ upphandlingsmodell för elbussar bestående av två processer, en för ett system med depåladdning och en för ett system med tilläggsaddning. I dessa processer ryms ingår även aktörer som tidigare inte varit delaktiga i kollektivtrafikplaneringen, exempelvis elnätsägare och tillverkare av laddningsinfrastruktur. En central tanke är att dessa aktörer gemensamt ska utforma systemet för elbussar innan själva upphandlingen av trafiken. [29].

Det finns också annan forskning som menar att förändrade former för upphandling och ansvarsfördelning kan bidra till att de tekniska barriärerna minskar. Ett sådant förslag är att kollektivtrafikmyndigheter tar en mer aktiv roll genom att investera i infrastruktur, ta på sig en del finansiella risker eller skapa incitament för operatörer för elektrifiering [27]. I den svenska kontexten kan man notera att den regionala kollektivtrafikmyndigheten

(RKM) redan har en stark position och i praktiken är det den som bestämmer om det skall vara elbussar eller inte.

2.3.3. Elbussar ställer nya krav på operativ planering

Introduktionen av elbussar kan ses som en möjlighet att genomföra ändringar i kollektivtrafiksystemet som annars är svåra att genomföra, med motiveringen att den nya tekniken medför förbättringar [13], [27], [35]. Det har lyfts att det inte enbart krävs förändring i upphandlingsprocesser för elbussar, utan även i planering och drift av kollektivtrafiken [13], [35].

En studie av planeringen för drift (utformning av linjenät, tidtabeller, schemaläggning av fordon och schemaläggning av personal) och olika laddstrategier visar att befintliga planeringsmetoder är otillräckliga för framtidens elektrifierade bussflotta [35]. Exempelvis vid planering av linjenät behöver processen utvecklas för att ta hänsyn till var laddinfrastruktur, och vilken typ av laddinfrastruktur, kan placeras. Sedan planeras linjedragningen efter det och utformningen av tidtabeller tar hänsyn till fordonens laddningstid.

2.3.4. Elbussar kan både låsa upp och låsa in

Begreppet inlåsningseffekt beskriver hur etablerade rutiner eller olika valmöjligheter ger upphov till en viss utvecklingsriktning. Inlåsningseffekten vad gäller elbussar kan betraktas från två olika perspektiv. Dels kan det vara så att det befintliga kollektivtrafiksystemet är så starkt och etablerat att det utgör en svårighet i omställningen till elbussar. En del källor menar att aktörer som är involverade behöver förbereda sig på förändringar i upphandling, planering och drift när elbussar introduceras i kollektivtrafiken [13], [27], [35]. Som tidigare diskussion om nya upphandlings- och planeringsmöjligheter i samband med introduktionen av elbussar visar så kanske det krävs nya former för en effektiv omställning.

Elektrifiering av busstrafiken kan också ha en inlåsningseffekt i sig på grund av den fasta laddinfrastrukturen [13], [31]. Val av laddinfrastruktur påverkar hur omställningen kan utvecklas i framtiden med tanke på vilka begränsningar olika laddstrategier utgör. Exempelvis depåladdning innebär att bussen har en begränsad körsträcka innan den måste laddas igen, och tilläggsaddning begränsar flexibiliteten av busslinjen då bussen blir beroende av laddstationerna på den sträckan.

Inlåsningseffekter nämns i befintlig forskning, men på grund av att det inte finns ett stort urval av genomförda satsningar och att genomförda satsningar inte har varit drift så länge finns begränsat med information.

3. Vilka kunskapsluckor kan identifieras?

Befintlig forskning om elbussar i kollektivtrafiken bidrar med modeller och metoder för en kostnads- och energieffektiv omställning av busstrafiken. Val av teknik, batterityp och laddstrategi, samt elbussens integration i kollektivtrafiken har fått mycket uppmärksamhet. Det finns alltså rätt mycket forskning som kan bidra till att övergången till elektrifierad busstrafik underlättas. Det finns ett behov av dessa studier som kan utgöra beslutsunderlag när fler städer introducerar elbussar i den ordinarie trafiken. Vi kan utifrån genomgången av tidigare forskning konstatera att det råder konsensus kring viss kunskap och vissa lärdomar, medan annat är mer ifrågasatt, samt att det för en del frågor helt saknas kunskapsunderlag.

- **Tekniken fungerar väl – men det saknas kunskap om uppskalning**

Till att börja med belyser resultaten från de genomgångna studierna att tekniken fungerar väl. Det inte är tekniken i sig som är problemet vid införandet av elbussar. Vi har inte funnit några exempel på fall där införandet resulterat i omfattande problem med driften, eller att resultaten från studierna kan ses som en tydlig kritik mot införandet av elbussar. Samtidigt kan vi konstatera att befintlig kunskap till stor del baseras på data från demonstrationsprojekt som får agera utgångspunkt då en större satsning studeras. Det finns indikationer på att teknik och lösningar som passar i en mindre skala kanske inte är lämpliga i en större omställning. Det behövs alltså mer forskning som följer upp erfarenheter där elbussar använts i ordinarie drift under en längre tidsperiod.

- **Elbuss – byte av drivmedel eller del av en större omställning?**

Många studier utgår också från premissen att elbussarna ska passa in i befintliga trafikupplägg och att de ska införas inom ramen för befintliga processer för upphandling och planering. Detta perspektiv innebär att elektrifiering ses som en övergång till ett nytt bränsle och inte som en del av en mer genomgripande omställning. I några studier framförs kritik mot detta förhållningssätt som man menar begränsar potentialen i omställningen till en elektrifierad busstrafik. Här lyfts exempelvis möjligheten till nya lösningar såsom hållplatser inomhus, vilket exempelvis skulle kunna ge busstrafiken en tyngre roll som strukturskapande element i stadsplaneringen. Även frågan om vilken roll elektrifiering av busstrafiken ska spela i omställningen av hela transportsystemet diskuteras. De lösningar som nu implementeras, där teknikvalet i princip står mellan depåladdning och tilläggladdning fokuserar på busstrafiken i sig, medan andra lösningar som än så länge är i utvecklingsstadiet, såsom elvägar och andra former av laddning under drift kan ha en större potential att påverka utvecklingen av hela transportsystemet i framtiden. Det saknas kunskap om vilka möjligheter och utmaningar det finns för en övergång till elbussar som en del av en större omställning till ett elektrifierat transportsystem.

- **Höga investeringskostnader – en minskande barriär?**

En central barriär för införandet av elbussar handlar om höga investeringskostnader för fordon/batterier och laddinfrastruktur. Genomgången av litteratur visar att det råder konsensus om att barriären som investeringskostnaden utgör kan förväntas minska i takt med att kostnaderna för batteri/fordon/laddinfrastruktur sjunker. Samtidigt kan man konstatera att resultat avseende kostnaderna för elbuss jämfört med andra alternativ beror på när, hur och var studierna är gjorda.

Tidpunkten för genomförandet har stor betydelse eftersom utvecklingen gått snabbt, vilket påverkar antaganden som görs om kostnader, inte minst kopplade till livslängden på batterier. Vidare görs också antagen om framtida prisutvecklingar för teknik och drivmedel (både för el och för andra konkurrerande energibärare). Den snabba teknikutvecklingen gör att de antaganden som görs inte alltid är relevanta i ett senare skede. Det behövs mer forskning som följer upp och uppdaterar lägesbilden kring kostnader för fordon, infrastruktur och drift av elbussar i ordinarie trafik. Den snabba förändringstakten innebär också att resultat från sådana studier behöver publiceras i andra forum än vetenskapliga artiklar. Detta eftersom vetenskapliga artiklar vanligtvis genomgår långa granskningsprocesser som innebär att resultaten kan riskera att vara inaktuella då de publiceras.

- **Land, stad, busslinje – kontextens betydelse**

Var studien är genomförd är viktigt eftersom omställningsprocesserna ser olika ut i olika länder och i olika städer. I Sverige där stora delar av bussflottan redan är fossilfri är en jämförelse med diesel eller andra fossila bränslen oftast inte relevant. På en mer lokal geografisk nivå visar också resultaten från olika studier att förutsättningar såsom linjenät, längd på linjer, trafikupplägg och turtäthet har stor påverkan på resultat från studier som försökt svara på frågan om vilket alternativ av depå- eller tilläggs-laddning som har lägst kostnad. Noterbart är exempelvis att resultaten från en svensk studie indikerade att total ägandekostnad för elbussar med tilläggs-laddning kan vara både högre och lägre jämfört med alternativ som HVO och biogas beroende på busslinjens längd och trafikupplägg.

- **Ansvarsfördelning och samverkansutmaningar**

Frågor om avtalsformer och fördelning av ansvar och risker när det gäller investeringar och drift är viktiga att studera eftersom kollektivtrafikens organisering ofta innebär att fördelarna med billigare drift inte direkt tillfaller de aktörer som belastas med kostnader för investeringar i infrastruktur. I Sverige är "normalfallet" (det finns dock undantag) att den regionala nivån bekostar driften av busstrafiken via upphandling av privata trafikoperatörer, medan investeringar i infrastruktur finansieras av kommunen/regionen/staten, antingen var för sig, eller via samfinansiering.

Detta fragmenterade ansvar innebär exempelvis att resultat som handlar om optimala teknikval från ett kostnadsperspektiv bör ses i skenet av att investeringar i laddinfrastruktur (inklusive framdragning av el), ombyggnad av hållplatser, eller behov av nya depåer, kopplar till många samverkansutmaningar. Den totala kostnaden är givetvis viktig, men långt ifrån den enda faktorn som påverkar hur olika aktörer hanterar beslut kring investeringar. Enskilda organisationers budgetramar, finansieringsmodeller, formella eller informella uppdelningar av ansvarområden, normer och idéer kring olika tekniska lösningar kan exempelvis ha stor betydelse för dynamiken mellan aktörerna.

Det behövs mer forskning om den här typen av frågor som ger kunskap om hur och på vilka grunder beslut om teknikval och upplägg för elektrifierad busstrafik fattas i samverkansprocesser mellan olika aktörer.

- **Fordon och marknad i förändring**

Man kan också konstatera att det befintliga kunskapsunderlaget uteslutande fokuserar på fordon och teknik för s.k. klass I-bussar (d.v.s. bussar avsedda för stadstrafik). Elektrifiering av klass II-bussar (avsedda för regionaltrafik) är än så länge inte vanligt förekommande, vilket förstås speglas i forskningen. I takt med utveckling av fordon och även nya lösningar för laddning under drift (ex elvägar) kommer detta troligtvis att bli en viktig fråga att studera.

En annan fråga som rör fordon och teknik som inte berörs i litteraturen handlar om att marknaden för fordonstillverkning har förändrats. Det finns många aktörer på elbussmarkanden, väletablerade traditionella fordonstillverkare såväl som för branschen nya aktörer, såsom fordonstillverkare specialiserade på elbussar och företag som sysslar med utveckling och tillverkning av laddinfrastruktur. Denna utveckling väcker frågor kring gemensamma standarder för fordon, depåer och annan infrastruktur och om val av teknik och fordon innebär inlåsningar eller andra utmaningar, exempelvis vid övergång mellan olika operatörer.

- **Vad innebär en lyckad omställning till elbussar?**

Avslutningsvis kan vi konstatera att det i Sverige nu finns ett flertal städer där elbussar är i drift och där omställningen påbörjats. I vissa mindre städer är elektrifieringen av busstrafiken redan avklarad. Det finns därför skäl att samla de erfarenheter och kunskap som dessa städer kan bidra med. Detta kräver andra utvärderingsmetoder än det som i dagsläget behandlar omställningen snarare än driften. Viktiga frågor för sådana studier, där kunskapen ännu är begränsat handlar på en övergripande nivå om hur en omställning till elektrifierad busstrafik kan och bör utvärderas. Vad innebär en ”lyckad” satsning och på vilka grunder kan man göra en sådan bedömning? I vilken mån kan de utvärderingsmetoder som rör genomförbarheten appliceras även på ett system i drift? Vilka andra typer av metoder, eller teoretiska ansatser än de som förekommer i den publicerade forskningen kan bidra till att utveckla kunskap om omställningen till elbussar?

4. Referenser

- [1] M. Aldenius, E. Forsström, J. Khan, and A. Nikoleris, "Elektrifiering av stadsbussar - En genomgång av erfarenheter i Sverige och Europa," Lund, May 2016.
- [2] A.-C. Lundström, M. N. Holmström, E. Torstensson, and M. Eriksson, "Elbussar i Sveriges kollektivtrafik - En kartläggning av Trafikförvaltningen Stockholm, Skånetrafiken och Västrafik utifrån fyra perspektiv," Solna, Sep. 2019.
- [3] CROW, "Nederland koploper in Europa met zero-emissiebus," Jun. 04, 2017. <https://www.crow.nl/over-crow/nieuws/2020/juni/nederland-in-europa-op-kop-met-zero-emissiebus> (accessed Dec. 09, 2020).
- [4] UITP, "ZeEUS eBus Report An overview of electric buses in Europe," Brussels, 2016.
- [5] UITP, "ZeEUS eBus Report #2 An updated overview of electric buses in Europe," Brussels, Oct. 2017.
- [6] M. Aldenius, "Influence of public bus transport organisation on the introduction of renewable fuel," *Research in Transport Economics*, vol. 69, pp. 106–115, 2018.
- [7] D. Göhlich, T. A. Fay, D. Jefferies, E. Lauth, A. Kunith, and X. Zhang, "Design of urban electric bus systems," *Design Science*, vol. 4, 2018, doi: 10.1017/dsj.2018.10.
- [8] A. Grauers, S. Borén, and O. Enerbäck, "Total cost of ownership model and significant cost parameters for the design of electric bus systems," *Energies*, vol. 13, no. 12, Jun. 2020, doi: 10.3390/en13123262.
- [9] K. Blynn and J. Attanucci, "Accelerating Bus Electrification: A Mixed Methods Analysis of Barriers and Drivers to Scaling Transit Fleet Electrification," *Transportation Research Record*, vol. 2673, no. 8, pp. 577–587, Aug. 2019, doi: 10.1177/0361198119842117.
- [10] F. Meishner and D. U. Sauer, "Technical and economic comparison of different electric bus concepts based on actual demonstrations in European cities," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 10, no. 2, pp. 144–153, Jun. 2020, doi: 10.1049/iet-est.2019.0014.
- [11] A. Lajunen, "Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods," *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, pp. 56–67, 2018.
- [12] N. Quarles, K. M. Kockelman, and M. Mohamed, "Costs and benefits of electrifying and automating bus transit fleets," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 10, May 2020, doi: 10.3390/SU12103977.
- [13] F. Tong, C. Hendrickson, A. Biehler, P. Jaramillo, and S. Seki, "Life cycle ownership cost and environmental externality of alternative fuel options for transit buses," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 57, pp. 287–302, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.trd.2017.09.023.
- [14] A. Lajunen and T. Lipman, "Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses," *Energy*, vol. 106, pp. 329–342, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.03.075.
- [15] S. P. Holland, E. T. Mansur, N. Z. Muller, and A. J. Yates, "The environmental benefits of transportation electrification: Urban buses," *Energy Policy*, vol. 148, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.enpol.2020.111921.
- [16] M. Hamurcu and T. Eren, "Electric bus selection with multicriteria decision analysis for green transportation," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 7, Apr. 2020, doi: 10.3390/su12072777.
- [17] V. Konečný, J. Gnap, T. Settey, F. Petro, T. Skrúčaný, and T. Figlus, "Environmental sustainability of the vehicle fleet change in public city transport of selected city in central Europe," *Energies*, vol. 13, no. 15, Aug. 2020, doi: 10.3390/en13153869.
- [18] S. Krawiec *et al.*, "Urban public transport with the use of electric buses - Development tendencies," *Transport Problems*, vol. 11, no. 4, pp. 127–137, 2016, doi: 10.20858/tp.2016.11.4.12.

- [19] A. Brdulak, G. Chaberek, and J. Jagodzinski, "Development forecasts for the zero-emission bus fleet in servicing public transport in chosen EU member countries," *Energies*, vol. 13, no. 6, Aug. 2020, doi: 10.3390/en13164239.
- [20] S. Pelletier, O. Jabali, J. E. Mendoza, and G. Laporte, "The electric bus fleet transition problem," *Transportation Research Part C*, vol. 109, pp. 174–193, 2019.
- [21] M. Rogge, E. van der Hurk, A. Larsen, and D. Uwe Sauer, "Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure _ Elsevier Enhanced Reader," *Applied Energy*, vol. 211, pp. 282–295, 2018.
- [22] R. Wei, X. Liu, Y. Ou, and S. Kiavash Fayyaz, "Optimizing the spatio-temporal deployment of battery electric bus system," *Journal of Transport Geography*, vol. 68, pp. 160–168, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2018.03.013.
- [23] N. A. El-Taweel, H. E. Z. Farag, and M. Mohamed, "Integrated Utility-Transit Model for Optimal Configuration of Battery Electric Bus Systems," *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 738–748, Mar. 2020, doi: 10.1109/JSYST.2019.2926460.
- [24] B. R. Ke, C. Y. Chung, and Y. C. Chen, "Minimizing the costs of constructing an all plug-in electric bus transportation system: A case study in Penghu," *Applied Energy*, vol. 177, pp. 649–660, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.05.152.
- [25] K. An, "Battery electric bus infrastructure planning under demand uncertainty," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 111, pp. 572–587, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.trc.2020.01.009.
- [26] M. Xylia, S. Leduc, P. Patrizio, F. Kraxner, and S. Silveira, "Locating charging infrastructure for electric buses in Stockholm," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 78, pp. 183–200, May 2017, doi: 10.1016/j.trc.2017.03.005.
- [27] S. Bakker and R. Konings, "The transition to zero-emission buses in public transport – The need for institutional innovation," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 64, pp. 204–215, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.trd.2017.08.023.
- [28] J. Orbea, S. Castellanos, C. Albuquerque, R. Sclar, and B. Pinheiro, "Adapting Procurement Models for Electric Buses in Latin America," *Transportation Research Record*, 2019, doi: 10.1177/0361198119846097.
- [29] S. Borén and A. Grauers, "Stakeholder Collaboration Models for Public Transport Procurement of Electric Bus Systems," *The International Journal of Sustainability Policy and Practice*, vol. 15, no. 1, 2019, doi: 10.18848/2325-1166/CGP.
- [30] M. Moataz, M. Ferguson, and P. Kanaroglou, "What hinders adoption of the electric bus in Canadian transit_ Perspectives of transit providers _ Elsevier Enhanced Reader," *Transportation Research Part D*, vol. 64, pp. 134–149, 2018.
- [31] M. Xylia and S. Silveira, "The role of charging technologies in upscaling the use of electric buses in public transport: Experiences from demonstration projects," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 118, pp. 399–415, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.tra.2018.09.011.
- [32] X. Li, S. Castellanos, and A. Maassen, "Emerging trends and innovations for electric bus adoption—a comparative case study of contracting and financing of 22 cities in the Americas, Asia-Pacific, and Europe _ Elsevier Enhanced Reader," *Research in Transportation Economics*, vol. 69, pp. 470–481, 2018.
- [33] S. Borén, L. Nurhadi, and H. Ny, "Preferences of electric buses in public transport, conclusions from real life testing in eight swedish municipalities ," *International Journal of Environmental, Chemical, Geological and Geophysical Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 255–264, 2016.
- [34] J. Q. Li, "Battery-electric transit bus developments and operations: A review," *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 10, no. 3. Taylor and Francis Ltd., pp. 157–169, Mar. 15, 2016, doi: 10.1080/15568318.2013.872737.
- [35] C. H. Häll, A. (Avi) Ceder, J. Ekström, and N. H. Quttineh, "Adjustments of public transit operations planning process for the use of electric buses," *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, vol. 23, no. 3, pp. 216–230, May 2019, doi: 10.1080/15472450.2018.1488131.

5. Appendix 1 Metod för litteraturgenomgången

Kunskap om omställningen till elbussar är publicerad både i vetenskapliga journaler och i rapporter från offentliga och privata organisationer. I den här studien fokuserar vi på att sammanställa och analysera kunskap publicerad i vetenskapliga journaler.

Vi har gått igenom forskning som handlar om batteri- och teknikutveckling [7]–[10], energiförbrukning och/eller miljöpåverkan [11]–[17] och trafikplanering [18]–[26]. Vad gäller rapporter från offentliga organisationer finns det i Sverige ett antal utredningar, utvärderingar och sammanställningar från olika myndigheter, exempelvis Trafikverket, regioner eller kommuner. Internationellt finns liknande rapporter från exempelvis EU projekt. Rapporter från privata organisationer är ofta framtagna av konsultföretag eller aktörer som är involverade i teknikutvecklingen av fordon, batterier och laddinfrastruktur.

Att enbart göra en litteratursökning med sökordet electric bus genererar därför oändligt många träffar av varierande karaktär. Med hänsyn till projektets syfte och denna rapports mål finns anledning till att även söka efter vetenskapliga studier som rör stadsplanering, upphandling och utvärderingar. Söktermerna som grundar litteraturgenomgången är således kombinationer av electric bus, public transport, urban planning, procurement och evaluation.

På grund av spännvidden på hittills gjorda studier har vi i litteratursökningen arbetat explorativt för att hitta relevant information. Litteraturen kommer främst från en bred litteratursökning i Lunds Universitetsbiblioteks e-tjänst, Google Scholar samt Scopus. På grund av den snabba teknikutvecklingen och ämnets aktualitet har enbart studier från 2016 och framåt inkluderats. Litteraturgenomgången avgränsas genom att bara inkludera artiklar som är publicerade i vetenskapliga journaler. Annat material, exempelvis rapporter, sammanställningar eller projekthandlingar, ibland kallad ”grå litteratur” inkluderas inte i genomgången. Detta val motiveras dels av att det inte är möjligt att göra strukturerade databassökningar av grå litteratur och dels av att vi anser att kunskapen bör ha gått igenom en granskningsprocess för att säkerställa tillräcklig kvalitet. Avgränsningen av typen av litteratur samt tidsspannet för sökningen, 2016 och framåt, gör också att mängden artiklar som är inkluderade är hanterbar.

Urvalsprocessen resulterade i att ett hundratal relevanta artiklar identifierades i ett första steg. Detta urval avgränsades sedan ytterligare efter en genomgång av titel, keywords och sammanfattning. Artiklar som rör elektriska fordon i allmänhet eller med mycket stort teknikfokus, exempelvis angående batteriutveckling, gallrades ut i detta steg. En komplettering av databassökningarna gjordes genom att gå igenom referenslistor i en del av artiklarna. Från denna urvalsprocess har sammanlagt 29 artiklar identifierats som inkluderas i litteraturgenomgången, vilka visas i Tabell 1.

Tabell 1 - Artiklar inkluderade i litteraturgenomgång

Ref.	Författare	Titel	År	Tema
7	Göhlich, D., Fay, T.-A., Jeffries, D., Lauth, E., Kunuth, A., Zhang, X.	Design of Urban Electric Bus Systems	2018	Tekniskval
8	Grauers, A., Borén, S., Enerback, O.	Total Cost of Ownership Model and Significant Cost Parameters for the Design of Electric Bus Systems	2020	Tekniskval
9	Blynn, K., Attanucci, J.	Accelerating Electrification: A Mixed Methods Analysis of Barriers and Drivers to Scaling Transit Fleet Electrification	2019	Tekniskval
10	Meisner, F., Uwe Sauer, D.	Technical and Economic Comparison of Different Electric Bus Concepts Based on Actual Demonstrations in European Cities	2020	Tekniskval
11	Lajunen, A.	Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods	2018	Tekniskval
12	Quares, N., Kockelman, K., Mohamed, M.	Costs and Benefits of Electrifying and Automating Bus Transit Fleets	2020	Tekniskval
13	Tong, F., Hendrickson, C., Biehler, A., Jaramillo, P., Seki, S.	Life cycle ownership cost and environmental externality of alternative fuel options for transit buses	2017	Tekniskval
14	Lajunen, A., Lipman, T.	Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses	2016	Tekniskval
15	Holland, S., Mansur, E., Muller, N., Yates, A.	The environmental benefits of transportation electrification: Urban buses	2020	Tekniskval
16	Hannuc, M., Eren, T.	Electric bus selection with multicriteria decision analysis for green transportation	2020	Tekniskval
17	Konečný, V., Gnáp, J., Settey, T., Piero, F., Skřivánek, T., Fíglus, T.	Environmental Sustainability of the vehicle fleet change in public city transport of selected city in central Europe	2020	Tekniskval
18	Krawiec, S., Lazarz, B., Markusik, S., Karon, G., Sierpinski, G., Krawiec, K.	Urban public transport with the use of electric buses - Development tendencies	2016	Elbussen i kollektivtrafiksystemet
19	Brdulak, A., Chaberek, G., Jagodzinski, J.	Development Forecasts for the Zero-Emission Bus Fleet in Servicing Public Transport in Chosen EU Member Countries	2020	Elbussen i kollektivtrafiksystemet
20	Pelletier, S., Jabali, O., Mendoza, J., Laporte, G.	The electric bus fleet transition problem	2019	Elbussen i kollektivtrafiksystemet
21	Rogge, M., van der Hek, E., Larsen, A., Uwe Sauer, D.	Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure	2018	Elbussen i kollektivtrafiksystemet
22	Wei, R., Liu, X., Ou, Y., Fayyaz, K.	Optimizing the spatio-temporal deployment of battery electric bus system	2018	Elbussen i kollektivtrafiksystemet
23	El-Taweel, N., Farag, H., Mohamed, M.	Integrated utility-transit model for optimal configuration of battery electric bus systems	2020	Elbussen i kollektivtrafiksystemet
24	Ke, B.-R., Chung, C.-Y., Chen, Y.-C.	Minimizing the costs of constructing an all plug-in electric bus transportation system: A case study in Penghu	2016	Elbussen i kollektivtrafiksystemet
25	An, K.	Battery electric bus infrastructure planning under demand uncertainty	2020	Elbussen i kollektivtrafiksystemet
26	Xyfia, M., Leduc, S., Patrizio, P., Kravner, F., Silveira, S.	Locating Charging Infrastructure for Electric Buses in Stockholm	2017	Elbussen i kollektivtrafiksystemet
27	Bakker, S., Konings, R.	The transition to zero-emission buses in public transport - The need for institutional innovation	2020	Elbussen i kollektivtrafiksystemet
28	Orbea, J., Castellanos, S., Albuquerque, C., Sclar, R., Punheiro, B.	Adapting Procurement Models for Electric Buses in Latin America	2019	Studie av genomförd satsning på elbussar
29	Borén, S., Grauers, A.	Stakeholder Collaboration Models for Public Transport Procurement of Electric Bus Systems	2019	Studie av genomförd satsning på elbussar
30	Moataz, M., Ferguson, M., Kanaroglou, P.	What hinders adoption of the electric bus in Canadian transit? Perspectives of transit providers	2018	Studie av genomförd satsning på elbussar
31	Xyfia, M., Silveira, S.	The role of charging technologies in upscaling the use of electric buses in public transport- Experiences from demonstration projects	2018	Studie av genomförd satsning på elbussar
32	Li, X., Castellanos, S., Maassen, A.	Emerging trends and innovations for electric bus adoption- A comparative case study of contracting and financing of 22 cities in the Americas, Asia-Pacific and Europe	2018	Studie av genomförd satsning på elbussar
33	Nurhadi, L., Borén, S., Ny, H.	Preferences of Electric Buses in Public transport: Conclusions from Real Life Testing in Eight Swedish Municipalities	2016	Studie av genomförd satsning på elbussar
34	Li, J.-Q.	Battery-electric transit bus developments and operations: A review	2016	Studie av genomförd satsning på elbussar
35	Hall, C., Ceder, A., Ekström, J., Quittneh, N.-H.	Adjustments of public transit operations planning process for the use of electric buses	2019	Studie av genomförd satsning på elbussar



K2 är Sveriges nationella centrum för forskning och utbildning om kollektivtrafik. Här möts akademi, offentliga aktörer och näringsliv för att tillsammans diskutera och utveckla kollektivtrafikens roll i Sverige.

Vi forskar om hur kollektivtrafiken kan bidra till framtidens attraktiva och hållbara storstadsregioner. Vi utbildar kollektivtrafikens aktörer och sprider kunskap till beslutsfattare så att debatten om kollektivtrafik förs på vetenskaplig grund.

K2 drivs och finansieras av Lunds universitet, Malmö universitet och VTI i samarbete med Region Stockholm, Västra Götalandsregionen och Region Skåne. Vi får stöd av Vinnova, Formas och Trafikverket.

www.k2centrum.se

