

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Tekniksprång på väg	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska [Klicka här och skriv]	
Universitet/högskola/företag Kungliga tekniska högskolan	Avdelning/institution Transportvetenskap
Adress 100 44 Stockholm	
Namn på projektledare Daniel Jonsson	
Namn på ev övriga projektdeltagare Wilco Burghout, Staffan Algiers	
Nyckelord: 5-7 st Självstyrande fordon, systemanalys, prognosmodellering	

Förord

Projektet har finansierats av Energimyndigheten. Vi har också haft stor nytta av kontakter med andra initiativ kring självstyrande fordon som gett oss forum för att diskutera vårt arbete. Vi har haft möjligheten att delta i ett antal seminarier, workshops, och projektansökningar. Utan inbördes ordning: Integrated Transport Research Lab, KTH; Trafikverket; Centre for Traffic Research, KTH; Bil Sweden. Vidare har projektet kunnat presentera vid ett antal seminarier som Transportforum, Linköping; Transport Research Board Annual Meeting, Washington; Trafiknät Stockholm.

Innehållsförteckning.

Framtidens transportsystem	7
Energieffektiva fordon	7
Utvecklingen av flottstyrningssystem och transporter som tjänst	8
Självstyrande fordon	9
Modellering	10
Efterfrågemodellering	10
Utbud	11
Priser för transporttjänster levererade av självkörande bilar	12
Fordonskostnader	12
Kapitalkostnader	12
Driftskostnader	13
Systemkostnader	13
Ett räkneexempel	14
Antaganden i andra studier	15
Referenser	Error! Bookmark not defined.
Efterfrågan på självkörande resor	16
Scenario: Nuläge	18
Scenario: Självkörande bilar	18
Olika svenska aktörers synpunkter på utvecklingen mot autonoma fordon	Error! Bookmark not defined.
Storskaliga demonstrationer	Error! Bookmark not defined.
La Rochelle, Frankrike	Error! Bookmark not defined.
Lausanne – EPFL, Schweiz	Error! Bookmark not defined.
Trikala, Grekland	Error! Bookmark not defined.
Småskaliga demonstrationer	Error! Bookmark not defined.
Oristane, Italien	Error! Bookmark not defined.
Vantaa, Finland	Error! Bookmark not defined.
CASA, Frankrike	Error! Bookmark not defined.
Donostia / San Sebastian, Spanien	Error! Bookmark not defined.
ARTS-användare	Error! Bookmark not defined.
Allmänhetens uppfattningar	Error! Bookmark not defined.
Olika intressenters uppfattningar	Error! Bookmark not defined.

Sammanfattning

System av självkörande bilar har potentialen att förändra resandet i vardagen för väldigt många människor. Kombinationen av autonoma taxibilar, som drivs av elmotor, organiserade i flottor där människor kan beställa transporttjänster har synergieffekter på såväl priser på resor som utnyttjandet av bilflottan. Hur mycket energianvändningen förändras utifrån ett systemperspektiv är dock fortfarande mycket svårt att göra prognoser för. Utmaningen ligger i att det finns effekter som verkar i olika riktningar. Lägre priser leder till fler resor, samtidigt som effektivare fordon och samåkningsmöjligheter minskar en enskild resas energianvändning. Storleken på dessa effekter kan inte uppskattas utan bra analysverktyg i form av modeller.

Uppskattningar av kostnaderna för att driva transporttjänster med flottor av autonoma elbilar visar att under rimliga antaganden så kommer priset för att resa att kunna vara konkurrenskraftigt med privat bil. Våra beräkningar visar också att även utan den prissänkningen så leder möjligheten att använda bil utan att ha körkort till en potentiellt stor förändring i resandet, med kraftigt ökad andel bilresor. En slutsats som kan dras blir därför att resetjänster med självkörande bilar kan komma att utgöra en mycket stor tillgänglighetsförbättring, samtidigt som risken också finns att det kommer att sätta infrastrukturen under stor press. Fler studier med skarpare modellsystem kommer att krävas för att reda ut vilka policyåtgärder som kan komma att behövas för att hitta en bra balans.

Summary

Systems of self-driving electric vehicles have the potential to change every-day travel behaviour for many people. The combination of autonomy, electric propulsion, organised in fleets, available through IT-driven transport services, yields synergy effects. Prices on trips may become substantially lower and the vehicles can be used more efficiently. However, it is still challenging to assess the impact on energy use on a systems level. The challenge stems from the fact that there are mechanisms working in both directions. Lower prices lead to more travel, while more efficient vehicles and possible shared rides lessens the energy use of the individual trip. Better analysis tools in the form of models are necessary to assess the relative size of these effects.

Estimates of the costs of running transport services using fleets of self-driving vehicles show that under reasonable assumptions the costs would be competitive with private cars, and sometimes substantially lower. Our analysis also shows that even without that price advantage, the possibility of using a car service without the need for a driver's license leads to a potentially enormous change in behaviour, with sharply increased share of trips going by car. A conclusion is therefore that transport services using self-driving cars can lead to a substantial increase in accessibility for many people. On the other hand there is a risk that this puts impossible pressure on the infrastructure. More work, with better modelling and analysis tools is needed to assess which policy measures will be necessary to find an acceptable balance.

Inledning/Bakgrund

Dagens trafikproblem med trängsel, olyckor, energiåtgång och utsläpp av växthusgaser är väl kända. En förväntad ökad inflyttning till storstadsregionerna spär på problemen, och den fordonstekniska utvecklingen har svårigheter att leverera energi- och miljömässigt effektiva fordon anpassade till nuvarande användningsmönster till konkurrenskraftiga priser. Trafikpolitiska åtgärder som är tillräckliga för att minska miljöbelastningen och uppnå de transportpolitiska målen har hittills inte beslutats.

Vi tror emellertid att kombinationen av ny mer energieffektiv fordonsteknologi och utvecklingen av självstyrande fordon kan ge synergieffekter som möjliggör inte bara en miljömässigt bättre och trafiksäkrare fordonstrafik i våra städer, utan kan tillsammans med systemoptimering av trafikflödena också möjliggöra energieffektivare transporter med stor stadsbyggnadsmässig potential. Genom att utnyttja möjligheterna till nya användningsmönster och nya ägarformer kan fordonstrafiken på sikt fullständigt ändra karaktär, från

- enskilt ägda mänskligt framförda fossilbränsleddrivna fordon med krav på parkeringsutrymme i start och målpunkt till
- systemoptimerade transporttjänster levererade av systemägda efterfrågestyrda förarlösa fordon som ställs upp på platser med lägre utnyttjandegrad när de inte används.

En sådan utveckling kräver mer än den rent tekniska utvecklingen av fordon och styrsystem. Den kräver också entreprenörmässiga insatser i form av systembyggande och tjänsteutveckling, liksom institutionella förändringar såsom juridiska förutsättningar för driften av sådana system. Det är nu dags att tydliggöra såväl den potential som ligger i utvecklingen av sådana system som de förutsättningar som krävs för att de ska kunna förverkligas.

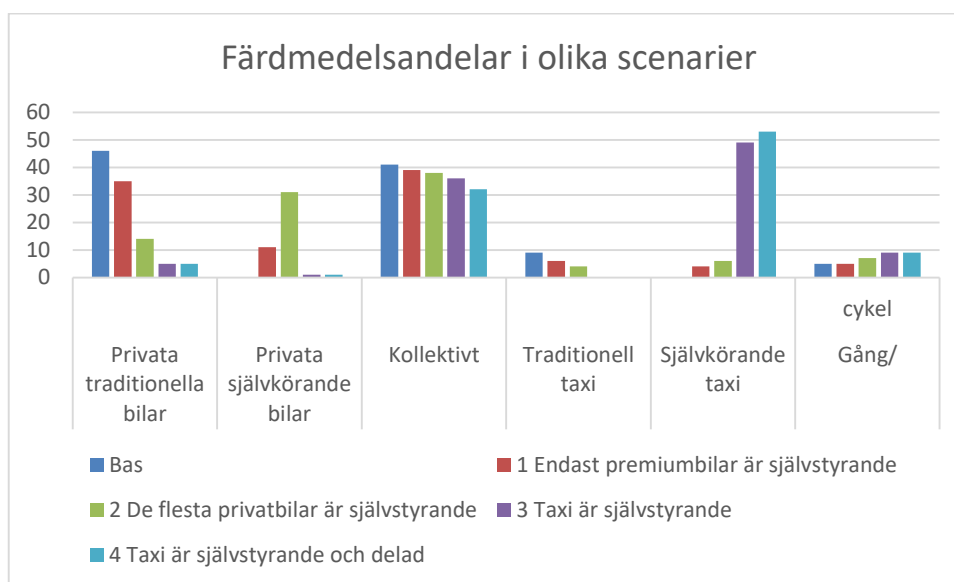
För att göra detta krävs en tydlig bild av vilka forskningsinsatser som bör genomföras. När det gäller utvecklingen av självstyrande bilar pågår mycket forskning såväl inom akademi som inom industrin, och vi kommer inte att göra några insatser inom det området. Detta gäller också utvecklingen av mer energieffektiva drivlinor. I stället vill vi koncentrera oss på det innovativa med vår idé, nämligen hur styr- och fordonsteknik kan användas på ett effektivt sätt (dess potential och problem). Det är nämligen troligt att den riktigt stora potentialen med dessa nya tekniska lösningar ligger i att de kan komma att ändra användningen av transportsystemet i grunden. Det är emellertid inte säkert att den potentialen uppnås utan medveten planering, eller att den ens leder åt rätt håll av sig själv. Energieffektivisering kan till exempel tas ut i form av ökat resande.

Det saknas naturligtvis inte idéer om hur den framtida trafikförsörjningen kan se ut – ett exempel på det är det arbete som genomförts i EU-projektet CityMobil (CityMobil, 2012). I detta projekt har man skissat på hur man kan kombinera olika former av mer eller mindre automatiserade trafiksystem, även med demonstrationsinslag. KPMG har tillsammans med Car Automotive Research i USA tagit fram en beskrivning (KPMG/CAR, 2012) av en tänkbar utveckling av

självstyrande bilar, i vilken man också ser möjligheterna till annorlunda användningsmönster och ägarstruktur. Att detta är en idé med potentiellt ganska omvälvande effekter styrks också av den rapport om självstyrande bilar som presenterades vid World Economic Forum i Davos i början av 2016.

Vid detta tillfälle presenterades en studie om användningen av självkörande fordon genomförd av Boston Consulting Group (BCG). Förutom studier av förväntningar och attityder bland vanliga människor och företrädare för olika städer redovisades en prognos för hur tekniken skulle kunna komma att användas, givet 4 olika scenarier. I figur 1 sammanfattas resultaten i form av förväntad färdmedelsfördelning för respektive scenario.

I scenario 3 och 4 sker en dramatisk förändring av andelen resor med självkörande taxi, framför allt på privatbilarnas bekostnad.



Figur 1 Färdmedelsfördelning vid olika scenarier (BCG 2016)

Det är dock oklart hur analysen genomförts, och vilka antaganden som ligger bakom resultaten, men det är intressant att notera att idén med självkörande taxiflottor anses kunna innebära en mycket kraftig förändring av resandet i urbana miljöer.

Idén är emellertid relativt ny och diskussionen om vilken potential självstyrande bilar kan komma att ha är fragmenterad och saknar ofta ett systemperspektiv. Vi har idag därför inte tillräcklig kunskap om dess implikationer i alla delar. Målsättningen för detta projekt var därför att åstadkomma en plattform för framtida forskning genom att kartlägga de frågeställningar som är av intresse i sammanhanget, samt att – där så är möjligt – ge en antydning om storleksordningen på kostnader, intäkter och andra effekter.

Även om ett trafiksystem baserat på självstyrande bilar ligger långt fram i tiden är det angeläget att redan nu försöka förstå vilka effekter det kan ha på den framtida

trafiken eftersom de beslut som fattas idag om stadsbyggnad och ny infrastruktur har så långa ledtider och livslängd.

Teknikutvecklingen har ännu inte gått så långt att självstyrande bilar direkt kan implementeras, även om det börjat dyka upp ganska många demoprojekt de senaste åren. Utvecklingen har däremot gått tillräckligt långt för att man bör börja studera vilken inverkan den kan ha på den framtida transportförsörjningen. En viktig observation är då att den tycks möjliggöra helt andra användningsmönster jämfört med nuvarande bilanvändning, och att drift- och ägandeformerna kan bli helt annorlunda – och att dessa faktorer kan påverka hur stor effekterna kan bli.

Det är således inte självklart på vilket sätt självstyrande fordon kommer att användas i framtiden, och det är heller inte klart i vilken utsträckning våra nuvarande verktyg är tillräckliga för att kunna utvärdera införandet av självstyrande fordon i olika former. Projektet är därför inte en regelrätt utvärdering av fenomenet självstyrande bilar, utan syftar till att förstå under vilka betingelser självstyrande bilar kan införas, och att klarlägga frågeställningar om i vilka former detta kan ske och vad som krävs för att kunna beskriva dess effekter på transportförsörjningen. Dessa kunskaper kommer att bilda en plattform för fördjupningar inom framtida forskningsprojekt.

Genomförande

Som vi ser det är det en kombination av tre tekniska utvecklingsspår som kommer att ha en potentiellt mycket större inverkan på transportsystemets funktionssätt än vad de har var och en för sig.

- Energieffektiva (eldrivna, små) fordon
- Autonoma fordon
- Transport som tjänst från operatörsägda flottor

Vår utgångspunkt har varit att det är i skärningspunkten mellan dessa tre vi ser den största potentialen för stora förändringar i transportsystemets funktionssätt. Vi använder förkortningen SAV (Systems of Autonomous Vehicles) som ett samlingsbegrepp för olika typer av sådana flottor av självkörande bilar som levererar transporttjänster.

Projektet har haft två huvudspår att arbeta med. Det ena är att arbeta fram rimliga antaganden för vilka egenskaper ett system av autonoma fordon skulle kunna ha i framtiden. Eftersom SAV bygger på teknik som ännu så länge är experimentell och bara i början av sin utveckling är sådana antaganden behäftade med mycket stora osäkerheter. Därför är det rimligaste att låta uppskattningarna ligga till grund för ett antal olika scenarier där de varierar.

I projektet har vi haft stor hjälp av att forskning och utveckling på området börjar ta form. Vi har hittat ett antal forum där vi kunnat diskutera idéer. Bland dessa kan nämnas att Trafikverket anordnade en session på Transportforum för några år sedan, samt att projektet presenterades på TRB 2015, CTR dagarna 2015, 2016.

Vidare samlar centrat Integrated Transport Lab vid KTH ett antal projekt och initiativ där forskning och näringsliv (till exempel Scania och Ericsson) med bäring på frågor som rör självkörande fordon.

Resultat

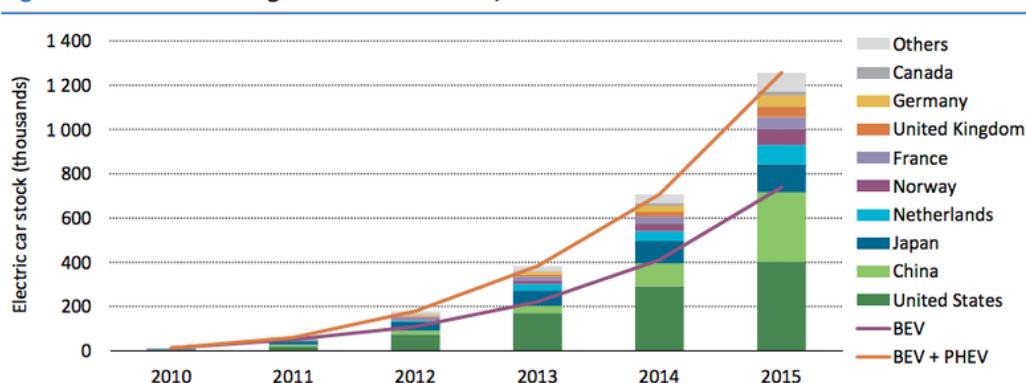
Det här avsnittet har två delar. Den första om framtidens transportsystem diskuterar några av de antaganden vi behöver göra för att kunna sätta ihop framtidsscenarier att analysera. Den andra delen diskuterar de modeller vi arbetat med. Modellerna används för att analysera effekterna av olika scenarier. Båda delarna innehåller räkneexempel som ger en antydning om dessa effekter.

Framtidens transportsystem

Energieffektiva fordon

Eldrivna fordon verkar alltmer konkurrenskraftiga och utvecklingen går mycket snabbt. International Energy Agency (IEA, 2016) uppskattar att vi 2015 passerade en miljon eldrivna bilar på vägarna i världen. Som jämförelse finns det över en miljard fossildrivna bilar så det är fortfarande en mycket liten andel. Samtidigt så har utvecklingen gått mycket snabbt, för bara ett årtionde sedan fanns det i princip inga eldrivna bilar alls som inte var demonstrationsbilar eller hobbyprojekt.

Figure 1 • Evolution of the global electric car stock, 2010-15



Note: the EV stock shown here is primarily estimated on the basis of cumulative sales since 2005.

Figur 1: Existerande eldrivna bilar, uppskattning baserad på kumulativa försäljningssiffror. BEV=batteridrivna, PHEV=Plugin-hybrider. (IEA, Global EV Outlook 2016)

De senaste åren har bilindustrin på allvar börjat släppa eldrivna fordon. Utvecklingen är enligt IEA ett resultat av en kombination av fallande priser på batterier och statliga subventioner i olika länder. Det finns också nya spelare som Tesla som experimenterar med affärsmodellen. De verkar ha som ambition att tillhandahålla även infrastruktur runt fordonet, med såväl laddningsstationer längs motorvägar som solpaneler för hemmabruk.

Introduktionen av eldrivna bilar har bromsats av det som brukar kallas ”range anxiety”, dvs oron för att få slut på energi mitt i resan. De nyaste bilarna har potentialen att demonstrera att det inte är ett lika stort problem längre. Tesla har

till exempel modeller med en räckvidd på strax under 50 mil. Samtidigt är den överväldigande majoriteten av alla resor som görs med bil mycket kortare än så. I Sverige är 50% av resorna under 5 km, 80% under 20 km. Men det är fortfarande problematiskt för en familj att fylla hela sitt resebehov med en elbil. Det är i det här sammanhanget operatörsägda flottor och transporter som tjänst kommer in. Kort räckvidd är bara ett problem ifall samma bil ska användas för både korta och långa resor.

En annan teknisk utveckling som pågår som har potential att öka attraktiviteten hos eldrivna fordon är trådlös laddning. Idag behöver användaren koppla fordonet till elnätet med en sladd vilket kan upplevas som svårt och besvärligt. Trådlös laddning är också en förutsättning för att autonoma fordon på ett enkelt sätt ska kunna ladda sig själva.¹

Utvecklingen av flottstyrningssystem och transporter som tjänst

De senaste åren har sett en explosion i om inte användande så åtminstone hype kring olika typer av transporter som tjänst. Uber som egentligen är en slags uppdatering av en traditionell taxiväxel är värderat till astronomiska summor², och biltillverkarna experimenterar med olika typer av bilpoolslösningar (tex Daimler med Car2Go, BMW med DriveNow, Volvo med Sunfleet). I Singapore har ett företag som heter nuTonomy startat en tjänst med självkörande bilar³. Gemensamt är att de använder appar och molntjänster för att matcha resenärer med bilar. En nyckel för populariteten är möjligheten att snabbt se vad priset för resan blir samt att göra betalningen smidig. Samtidigt har taxibranschen börjat svara med egna appar som minskar skillnaden mellan dem och till exempel Uber. Parallellt pågår samma utveckling för kollektivtrafiken. Allt fler kollektivtrafikhuvudmän tillhandahåller reseappar som kombinerar söktjänst med betalning. Det är antagligen bara en tidsfråga innan vi också har en bot i telefonen som tittar på alla dessa och ger en meny av resealternativ att välja på. Vi ser alltså en snabb teknikutveckling kring resetjänster och det ser ut som en intressant konvergens mellan tjänster med personbilar och kollektiva färdmedel.

Det börjar också finnas intressant forskning kring olika delar av denna utveckling. Seign & Bogenberger (2015), Weikl & Bogenberger (2015), tittar på fri-flytande bilpools, dvs sådana där bilarna inte hämtas och lämnas vid fördefinierade stationer. Wielinski, Trépanier & Morency (2015) tittar specifikt på skillnaden mellan fri-flytande och stationsbaserade pooler.

En del av potentialen i ett system av självstyrande fordon är att genom ett systemdefinierat ruttval åstadkomma en systemoptimerad fordonstrafik i stället

¹ Här kan också finnas synergieffekter med distribuerad generering av elektricitet. Tänk ett hushåll i en villa med solpaneler men utan egen bil. De skulle kunna sälja sin el självkörande bilar via en laddstation på gatan alldeles oavsett vem som äger bilen.

² Det är förstås långtifrån säkert att just Uber kommer att bli så dominerande som hypen säger, de går fortfarande med stor förlust. Oavsett det så har de demonstrerat att tekniken fungerar och att det finns efterfrågan för den typen av tjänster. Vilka som slutligen kommer att leverera tjänsterna är mer öppet.

³ <http://www.techrepublic.com/article/singapore-launches-driverless-taxis-ahead-of-uber-and-the-us/>

för en användaroptimerad fordonstrafik. Fördelen är att det existerande vägutrymmet kan användas mer effektivt genom att trafik styrs till vägar där det för stunden finns ledig kapacitet. En enskild resa som styrs om kan ta lite längre tid men i gengäld undviks trängsel som skulle förlänga många andra resor. Det förutsätter att systemet bestämmer ruttvalet för åtminstone en del av trafiken. Det kommer att finnas skäl att fundera på i vilken utsträckning det krävs samhälleligt stöd för genomförandet av ruttoptimering av bilar och bussar i trafiksystemet. I allt väsentligt är det samma problem som trängselavgifterna idag försöker lösa, vilket gör det nödvändigt att analysera flottstyrning tillsammans med prissättning.

Självstyrande fordon

För en bra översikt av de utmaningar och förtjänster det finns med autonoma fordon hänvisar vi till en utmärkt översikt av Rand Corporation (Rand, 2014). Där redovisas till exempel de olika utvecklingsstegen fram till full autonomi, där tekniken i dagens bilar, med till exempel adaptiv farthållare, körfältsvarnare och så vidare utgör ett av de tidigare stegen. För den här rapporten behöver vi inte gå djupare in på dem, då vi fokuserar på egenskaperna hos ett system med full autonomi.

Den förenklingen är nödvändig för att vi ska kunna utveckla ett modellsystem där vi kan göra analyser. Det är enklare att modellera ett trafiksystem med fullt autonoma bilar än ett med en mix av bilar på olika tekniska nivåer. Därför lämnar vi det till framtida forskning tills vidare.

Intressant nog så har det visat sig under projektets gång att är autonomi i sig inte nödvändigtvis är det som kan förväntas ge de största effekterna på transportsystemet annat än som en katalysator för de andra två tekniktrenderna. Självkörande bilar tillsammans med trådlös laddning gör elbilar mer attraktiva, och självkörande elbilar gör transporttjänster mer attraktiva.

Utvecklingen mot självstyrande/självkörande kollektivtrafik har pågått länge inom spårtrafiken. Det finns idag över 50 självkörande tunnelbane/spårvagnssystem, och i Stockholm förbereds nu Röda linjen för självkörande trafik. När det gäller busstrafik har utvecklingen inte kommit lika långt. Ett undantag är den självstyrande busslinjen i Rivium i Rotterdam, som har varit i drift sedan 2005. För att öka kunskaper och erfarenheter om självkörande busstrafik har EU finansierat CityMobil2-projektet, som är ett demonstrationsprojekt med självkörande busslinjer i 8 europeiska städer. Erfarenheterna av detta beskrivs närmare i bilaga 1.

Shanur Rahman genomförde ett examensarbete i Industriell Ekonomi vid KTH våren 2015. Som en del av underlaget genomfördes ett antal intervjuer med olika svenska aktörer när det gäller inställningen till införandet av autonoma fordon (bilaga 2). Sammanfattningsvis kan man säga att alla de intervjuade aktörerna (fordonstillverkare, operatörer och myndigheter) är positivt intresserade av utvecklingen av självstyrande fordon, men bedömer också att införande av SAV-system eller självkörande bussar ligger långt fram i tiden.

Modellering

Ungefär samtidigt som det här projektet startade slutfördes ett examensarbete här på KTH (Rigole, 2014) som gjorde ett första försök att titta på potentialen i Stockholm för självkörande bilar (tänk autonoma taxibilar). Först uppskattades hur många resor som görs med bil en vanlig dag idag utifrån modellberäkningar av totalvolym och avresetidpunkter från en resvaneundersökning. Dessa resor allokerade sedan till bilar, antingen en person per bil, eller med möjligheten att samåka i de fall det inte föranledde alltför stor extra uppoffring i restid.

Allokeringen tog hänsyn till att ifall en bil plockar upp fler resenärer får de som redan sitter i bilen extra restid till destinationen. I korthet gav studien resultatet att en sådan automatiserad taxibil skulle kunna ersätta upp till 14 personbilar. Däremot så skulle inte antalet körda fordonskilometer minska speciellt mycket. Anledningen är att det oundvikligen blir en del tomkörning mellan personresorna och att samåkning inte kan ske i speciellt hög grad utan att resenärernas restid går upp för mycket (bara drygt 2 personer per bil i genomsnitt under det mest gynnsamma scenariot). Givetvis beror detta mycket på utformningen av nätverket och efterfrågan.

Studien hade dock några brister som vi ville angripa i det här projektet. För det första utgick analysen från en fix efterfrågan. Det innebär i princip ett antagande om att människor inte reagerar på ändrade restider, när till exempel köar försvinner på grund av effektiv samåkning.

Efterfrågemodellering

De modeller vi har vårt förfogande i Sverige för att modellera efterfrågan på persontransporter har inte rätt egenskaper för att modellera transporttjänster med självkörande bilar. Det dominerande modellsystemet, Sampers, som ägs och förvaltas av Trafikverket är (något förenklat) utvecklat för strategiska analyser av stora infrastrukturprojekt. Därför har det inte haft någon anledning att ha upplösning ända ner på individuella resenärer eller enskilda bilar. Eftersom Rigole (2014) visade att graden av samåkning är avgörande för energianvändning och trängsel så behöver en modell för att analysera SAV hålla reda på inte bara antalet resor utan även när de görs och av vem.

Efter 2014 har forskningen på området tagit fart och det har genomförts ett antal studier som angriper olika delar av problemet att analysera potentialen hos system av självkörande bilar. Bischoff & Maciejewska (2016) gör en liknande analys som Rigole (2014) för Berlin och kommer fram till liknande resultat, dvs att en mycket mindre fordonsflotta kan ge fullgod servicegrad, men också att varje enskild bil kommer att köra mycket. De simulerar resorna, men har i likhet med Rigole (2014) en fix efterfrågan på bilresor. Boesch et al. (2016) når liknande resultat för Zürich. De noterar även det svåra i att modellera efterfrågeförändringar som uppstår.

I det här projektet hade vi tänkt bygga vidare på en forskningsmodell (Regent) utvecklad vid KTH som simulerar enskilda individers val av resmål och färdmedel. Den visade sig vid närmare granskning vara svår att anpassa till den

här nya typen av analys av rent tekniska skäl. Den hade på samma sätt som Sampers utvecklats för en annan typ av analyser, riktade mot långsiktiga markanvändningseffekter av förändringar i transportsystemet. Igen, en modell som inte tidigare behövt ha den upplösningen vi kräver. När vi testade att i efterhand bygga in den upplösningen blev modellsystemet ohanterligt långsamt att använda.

Istället tvingades göra något av en omstart i den tekniska implementeringen av modellerna. Individernas beteende i modellen behölls⁴, men programmets arkitektur förändrades. Den viktigaste förändringen handlar om hur data hanteras. Där tidigare antalet resor per färdmedel och ärende summerades ihop sparas nu ett schema för hela dagens resor för varje resenär (potentiellt miljontals resenärer). Denna extra datahantering gjorde att vi tvingades införa en mer sofistikerad arkitektur som dels kan simulera flera individer parallellt, men också skicka vidare resultaten från en del av modellen för vidare processande samtidigt som simuleringen av nästa individ görs. Ett exempel på sådana processteg är att individuella resor först simuleras i en modell och sedan skickas vidare till en annan där de allokeras till ett fordon (med eller utan samåkning)

Det här är ett intressant datatekniskt problem och den lösning vi har landat i är såvitt vi vet helt ny i transportmodelleringssammanhang och har potential att få genomslag i andra modeller i framtiden.

Utbud

Simuleringen av hur många resor människor vill göra är bara ena halvan av ekvationen. Vi behöver också på något sätt simulera hur trafiksituationen ser ut vid en given efterfrågan. Detta gör vi med hjälp av en kombination av olika så kallade nätutläggningsmodeller (assignment på engelska). De tar en given uppsättning resor och simulerar på olika sätt fram ett ruttval för varje resa. Dessa individuella ruttval summeras sedan på varje väglänk så att det går att beräkna hur lång tid det tar att köra just den sträckan. Detta gör det sedan möjligt att beräkna restider från alla startpunkter till alla destinationer. Oftast matas sedan dessa restider tillbaka till efterfrågemodellen för att se om det förändrar resandet. Efter ett antal iterationer stabiliseras processen till en jämvikt.

Vi har arbetat med ett par modeller för att simulera utbudet: För biltrafiken använder vi oss av Mezzo, en forskningsmodell vid KTH som kan hantera att vi vill kunna förändra bilarnas egenskaper på olika sätt. Vi kan till exempel föreställa oss att självkörande bilar har egenskaper som gör att de kan hantera trafiksignaler effektivare än mänskliga förare. Ruttval och restider i kollektivtrafiken simuleras med EMME (samma modell som Trafikverket använder i Sampers).

En brist med de utbudsmodeller vi har just nu är att de inte hanterar multimodala ruttval, det vill säga att en resenär kan börja sin resa med ett färdmedel för att sedan byta till ett annat innan de når sin slutdestination. Vi tror att det på sikt kommer att behövas modeller som kan hantera det, då ett av de scenarier vi skulle

⁴ Beteendet simuleras baserat på ekonometriska modeller skattade på resvaneundersökningar.

vilja analysera är att se hur SAV kan fungera som matartrafik till mer kapacitetsstark kollektivtrafik. Det är ett mycket intressant forskningsområde som ännu inte är speciellt väl utvecklat (ett exempel är dock Zavitsas et al. 2016), men inget vi försökt göra något åt inom det här projektet. En annan brist är att vi i nuläget har dålig koll på hur interaktion mellan icke autonoma färdstätt och autonoma bilar ska modelleras, speciellt inom innerstaden, där fotgängare och cyklister har en stor inverkan på kapaciteten. Detta är ett av de områden vi rekommenderar för framtida forskning inom systemeffekter av autonoma fordon.

Priser för transporttjänster levererade av självkörande bilar

Efterfrågan på de transporttjänster som levereras av ett system av självkörande bilar beror dels på vilken servicenivå som kan upprätthållas i form av väntetider och åktider, dels på prisnivån. Så vad kan en aTaxi-resa kosta?

Produktionskostnaden är en faktor, men också huruvida tjänsten drivs privat utan subventioner eller i offentlig regi. Priset till konsument kan också bero på konkurrensförhållanden och förekomsten av naturliga monopol.

Vi börjar med att utgå från att tjänsten tillhandahålls av en enda operatör. Operatörens kostnader kan delas in i följande delar:

Fordonskostnader

- Kapitalkostnader
 - Räntekostnader
 - Förslitning
- Driftskostnader
 - Bränslekostnader
 - Trängselavgifter
 - Parkeringskostnader (tillfällig uppställning)
 - Däck och andra förbrukningsvaror
 - Försäkring
 - Service

Systemkostnader

- Uppställning (permanent)
- Allokering, övervakning och säkerhet

De olika kostnadsposterna diskuteras nedan mer i detalj.

Fordonskostnader

Kapitalkostnader

Självkörande taxibilar innebär en möjlighet att utnyttja fordon vars storlek är anpassade efter den faktiska resefterfrågan. Det innebär att en stor andel kan utgöras av mindre fordon, eftersom belägningsgraden – särskilt under rusningstid – är mycket låg. Den förväntade höga graden av utnyttjande innebär också att eldrift blir förhållandevis förmånligt. Det är därför rimligt att basera kalkylen på en mix av mindre och större elfordon, exempelvis 70 procent motsvarande Nissan

Leaf, och 30 procent motsvarande Tesla model 5. Kostnaderna för en fullt autonom version av respektive fordon antas vara nuvarande pris plus 100 000 kr. Det innebär en genomsnittlig fordonskostnad på c:a 700 tkr.

Beräkningarna i Rigole (2014) implicerar en årlig körsträcka på åtminstone 10 000 mil per fordon. Ett försiktigt antagande är att livslängden på ett sådant fordon ligger på tre år. Det ger en förslitningskostnad på c:a 230 tkr per år. Det bundna kapitalet har ett genomsnittligt värde på 340 tkr per fordon, vilket ger en räntekostnad på 14 tkr per fordon och år.

Driftskostnader

Bränsleåtgången för de två fordonstyperna är 15 (Nissan) respektive 17 (Tesla) kWh per 100 km. Med en elkostnad på 1 kr per kWh blir bränslekostnaden 15 respektive 17 kr per 100 km.

Trängselavgifter blir aktuella för många resor. Här räknar vi med en genomsnittlig trängselavgift på 30 kr per dag och resa.

Parkeringskostnader för tillfällig uppställning, dvs när det är optimalt att låta fordonet stå på en allmänt tillgänglig p-plats i stället för att tomköra eller stå på en egen p-plats, kommer troligen att vara låga. Den lägsta parkeringsavgiften är 5 kr per timme och körkostnaden per timme är något mindre vid en hastighet på 30 km per timme, vilket innebär att det lönar sig med tomkörning i praktiskt taget alla områden med parkeringsavgift. Kostnaden approximeras med 0 kr.

När det gäller däck antas kostnaden för en däcksuppsättning vara 6 tkr, och räcka i 4 000 mil. Den årliga kostnaden blir då (med en körsträcka på 10 000 mil per år) 15 tkr.

För övriga förbrukningsvaror antas 0 kr.

Försäkringskostnaderna är svåra att få tag på. En stor operatör har förmodligen goda möjligheter att få ett bra pris. Samtidigt är det mycket oklart hur stora kostnaderna skulle vara för autonoma fordon. Vi antar tills vidare en försäkringskostnad på 60 tkr per år och fordon.

Servicekostnaderna beräknas till 3 kr per mil.

Systemkostnader

För att ett system med automatiserade taxibilar ska fungera krävs också ett system för allokering av fordonen till kunderna, samt hantering av fordonen vid laddning, städning, tvättning och annan service liksom säkerhetsövervakning. Detta kräver en viss bemanning förutom själva systemmjukvaran (som vi inte räknar med här). Det är svårt att avgöra hur stor bemanning som krävs, tills vidare antas en bemanning på c:a 100 personer till en kostnad av 100 mnkr per år.

Fordon som inte används antas uppställda i perifera lägen där kostnaderna är låga. Här räknas med en kostnad för uppställning på 500 kr per månad och fordon.

Ett räkneexempel

Många av de kostnader som ett system av självkörande fordon skulle ha kan vara svåra att kvantifiera, och behöver utredas ytterligare. Det kan dock vara intressant att redovisa ett räkneexempel med utgångspunkt från de scenarier som redovisats i Rigole (xxx). I tabell 1 redovisas totalkostnaderna för utgångsläget (dvs utan självkörande fordon) samt för Rigoles tre scenarier. För scenario 1 redovisas kostnaderna dels för en elbilsflotta, dels för en fossilbaserad flotta. För scenarierna S2 och S3 redovisas endast kostnaderna för en elbilsflotta.

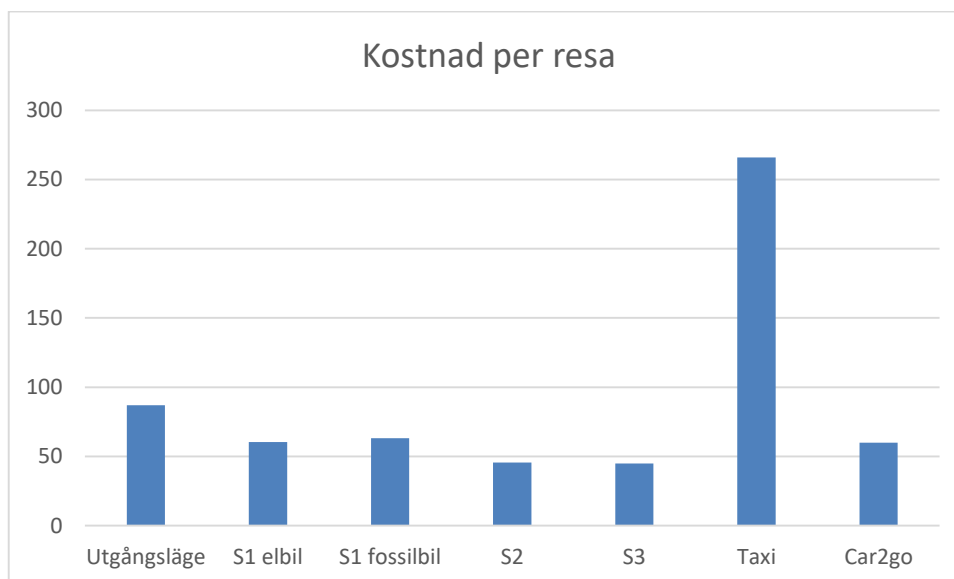
Kostnadsslag	Utgångsläge	S1 elbil	S1 fossilbil	S2	S3
Trafikledning, kr/år	0	100	100	100	100
Uppställning	816	65	65	41	41
Kapitalkostnad, 5% ränta	1020	190	136	119	119
Förslitning	2855	2537	1812	1586	1586
Servicekostnad	190	295	295	212	181
Däck	143	177	177	127	108
Försäkring	816	652	652	408	408
Bränsle	989	184	1227	132	113
Trängselavgifter	1794	1794	1794	1794	1794
Summa	8622	5996	6259	4518	4450

Tabell 1 Totala kostnader för utbud (kapital och drift).

De totala kostnaderna blir mindre med självkörande bilar i alla scenarier. Av tabellen framgår att de största skillnaderna i kostnader ligger i kapitalkostnader, där antalet fordon är mycket mindre med självkörande flotta, samt bränslekostnaderna, där eldriften ger stor effekt. Förslitningskostnaden blir ungefär lika stor, eftersom förslitningen beräknas vara betydligt högre för transporttjänstens fordon. Det ska påpekas att kostnadsskattningen är mycket osäker – de fordon som skulle vara optimala för självkörande flottor finns kanske inte ens än.

För att få fram ett pris för en resa med transporttjänsten kan man dividera kostnaderna med antalet resor (figur 1). Flera saker kan noteras – dels är kostnaden lägre för transporttjänsten än för egen bil, dels är kostnaden betydligt lägre än kostnaden för (dagens) taxi, vilket säger en del om incitamentet för taxibolag att införa självkörande fordon.

Om man beräknar reskostnaden per minut, hamnar man för transporttjänsten intressant nog vid det pris per minut som de två bildelningstjänsterna Car2Go och DriveNow ligger på (4 - 4.5 kr/min). Minutkostnaden för egen bil blir c:a 6 kr/min.



Figur 1 Genomsnittskostnad per resa, kr

Antaganden i andra studier

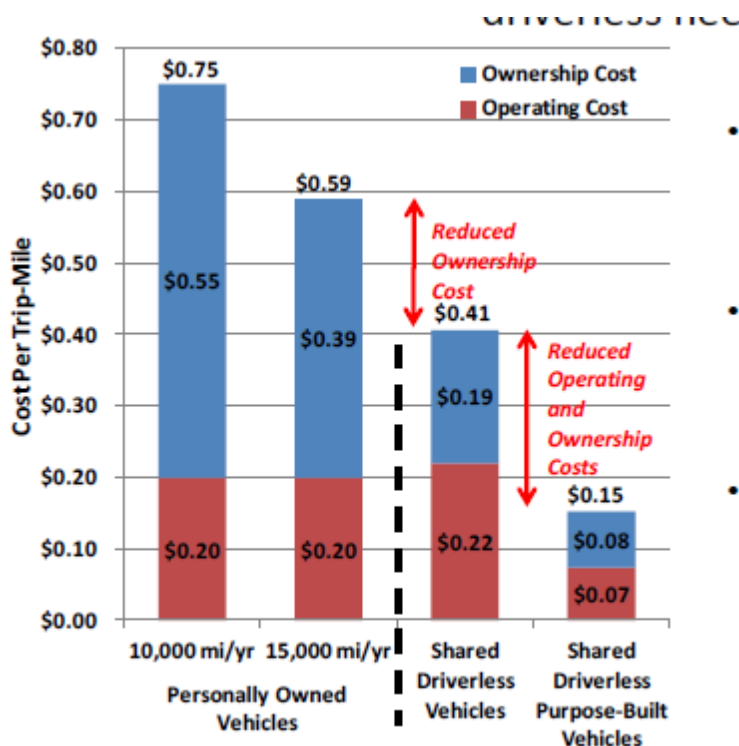
Hörl (2016) gör i ett examensarbete vid Chalmers och ETH I Zurich en studie där efterfrågan beror såväl av LoS-nivå som reskostnad. Studien avser staden Sioux Falls, och har gjorts med hjälp av MATSIM. Han studerar bl.a. olika prisscenarier, och finner att ett AV-system skulle kunna drivas med vinst med god marginal. I denna studie är resorna betydligt kortare än i Stockholmsfallet – 3 km jämfört med 10 km. Km-kostnaden blir ungefär densamma (c:a 5 kr/km).

Segant och Kockelman (2016) studerar införandet av SAV i Austin, Texas och antar en kostnad på en dollar per person och en dollar per km (motsvarande c:a 6 kr per km).

Burns et al (2013) räknar med en kostnadsminskning på 30-40 procent med ett SAV-system jämfört med egenägda fordon, och ännu mer om fordonstypen i SAVsystemet optimeras. Figur 2 visar en kostnadsjämförelse från en case study för Ann Arbor.

Chen och Kockelman (2016) jämför kostnader för ett SAV-system med ett SAEV-system, också med hänsyn till laddningsbehovet (och därmed ökade krav på flottstorlek). De finner att ett SAV-system är konkurrenskraftigt jämfört med privata fordon, och också att ett SAEV-system är konkurrenskraftigt med ett SAV-system under förutsättning att man använder 480-voltsystem. Med svenska drivmedelspriser blir SAEV-systemet överlägset billigast.

Vi kan konstatera att kostnaderna i vårt räkneexempel inte skiljer sig nämnvärt från andra kostnadsuppskattningar, och att dessa innebär att ett SAV-system kan vara mycket konkurrenskraftigt.



Figur 2 Kostnader per km för egenägda bilar respektive transporttjänster med ett SAV-system i Ann Arbor.

Efterfrågan på självkörande resor

I det här avsnittet redovisar vi en efterfrågeberäkning som gjorts med den nyutvecklade modellen. Den simulerar resor för arbetsresor och övriga resor, där varje individ i Mälardalen (befolkning motsv. ca 3,5 miljoner) möjligheten att välja att resa eller inte, vilket färdmedel resan sker med, och till vilken destination resan går. Modellen loopar alltså igenom och simulerar en uppsättning resor för varje individ. Resandet bestäms av såväl egenskaper hos individen som hos området och omgivningen hen bor i. Vi har modellerat två scenarier, ett nuläge och ett där vi bytt ut färdmedlet bil mot ett förenklat system av självkörande bilar.

Några antaganden gjordes i beräkningarna

- Inga förändringar sker i restid på vägarna mellan de två scenarierna.
- Passagerare med bil har samma upplevda uppoffring för restid och väntetid som i kollektivtrafiken i SAV-scenariot
- Inget körkort eller bil i hushållet krävs för att bilalternativet ska vara tillgängligt i SAV-scenariot

De enda skillnader vi har mellan de två scenarierna i beräkningen är alltså att restid och väntetid värderas annorlunda och att fler får tillgång till bilalternativet. Beräkningarna en betydande överflyttning till bil från andra färdmedel. I de här beräkningarna har vi alltså inte tagit hänsyn till att priset också kan komma att

vara betydligt lägre (se avsnittet om kostnader ovan), vilket skulle förstärka överflyttningen ännu mer. Å andra sidan så verkar det första antagandet i andra riktningen. Det finns antydningar om att flottor av självkörande bilar kan öka kapaciteten i systemet, men utan detaljerade simuleringar av just det här nätverket går det inte att uttala sig om hur mycket av den här ökade efterfrågan det skulle gå att betjäna utan att restiderna ökar markant.

För arbetsresorna kan vi också se att reslängden går upp för både bil- och kollektivresor, vilket antyder att det är de kortare kollektivresorna som ersätts med bilresor, medan kollektivtrafiken fortfarande är konkurrenskraftig för något längre resor. För övriga resandet är destinationsvalet något mer utspritt vilket gör att det är mer svårt att dra några slutsatser från översiktliga resultat som de här.

Sammanfattningsvis är resultaten något av ett skräckscenario från ett trafikperspektiv, då antalet bilresor nästan fördubblas. Samtidigt är det en stark indikation på hur stor genomslagskraft sådana här system kan ha. Det är viktigt att poängtera att vi inte försöker säga att självkörande bilar med nödvändighet kommer att dubbla bilresandet. Många andra förutsättningar spelar också in, inte minst vilka prissättningsstrategier staden kommer att ha, både när det gäller bilar (trängselskatter) och kollektivtrafiken. Ännu så länge har vi inte alla delar på plats i modellsystemet för att göra den typen av heltäckande analyser.

Scenario: Nuläge
ARBETSRESOR (NULÄGE)

FÄRDMEDEL	Antal resor	Andel	Medelavstånd	Medelrestid
BIL	350267	55	13.0	16.5
BILPASSAGERARE	31664	5	11.2	14.8
KOLLEKTIVTRAFIK	155638	24	15.1	28.7
CYKEL	74530	12	5.1	19.9
GÅNG	27116	4	2.0	16.7
SUMMA	639215			

ÖVRIGA RESOR (NULÄGE)

FÄRDMEDEL	Antal resor	Andel	Medelavstånd	Medelrestid
BIL	566226	37	14.5	17.8
BILPASSAGERARE	225517	15	17.5	20.8
KOLLEKTIVTRAFIK	296200	20	16.9	30.0
CYKEL	193283	13	6.5	25.6
GÅNG	239423	16	2.6	22.0
SUMMA	1520649			

Scenario: Självkörande bilar
ARBETSRESOR (SJÄLVKÖRANDE)

FÄRDMEDEL	Antal resor	Andel	Medelavstånd	Medelrestid
BIL*	609064	92	14.1	18.0
BILPASSAGERARE	6866	1	8.8	11.7
KOLLEKTIVTRAFIK	27062	4	15.4	29.3
CYKEL	11664	2	5.2	20.3
GÅNG	4428	1	2.0	16.6
SUMMA	659084			

ÖVRIGA RESOR (SJÄLVKÖRANDE)

FÄRDMEDEL	Antal resor	Andel	Medelavstånd	Medelrestid
BIL*	1227693	80	12.8	16.0
BILPASSAGERARE	66063	4	13.1	16.4
KOLLEKTIVTRAFIK	95123	6	16.2	28.5
CYKEL	59601	4	6.2	24.2
GÅNG	82812	5	2.6	21.7
SUMMA	1531292			

*Självkörande

Diskussion

De räkneexempel vi redovisar i den här rapporten visar på två viktiga slutsatser. Den ena är att kostnaderna för att resa med SAV kan komma att bli betydligt lägre än för privatägda personbilar. Det andra är att det finns en latent efterfrågan på dessa tjänster, vilket potentiellt skulle kunna leda till ett ökat resande med bil. Vi kan inte i dagsläget säga hur stor den effekten skulle bli. Det är värt att ha i åtanke att även om SAV kan vara ett sätt att ställa om till en eldriven fordonsflotta så kan den också medföra ett ökat resande. Nettoeffekten på energianvändningen kommer antagligen att bero på andra kompletterande åtgärder som till exempel trängelskatter och kollektivtrafiksubventioner.

En annan slutsats som kan dras är att det är mycket svårt att förutse hur införandet av den här typen av teknologi kan komma att gå till. I litteraturen finns en mängd olika uppskattningar av hur lång tid det kan för autonoma fordon att få ett allmänt genomslag. En anledning är att det kanske inte primärt är tekniska problem som är det största hindret utan politiska och juridiska. Det är också svårt att se vilka aktörer som blir de som satsar på tekniken. Innan de juridiska hindren är undanröjda är det ingen som kan rulla ut autonoma fordon i större skala, vilket gör att det uteslutande handlar om testverksamhet ännu.

En tredje slutsats som kom fram under ett seminarium i Trafiknät Stockholm är att en tolkning av Rigole (2014) är att det inte är i första hand autonomin som ger den stora förändringen i antal fordon. Det är snarare kombinationen av flottor och transport-som-tjänst (i kontrast till dagens privata ägande av bilar) som gör att det går att täcka resandet med 5-10% av dagens antal fordon. Detta är något vi behöver ta hänsyn till i våra modellanalyser, så att vi verkligen representerar övergången till transporter-som-tjänst på ett bra sätt.

Referenser, källor

Bischoff, J., M. Maciejewskia (2016) Autonomous taxicabs in Berlin – a spatiotemporal analysis of service performance. *Transportation Research Procedia* 00 (2016)

Boesch, P.M., Ciari, F. Axhausen, K. W. Required Autonomous Vehicle Fleet Sizes to Serve Different Levels of Demand. Paper presented at TRB 2016 Annual Meeting.

Burns, L D.; Jordan, W C.; Scarborough, B A. (2013): Transforming personal mobility. In *The Earth Institute* 431, p. 432.

Chen T.D., Kockelman, K.M., Hanna, J.P., (2016) Operations of a Shared, Autonomous Electrical Vehicle Fleet: Implications of vehicle and charging infrastructure decisions. TRB annual meeting 2016, Washington

CityMobil (2012) Deliverable 5.4.1 Assessment of Automated Road Transport Systems contribution to Urban Sustainability. http://www.citymobil-project.eu/site/en/documenten_deliverables.php

Hörl, S. (2016) Implementation of an autonomous taxi service in a multi-modal traffic simulation using MATSim. Master thesis in Complex Adaptive Systems, Chalmers & och ETH (Zurich)

KPMG / CAR (2012) Self-driving cars – The next revolution. <https://www.kpmg.com/US/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/self-driving-cars-next-revolution.pdf>

OECD/IEA (2016) “Global EV Outlook. Beyond One Million Electric Cars.” Paris: International Energy Agency, 2016.

Rigole (2014) Study of a Shared Autonomous Vehicles Based Mobility Solution in Stockholm, Master Thesis, KTH.

Segant, M. och Kockelman, K. (2016) Design and implementation of a shared autonomous vehicle system in Austin, Texas, under review

Seign & Bogenberger (2015) Model-Based Design of Free-Floating Carsharing Systems. Paper presented at TRB 2015 Annual Meeting.

Weikl & Bogenberger (2015) An Integrated Relocation Model for Free-Floating Carsharing Systems: Field Trial Results. Paper presented at TRB 2015 Annual Meeting.

Wielinski, Trépanier & Morency (2015) What about free-floating carsharing? A look at the Montreal case. Paper presented at TRB 2015 Annual Meeting.

Bilagor

Bilaga 1 Erfarenheter från CityMobil2 [ej spridning]

Bilaga 2 Intervjuer med olika svenska aktörer [ej spridning]

Bilaga 3 “Impacts of shared autonomous taxis in the Stockholm Metropolitan area”, vetenskaplig artikel inskickad till Journal of Intelligent Transport Systems

Bilaga 4 – Administrativ bilaga [ej spridning]