



Autonome shuttles langs letbanen - potentialeanalyse og optimeringsperspektiver

Jeppé Rich

februar 2021

Autonome shuttles langs letbanen - potentiale analyse og optimeringsperspektiver

Rapport
2021

Af
Jeppe Rich

Copyright: Hel eller delvis gengivelse af denne publikation er tilladt med kildeangivelse

Forsidefoto: [Tekst]

Udgivet af: DTU, Institut for Systemer, Produktion og Ledelse, Bygningstorvet, Bygning
116b, 2800 Kgs. Lyngby
www.man.dtu.dk

UIA leverance: 6.1.4

ISSN: [0000-0000] (elektronisk udgave)

ISBN: [000-00-0000-000-0] (elektronisk udgave)

ISSN: [0000-0000] (trykt udgave)

ISBN: [000-00-0000-000-0] (trykt udgave)

LINC-projektet er medfinansieret af European Region Development Fund gennem Urban Innovative Actions Initiative



Indhold

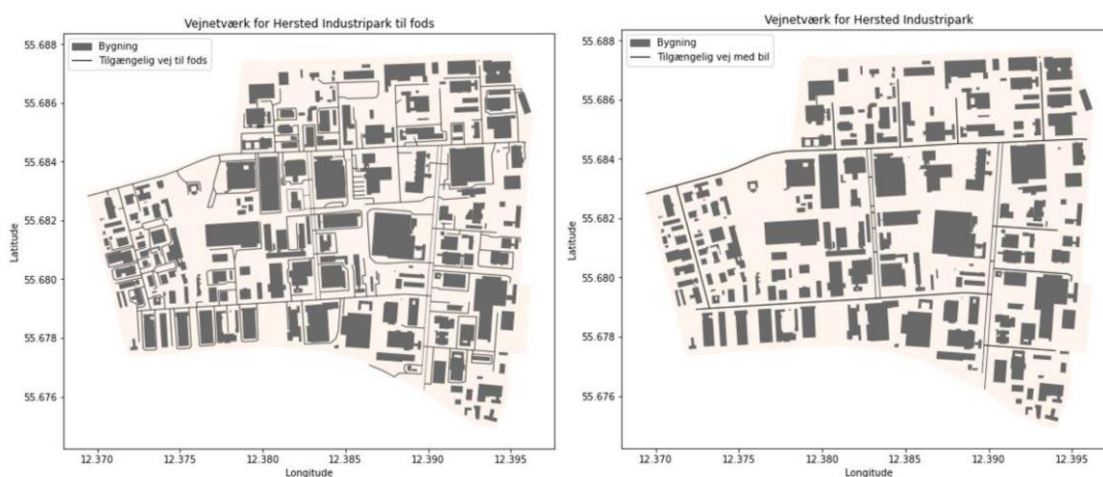
1.	Formål	5
2.	Resume	6
3.	Executive summary	6
4.	Kort beskrivelse af LINC projektet.....	7
5.	Introduktion til analysen for Hersted Industripark.....	8
6.	Vurdering af potentiale	10
7.	Samlet vurdering af potentiale	13
8.	Perspektivering.....	14
	Reference	16

1. Formål

Et af LINC-projektets primære formål er at undersøge det langsigtede potentiale for autonome busser i et blandet trafikmiljø. Busserne i LINC-projektet sigter primært på at dække til- og frabringer trafik fra letbanen og er primært konkurrencedygtige på kortere afstande qua deres begrænsede størrelse og hastighed. Potentialeanalysen sigter dermed på at undersøge potentialet for first/last mile trafik mellem letbanen og de omkringliggende boliger og arbejdspladser.

LINC-projektet er én af de største tests af selvkørende shuttles i Danmark, hvor visionen er, at de bliver en del af den service, borgerne kan benytte, når de ankommer til én af de 29 stationer ved Hovedstadens Letbane, der i øjeblikket bygges langs Ring 3.

Potentialeanalysen er baseret på en case for Hersted Industripark samt en case for DTU Campus. Begge disse områder er én af 29 letbanestationer i fremtiden. Det forventes at resultaterne for især Hersted Industripark kan benyttes som en reference for andre letbanestationer, der ønskes serviceret af de selvkørende busser i fremtiden.



Figur 1: Vejnetværk for Hersted Industripark (Jomeh og Clausen, 2021).

Potentialeanalysen baserer sig på simulationsøvelser og søger at drage nogle generelle slutninger. Formålet med denne rapport er at summere resultater af de forskellige forsknings- og studieaktiviteter på DTU. Herunder;

- Give et bud på det langsigtede potentiale for disse busser med udgangspunkt i simulationseksperimenter for Hersted Industripark
- Vurdering af samfundsøkonomiske beregninger for Hersted Industripark
- Diskussion af hvorledes optimering kan anvendes i planlægningen af busdriften mere generelt
- Diskussion af mulige begrænsninger og udfordringer, herunder batterikapacitet, data, modellering af efterspørgsel mv.

2. Resume

LINC-projektet er et af de største projekter vedrørende selvkørende shuttles i Danmark. Gennem test af disse med passagerer samler projektet brugeroplevelser og driftserfaring for at innovere busdrift. Dette skal hjælpe med at løse udfordring med til- og frabringer transport inden for den offentlige transport og dermed forberede fremtidige byplanlæggere til en selvkørende fremtid.

I projektet undersøges potentialet for selvkørende shuttles i Hersted Industrial Park. Analysen er baseret på en mikroskopisk simuleringssmodel, der giver mulighed for at inkludere fleksible passagerankomster, variationer i den samlede efterspørgsel, fleksible placering af busstoppesteder, omkostningerne ved kørsel af busser og optimale busruter. Alt dette giver mulighed for at undersøge omkostningsfordelingen ved en given tidsplan sammenlignet med en basissituation og for at vurdere forskellige rutedesigns for forskellige scenarier.

Samlet set konstateres det, at der kan være et langsigtet potentiale for selvkørende shuttles, hvis de langsigtede antagelser i forhold til driftsomkostninger og rejsehastighed er korrekte.

Baseret på det specifikke case studie forventes det, at de selvkørende shuttles for mange stationer for letbanen (Hersted Industrial Park er ganske typisk og dermed en god reference) sandsynligvis er et godt alternativ til de konventionelle busser. Dette skyldes, at disse er mindre og forventes at have en bedre driftsøkonomi på grund af besparelser i buschaufførens løn.

Navnlig viser analysen fra Hersted Industrial Park, at fordi de selvkørende shuttle er mindre, passer de bedre med letbane-passagertal end konventionelle busser. Dette kan ses af den gennemsnitlige belægningsgrad for de selvkørende shuttles.

Analysen indikerer endvidere, at der er en meget stor forskel i, hvordan busserne drives. Især at det er vigtigt at sikre; i) synkronisering med letbanens ankomst- og afgangsfrekvenser ii) et passende antal busser, der balancerer driftsomkostningerne pr. passager og service iii) placering af stop, der minimerer unødvendige omveje, og iv) passende design af ruter.

3. Executive summary

The LINC project is one of the largest projects with automated shuttles in Denmark. Through testing of self-driving shuttles with real passengers, the project is gathering user experiences and operational experience in order to innovate bus services to help solve the first / last mile challenge in public transport and prepare future city planners for self-driving shuttles.

In the project, the potential for autonomous bus services for Hersted Industrial Park, is investigated. The analysis is based on a micro-scopic simulation model that allow us to include flexible passenger arrivals, variations in the total demand, flexible placement of bus stops, the cost of operating busses and optimal bus routes. All of this allow us to examine the cost-benefit of a given schedule compared to a baseline without busses and assess the performance of different route designs and for different scenarios.

Overall, it is found that there may be a long-term potential for autonomous shuttle if the long-term assumptions in relation to operating costs and travel speed are correct.

Based on the specific case study, it is expected that the autonomous shuttle, for many station catchments areas for the light rail (Hersted Industrial Park is quite typical and thus a good reference), is likely a good alternative to the conventional buses. This is because these are smaller and are expected to have a better operating economy due to the savings of the salary of the bus driver.

In particular, the analysis from Hersted Industrial Park shows that because the autonomous shuttle are smaller, they fit better with the light rail passenger base than conventional buses. This can be seen from the average occupancy rate of the autonomous shuttle.

The analysis further indicates that there is a very big difference in how the buses are operated. In particular, that it is essential to ensure; (i) synchronization with the arrival and departure frequencies of the light rail; (ii) an appropriate number of buses balancing operating costs per passenger and service; iii) location of stops that minimise unnecessary detours, and iv) appropriate design of routes.

It is specifically shown that planning and optimisation of the system can improve the system performance significantly. The far most important consideration is the synchronisation between the bus-service and the light rail. While the analysis do not consider on-demand services, we do not anticipated that on-demand services will be efficient for the specific route design in Hersted Industrial Park on a large scale. This is due to the circular route design and the fact that on-demand services will require additional bus capacity. For other areas with a different catchment area, e.g. a center formation it could be different. It is possible however, that parallel on-demand systems aimed at specific vulnerable groups by time could evolve, although this is not analysed in this study.

4. Kort beskrivelse af LINC projektet

Projektet LINC er ét af de største projekter med selvkørende shuttles i Danmark, der samler aktører på tværs af kommuner, virksomheder og vidensinstitutioner for at teste selvkørende shuttles i et naturligt miljø. Projektet er støttet af UIA og projektledelsen varetages af Gate 21. Hovedformålet for projektet har været innovativt at videreudvikle det kollektive busprodukt. Gennem test af selvkørende shuttles med passagerer har projektet haft en ambition om at

indsamle drifts- og brugererfaringer samt udvikle intelligente og dynamiske busservices, som kan bidrage til at løse first/last mile udfordringen i den kollektive transport og forberede fremtidens byplanlæggere til selvkørende shuttles.

5. Introduktion til analysen for Hersted Industripark

5.1 Kort beskrivelse af analysen

I dette projekt, der analyser potentialet for Hersted Industripark, er der taget udgangspunkt i at simulere udvalgte fremtidige scenarier for implementeringen af selvkørende shuttles i Industriparken. Modellen er opbygget som en simulationsmodel, som gør det muligt at vurdere bussernes 'performance' over en tidsperiode. Simulationen har den fordel, at det er muligt at analysere omløbsplaner, se på forskellige efterspørgselsscenarier, monitorere forskellige performanceindikatorer i løbet af simulationen (ventetid, rejsetid, afstand, osv.), samt analyserer hvorledes optimering af ruter og placeringen af stationer påvirker resultaterne.

Mere specifikt inkluderes der data, der relaterer sig til;

- Passagerfordelinger for ankomster og afgang
- Efterspørgselsniveauer for arbejdspladser
- Busstoppesteder herunder placering og antal
- Optimale busruter
- Omkostninger ved at driften de enkelte busser
- Data der knytter sig til den samfundsøkonomiske beregning

Antallet af ankomne og afrejsende passagerer samt fordelingen af disse over døgnet er baseret på kørsler med den Københavnske trafikmodel OTM. Trafiktallene for det forventede antal forventede rejsende til og fra letbanestationen på Hersted industripark er baseret på to basisprognoser for henholdsvis 2025 og 2032. Passagerfordelingerne er herefter dannet ud fra det førnævnte passagergrundlag samt data fra Transportvaneundersøgelsen (TU). Specifikt er TU anvendt til at lave en mere detaljeret døgnfordeling. Ved at afgrænse TU-data til at indeholde rejsende der benytter offentlig transport som deres primære transportmiddel i alle nærliggende kommuner til Hersted Industripark, har det været muligt at definere passende passagerfordelinger over døgnets 24 timer. Selvom der er en del usikkerheder i disse data, er beregningen et resultat af en samlet trafikmodel og indeholder dermed overordnet substitution mod kollektiv trafik. Det er dog generelt usikkert og vanskeligt at estimere last-mile trafik fordi det involverer 'lette' transportmidler som er vanskelige modellerer. Kilder til usikkerhed knytter sig blandt andet til stigende andele af elcykler og andre cykler, andre transportmidler som løbehjul, usikkerhed omkring medbringelse af sådanne transportmidler i letbanen (og kapaciteten), ændringer i hvordan området bebygges, og generelle ændringer i teknologi og præferencer. Af samme årsag er der i beregningerne anvendt alternative prognoser for at teste følsomheden.

Busstoppestedernes placering er bestemt ud fra bygningernes placering i Hersted Industripark. For at få en oversigt over bygningernes placering i Hersted Industripark er der benyttet OpenStreetMap (OSM). Dette har gjort det muligt at inkludere det eksisterende vejnet samt bygningernes koordinatpunkter. Forskellige optimeringsmetoder er dernæst anvendt til at

bestemme busstoppestedernes placering. Selve antallet af stoppesteder er udledt ved brugen af elbow-metoden, hvor k-means simuleres med forskellige k-værdier (antal stoppesteder). Placeringen af stoppestederne er baseret på 'skønnede' passagertal til og fra de enkelte bygninger. Selvom der er benyttet en vægtning i forhold til bygningernes størrelse er dette estimat usikkert. Det er forventeligt, at en større heterogenitet med hensyn til passagertallene vil give en lidt dårlige løsning.

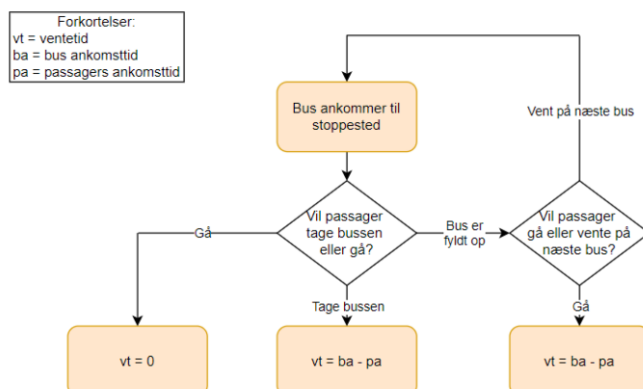
For at udarbejde optimale rute udarbejdes en distancematrix, der indeholder den indbyrdes afstand mellem alle stoppestederne og letbanestationen. Den optimale rute er derefter bestemt ud fra et 'Traveling Sales man Problem' (TSP), da dette problem sigter på at bestemme den korteste rute i en samling af stoppesteder, hvor alle stoppesteder skal besøges nøjagtigt én gang, og hvor ruten starter og slutter det samme sted, som i dette tilfælde er letbanestationen.

Oplysninger vedrørende drift af selvkørende shuttles er baseret på et litteraturstudie fra Schweitz hvor de samlede omkostninger er omregnet til en generel kilometeromkostning. Dog er tallene justeret til den konkrete situation for at tage højde for kørselsomfang. I analysen antages et SAE 3 niveau for 2025 scenariet og et SAE 4 niveau for 2032. Hastighederne for de to scenarier afspejler denne teknologiudvikling. I 2025 er gennemsnitshastigheden 14.5 km/t og er i 2032 21.25 km/t.

I forhold til evaluering af den samfundsøkonomiske performance er der anvendt inputs fra den samfundsøkonomiske manual.

5.2 Kort beskrivelse af simulationsmodellen

På baggrund af ovenstående er der opstillet en mikro-simulationsmodel. Modellen inddrager samtlige inputs, herunder passagerfordelinger, distancematricer, stoppesteder, ruter, samt andre parameterinputs såsom buskapacitet, kørehastighed, ganghastighed og tiden for påstigning samt tiden for at åbne og lukke busdøre.



Figur 2: Flow-diagram for passagerernes valg gennem simulationen (Jomeh og Clausen, 2021).

Modellen er opbygget som en diskret, eventdrevet simulation. Fordelen ved en eventdrevet simulation er, at perioder med inaktivitet kan springes over ved at gå fra event til event. Der mistes derfor ikke noget relevant information undervejs i simuleringen, da alle relevante tilstandsændringer alligevel sker ved forekomsten af et event.

5.3 Cost-benefit analysen

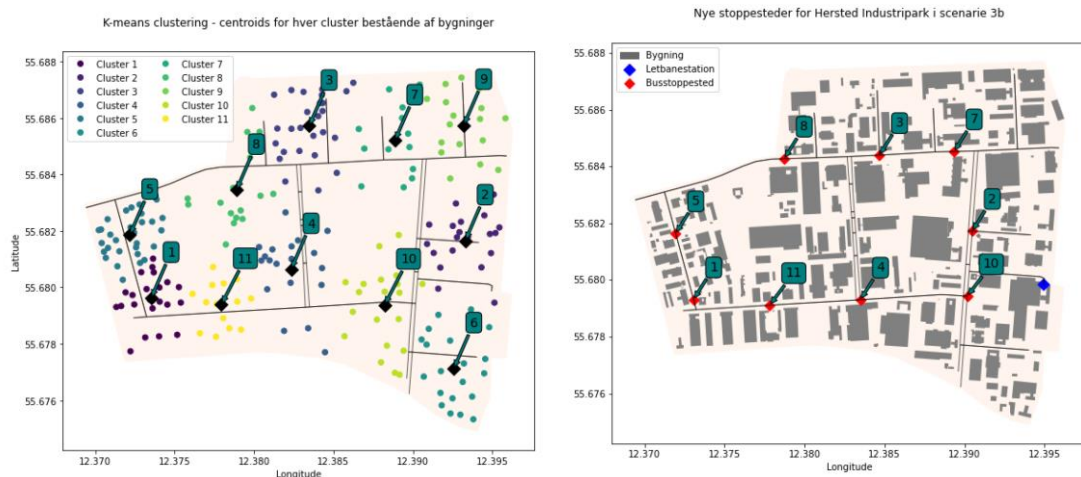
I scenarieanalysen indgår også en cost-benefit analyse (CBA), der sigter på at vurdere bussernes potentiale ud fra et samfundsøkonomisk perspektiv. Analysen dykker ned i detaljerne ved de forskellige gevinster og omkostninger for LINC-projektet og kan informere beslutningstagerne om det overordnede samfundsøkonomiske potentiale. I denne analyse indgår at sparet rejsetid og øget ventetid udtrykkes i en monetær besparelse, som holdes oppe mod blandt andet driftsomkostninger.

6. Vurdering af potentiale

6.1 Effekten ved at anvende optimeringsværktøjer

Et væsentligt formål med potentieanalysen samt andre analyser foretaget på DTU har været at analysere, hvorvidt moderne optimeringsværktøjer kan bidrage til at forbedre operationen og planlægningen af de autonome busser. Eftersom man ikke er underlagt restriktioner i forhold til mandsskabsplanlægning for de enkelte chauffører er der større frihedsgrader i forhold til optimeringen. Omvendt eftersom driften er elektrisk er der begrænsninger i forhold til opladning. Følgende konklusioner er draget på baggrund af de forskellige projekter;

- Planlægningen af placeringen af de enkelte stoppesteder er en relativ vigtig beslutning. Beslutningen indeholder modsatrettede hensyn. Hvis stationerne ønskes placeret meget tæt på specifikke bygninger i et detaljeret vejnet, vil passagerer, der skal til og fra de specifikke bygninger, få en hurtig og behagelig rejse, men det vil samtidigt betyde, at andre passager vil komme på en unødigt omvej. Omvendt, hvis stationerne placeret på hovedstrækninger vil det forde en større gangtur for de enkelte rejsende, men hurtigere omløb generelt. Konklusionen i forhold til stoppestedernes placering er, at de bedste løsninger er de løsninger, der ligger på det primære net og dermed har hurtigere omløb. Denne beslutning er relativt vigtig og har stor betydning for samfundsøkonomien. Nedenfor illustreres dette i to forskellige udformninger af stoppesteder. Til venstre en udformning, der sigter på at stoppestedet er tæt på slut-destinationen, og til højre en udformning som i højere grad ligger på hovednettet. Set fra et systemperspektiv er designet til højre langt bedre. Hele spørgsmålet omkring hvor tæt busser skal køre på endestationen er en delikat balance som illustreret her. Det har blandt andet konsekvenser for efterspørgslen. Formentligt vil en række personer vælge at gå, hvis deres tur bliver for dårligt matchet. Dette er delvist håndteret i modellen, eftersom der er et valg mellem at gå og køre. På den anden side er der ikke anvendt en probabilistisk valgmodel for denne proces, hvilket kan give anledning til nogle lidt ekstreme løsninger.



Figur 3: Forskellige placeringer af stoppesteder (Jomeh og Clausen, 2021).

- Når/hvis stationerne er defineret er rutevalget oftest ganske simpel beslutning. Det skyldes at nettene er små og derfor ikke giver anledning til mange forskellige rutealternativer.
- I forhold til omløbstiden for shuttlen viste det sig, at synkroniseringen med letbanen er en meget vigtig parameter. Det er derfor i planlægningen af busserne hensigtsmæssigt at definere antal shuttles og omløb således, at de passer med ankomstfrekvensen på letbanen.
- Antallet af shuttles er også en vigtig parameter (jf. ovenstående). Analysen fra Hersted Industripark pegede på, at det var hensigtsmæssigt at etablere en 'gennemsnitsbelægning'. Med andre ord, det var ikke effektivt med få busser og dermed en relativ dårlig betjening, ligesom det ikke var effektivt med en meget intensiv betjening, eftersom de stigende omkostningerne til driften ikke gav sig udslag i en tilsvarende stigning i kvaliteten af betjeningen.
- Batterier skal oplades, og derfor har det været analyseret hvorvidt batterikapaciteter er en begrænsende faktor. Dette skønnes ikke at være tilfældet. For det første fordi at man i forbindelse med driften kan tage enkeltbusser ud af drift for kortere opladning uden at det nævneværdigt reducerer effektiviteten af systemet (Pei Cao, 2020). For det andet fordi systemet typisk opererer i kortvarende 'peak-perioder' efterfulgt af 'off-peak' perioder. De selvkørende shuttles kan derfor tages ud af drift temporært i 'off-peak' perioder uden at det har nævneværdig betydning for driften. For det tredje forventes der en betydelig udvikling i batterikapacitet som muliggør relativt lange driftsperioder uden opladning.
- Et andet aspekt er, hvorvidt man gennem optimering og modellering kan fremskrive efterspørgsel over dagen (og på enkelte dage) for herved at tilpasse udbuddet dynamisk til efterspørgsel. Herunder også overvejelsen hvorvidt 'on-demand' services for enkelte brugere er effektivt. Dynamisk tilpasning af efterspørgslen kan give mening for 'campus-lignende' netværk som på DTU, hvor der er et meget varierende rejsemønster over dagen og mellem de forskellige bygninger. Det er blandt andet demonstreret i Peled et al, 2020, hvor man anvender tidsrækkeanalyse til at estimere efterspørgslen baseret på WIFI-skanning. Der er for DTU-systemet i 2020-2021 udviklet

et informationssystem (Servizi et al., 2021a; Servizi et al., 2021b) og en tilhørende app, som udover at indeholde et detaljeret 'flowmap', der opdateres i realtime, også opsamler rejsemønstre via beacons. Dette informationssystem vil kunne anvendes til at 'lære' systemets efterspørgsel over tid og dermed give anledning til tilpasninger af systemet. Systemet testes i foråret 2021 hvor de selvkørende shuttles kører på campus og hvor der samtidigt indsamles data fra systemet og via spørgeskemaundersøgelser for herved at forstå rejsemønstre og rejsepræferencer med hensyn til autonome busser. Sådanne tilpasninger ville i princippet også kunne gennemføres for Hersted Industripark, hvis stoppestederne understøttes af denne teknologi.

Efterspørgselstilpasning vurderes dog primært at være relevant for lufthavne og for campusser (virksomheder/lærestudier) hvor der ikke er et fast afgangsmønster. For et system som letbanen, hvor det primære formål er at servicere passagerer til- og fra stationen, og hvor letbanen kommer med en fast frekvens, er dette mindre oplagt. Problemet er, at dette fordrer en ændring af driften som dermed betyder, at omløbet af busserne ikke er synkroniseret med letbanen. Så selvom sådanne services kan være optimalt for enkelte brugere, er det ikke en god løsning set fra systemet som helhed. Dette er helt parallelt med førnævnte observation som knyttede sig til rutesystemet, hvor meget detaljerede ruter, på trods af at være effektive for enkelte brugere, faktisk ikke er effektive set fra systemets perspektiv. Dernæst er det meget nemmere at forholde sig til 'faste omløb' for den enkelte bruger frem for diffuse 'on-demand' services. Dette gælder i særdeleshed når afstandene er så relativt små, som de er.

Generelt er konklusionen, at man gennem nøje afstemt planlægning og optimering kan forbedre driftspotentialet betydeligt. Specielt er det vigtigt, at til- og frabringer systemer synkroniseres med frekvenserne på letbanen, da det giver optimale omløb.

Generelt skal man tænke tilkoblingen ud fra et systemperspektiv for at opretholde synkroniseringen. Systemet er som udgangspunkt ikke skabt til on-demand service i stort omfang. Dog kan man godt forestille sig parallelle systemer, der sigter på specielle målgrupper, såsom ældre og gangbesværede. Dette vil dog i så fald være et parallelt system, der fungerer som en slags taxiservice. Effekten af et sådant system er ikke analyseret. For at kunne analysere sådanne sekundære services er der behov for en nærmere behovsanalyse for disse grupper af rejsende, herunder, ældre, gangbesværede, skolebørn, mv. Dels er der behov for at kende de forventede mængder, og dels er der behov for at have indsigt i deres rejsemønstre over dagen.

6.2 Langsigtede potentiale

I den nærværende analyse af Hersted Industripark er ingen af de analyserede løsninger som udgangspunkt samfundsøkonomisk rentable. Dette skyldes primært, at der indregnes tabte sundhedseffekter ved ikke at gå. Ses der bort fra disse effekter, er der i de mest optimale tilfælde en samfundsøkonomisk gevinst.

Det er vanskeligt at vurdere det langsigtede potentiale ud fra den præsenterede analyse. Den primære udfordring knytter sig til hvordan basissituationen defineres og regnes. I virkeligheden vil der være en vis busdrift i områderne, og det er denne basis som den autonome drift skal holdes op i mod. Da det er velkendt, at busser oftest subsidere i yderområderne og forstæder,

er det forventeligt, at Movia i områderne omkring letbanen opererer med et samfundsøkonomisk tab. Spørgsmålet er derfor snarere om de selvkørende shuttles er et bedre alternativ (har mindre tab) end de konventionelle busser. Det har ikke været muligt at analysere dette, da det dels fordrer kodning af fremtidige køreplaner (som vi ikke kender) samt driftsøkonomi for Movias busdrift.

Baseret på simulationsresultaterne er vurderingen imidlertid at;

- Selvkørende shuttles, under forudsætning af at de optimeres og synkroniseret med letbanen, samt har forudsætninger som forudsat i 2035-scenariet angående hastighed (SAE 4 niveau), er et bedre alternativ end traditionelle busser, fordi de qua deres mindre størrelse og bedre drift (som blandt andet skyldes besparelse på chaufførløn) er mere fleksible og bedre kan tilpasses letbanens drift.
- Størrelsen af de selvkørende shuttles passer også bedre end traditionelle busser som det ses af udnyttelsesgraden i analysen. Når busserne bliver mindre vægter chaufførlønnen mere, og derfor skønnes det, at traditionelle busser er et dårligere alternativ. Meget ofte vil udnyttelsesgraden af traditionelle busser for sådanne korte rejser forventeligt ligge meget lavt.
- Potentiale vurderingen er langsigtet. Det er i særdeleshed usikkert hvornår det bliver muligt at køre med maksimale hastigheder omkring 40-50 km/t for helt autonome busser inden for tæt bebyggede områder. Hvis hastighederne er lavere, påvirker det effektiviteten af omløbet markant.
- I analysen er efterspørgslen antaget at være fast. Da first/last mile problematikken typisk udgør en mindre del af rejsen, er dette en rimelig antagelse, som ikke forventes at påvirke analysen synderligt. Dog vil det være således, at en god service på det sidste stykke af rejse kan have konsekvenser for det overordnede transportmiddelvalg.
- I analysen er der udelukkende regnet på et gangalternativ til busdriften. Dette er en betydelig simplificering som kan have noget effekt. Hvis folk medtager cykler og løbehjul i letbanen og anvender disse på det sidste stykke af rejsen, vil det påvirke efterspørgslen på busdriften. Det kan have betydning for dimensioneringen af busdriften for de enkelte stationer og kan påvirke samfundsøkonomien. Typisk er det således at en højere efterspørgsel vil give et større potentiale for busserne.

7. Samlet vurdering af potentiale

Samlet set vurderes det, at der kan være et langsigtet potentiale for den selvkørende shuttledrift hvis de langsigtede forudsætninger i forhold til driftsomkostninger og rejsehastighed er korrekte.

I det tilfælde vurderes det at de selvkørende shuttles for mange stationsoplande for letbanen (Hersted Industripark er ganske typisk og dermed en god reference) er et godt alternativ til de konventionelle busser. Det skyldes at disse er mindre og forventes at have en bedre driftsøkonomi, fordi man ikke skal afholde chaufførløn.

I særdeleshed viser analysen fra Hersted Industripark, at fordi de selvkørende shuttles er mindre, passer de bedre med letbanens passagergrundlag end konventionelle busser. Dette kan aflæses på belægningsgraden af de selvkørende shuttles.

Analysen peger på at der er meget stor forskel på hvordan busserne driftes. I særdeleshed er det væsentligt at sikre; i) synkronisering med letbanens ankomst- og afgangsfrekvenser, ii) et passende antal busser som balancerer hensynet til driftsomkostninger per passager og service, iii) placering af stoppesteder som sikrer effektive omløb, samt iv) passende design af ruter.

8. Perspektivering

First/last mile transportmidler har sjældent stor betydning for den samlede inducerede trafik fordi deres bidrag til den samlede rejselængde i sagens natur er lille. Desuden er der i dette tilfælde mulighed for at gå til den endelige destination, hvilket for ganske mange af de stationsnære destinationer faktisk er et godt alternativ. Omvendt er det således, at en forbedring af first/last mile transporten vil have en vis mindre betydning for de samlede transportmængder.

En analyse af den inducerede trafik vil kunne gennemføres med fulde OTM beregninger, hvor rejsetiden mellem stationen og slutdestinationerne tilpasses den autonome transportservice. Det vurderes dog ikke, at overflytningspotentialer har væsentligt betydning for CBA analysen, da effekterne er små.

Andre eksternaliteter såsom trængsel, CO2 og sundhed vurderes at have lille betydning i den samlede CBA-beregning. Sådanne effekter ville kunne inddrages hvis en større modelberegning med OTM var gennemført. Herunder ville det være muligt at se på afledte effekter af trængsel og bilkilometer mv. Et fuldt billede af letbanen ville dog fordrer at alle stationer fik kodet tilhørende autonome systemer, og at disse var 'optimerede' i forhold til stoppesteder og omløb. Dette er dermed en ganske stor opgave som fordrer ganske meget udvikling samt kørsler med en ekstern trafikmodel. Generelt er substitution mellem kollektiv trafik og bil ganske moderat, og i særdeleshed er overflytningspotentialer begrænset, når man kun ændre på den sidste del af ruten. Derfor er både ændringer i mængder og rejsetid forventeligt af mindre betydning.

Der er i denne rapport skitseret hvorledes en enkelt station kan analyseres og optimeres med henblik på autonome til- og frabringer services. Dette kan i princippet udfoldes til andre stationer selvom det som beskrevet ovenfor er en større opgave. Man vil forventeligt skulle køre en række iterationer mellem designet for first/last mile trafikken og den overordnede trafik for at få tilpasses eventuel induceret trafik.

Datagrundlag er centralt hvis man skal forberede nye mikromobilitetsservices langs letbanen. Der er generelt brug for at bedre datagrundlag for at kunne implementere nye services. En mulighed er at anvende en mobilbaseret 'sensing' platform, der kobles sammen med beacons eller andre elektroniske 'tags'. Dette er gennemført på DTU og kan lede til en bedre forståelse af, hvordan trafikken strømmer igennem systemet over tid. Dette kan i sidste ende anvendes til at tilpasse og optimere systemet.

Fremadrettet kan det være relevant, at der i opbygningsfasen implementeres detaljerede monitoreringssystemer, der ligner den smartphone sensing platform, der er implementeret på DTU. Dette vil muliggøre, at man i den første fase af implementeringen kan tilpasse og optimere systemet efter behov. Det vil også give mulighed for at vurdere potentialet for andre services, herunder 'on-demand' services eller services, der knytter sig til specielle målgrupper.

Det er planen at den opstillede simulationsmodel for Hersted Industripark vil blive udviklet til også at kunne undersøge on-demand services parallelt til en frekvensbaseret service.

Reference

Jomeh, A.J., Clausen, S.R. 2021. LINC: Simulering af selvkørende shuttles i et offentligt transportsystem. Bachelor projekt. DTU.

Pei Cao 2020. Optimal Scheduling of Electric Autonomous Buses under Battery Constraints. Master Thesis. DTU.

Inon Peled, Kelvin Lee, Yu Jiang, Justin Dauwels, Francisco C. Predictive Optimization Framework for Stochastic Demand-Responsive Transit Services. Url: <https://arxiv.org/pdf/1902.09745.pdf>

Valentino Servizi, Dan Roland Person, Per Bækgaard, Hannah Villadsen, Inon Peled, Francisco Camara Pereira, Otto Anker Nielsen (2021a). "Is not the truth the truth?" Passenger flow by smartphone and autonomous bus interaction. Working paper.

Valentino Servizi, Dan Roland Person, Per Bækgaard, Francisco Camara Pereira, Jeppe Rich, Otto Anker Nielsen (2021b). Self-learning of passenger flow to reduce bias in autonomous buses. Working paper.