

ÖV-Netzplanung im Zeitalter von selbstfahrenden Fahrzeugen

In naher Zukunft stellen neue Mobilitätsformen den öffentlichen Verkehr vor grosse Herausforderungen. Die Betreiber müssen trotz schwer prognostizierbaren, externen Disruptionen ein möglichst effizientes Angebot planen. Dazu wird ein genetischer Algorithmus zum Entwerfen von ÖV-Netzen vorgestellt. Dieser erlaubt den einzelnen Linien, sich dynamisch an die jeweilige Nachfrage-Situation zu adaptieren. Resultat ist ein effizientes, nachfrageorientiertes ÖV-Angebot. Der Algorithmus ist in eine agentenbasierte Mikro-Simulation (MATSim) implementiert und wird für den Fall Zürich angewendet.

Der öffentliche Verkehr spielt eine zentrale Rolle im heutigen Mobilitätsmarkt. Er bietet gleichberechtigten Zugang zu Mobilität unabhängig von Autobesitz, Alter oder physischem Zustand. Die Herausforderung in der ÖV-Netzplanung ist es, eine ausgewogene Balance zwischen den Interessen von Betreibern (Angebot) und Passagieren (Nachfrage) zu finden. Während Passagiere möglichst direkte und häufige Verbindungen über den ganzen Tag verteilt fordern, wollen die Betreiber ihren Gewinn maximieren und darum möglichst rentable Linien zu nachfragestarken Perioden bedienen. Der Planungsprozess kann somit als Optimierungsproblem angeschaut werden, welches sich auf die zwei Zielfunktionen Maximierung von Nutzen sowohl für die Betreiber als auch für die Passagiere fokussiert^[1]. Diesem Prozess werden aber oft politische Rahmenbedingungen gesetzt, die einen minimalen «Level of Service» fordern und im Gegenzug den öffentlichen Verkehr subventionieren.

Viele ÖV-Netze sind historisch gewachsen basierend auf den Erfahrungen der Planer, einfachen Richtlinien oder lokalen Vorgaben. Neue Linien und Haltestellen wurden sukzessive eingeführt oder entfernt und Bedienungshäufigkeiten angepasst. Die Forschung beschäftigt sich intensiv mit effizienteren Lösungen für das komplexe Problem der Planung und Evaluierung von ÖV-Netzen. Trotz den bedeutenden Fortschritten in diesem Feld grenzen viele Algorithmen das Problem ein, indem sie sich auf eine statische Nachfrage stützen. Damit können nur stark vereinfachte Prognosen über den Einfluss von externen Variablen auf das ÖV-Netz gemacht werden, wie beispielsweise Verschiebungen in der Verkehrsmittelwahl durch neue Mo-



VON
PATRICK MANSER
MSc ETH Raumentwicklung
und Infrastruktursysteme
(RE&IS), Verkehrsplaner, SBB

VSS-Preis 2018 | Prix VSS 2018

Patrick Manser erhielt den VSS-Preis 2018 für seine Masterarbeit am Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme der ETH Zürich.

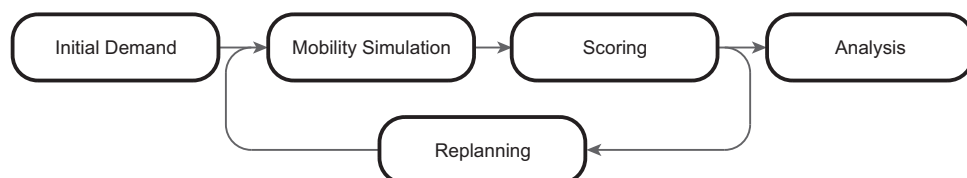
Patrick Manser a reçu le prix VSS 2018 pour son mémoire de master à l'Institut de la planification des transports et des systèmes de transport de l'EPF de Zurich.

bilitätsformen wie «Mobility-as-a-Service» (MaaS). Diese Arbeit möchte diese Lücke schliessen und schlägt dafür einen agentenbasierten, genetischen Algorithmus vor, in welchem das ÖV-Netz mit seiner Umgebung interagiert und mit anderen Verkehrsmitteln konkurriert. In einem ersten Schritt wird der entwickelte Ansatz im Testfall Zürich angewendet, um die Resultate von Modell und Realität zu vergleichen. In einem zweiten Schritt wird in einem Zukunftsszenario der Einfluss von selbstfahrenden Taxis auf das öffentliche Nahverkehrsangebot von Zürich untersucht.

Simulationsumgebung

Die agentenbasierte Verkehrssimulation MATSim erfüllt alle Anforderungen vom Algorithmus an die Simulationsumgebung. Sie beinhaltet ein gut ausgearbeitetes Verhaltensmodell aus Sicht der Agenten und erlaubt die Simulation von grossflächigen Modellen, wobei der öffentliche Verkehr sehr detailliert repräsentiert wird^[2]. Zudem ermöglichen neueste Entwicklungen die Simulation von neuen Mobilitätsformen wie «MaaS»^[3].

In MATSim hat jeder einzelne Agent einen täglichen Plan mit einer vordefinierten Aktivitätenkette (Arbeiten, Freizeit etc.). Die Verkehrsnachfrage entsteht durch die einzelnen Wege zwischen zwei Aktivitäten. In einem evolutionären Algorithmus (Abb. 1) optimieren die Agenten ihren täglichen Plan, indem sie zufällig neue Verkehrsmittel, andere Abfahrtszeiten oder alternative Routen wählen (Replanning). Der neue Plan wird ausgeführt (Mobility Simulation) und gegenüber dem alten Plan bewertet (Scoring). Wenn beispielsweise ein



1 | Der evolutionäre Algorithmus von MATSim.

1 | L'algorithme évolutionnaire de MATSim.

Agent im Stau steht oder einen Bus verpasst, merkt er dies in der Mobility-Simulation, kriegt eine dementsprechend tiefe Bewertung für seinen Plan und verwirft diesen wieder. Dieser Prozess wird immer wieder ausgeführt, bis alle Agenten ihren sinnvollsten Plan gefunden haben und sich die mittlere Bewertung über die gesamte Bevölkerung stabilisiert.

ÖV-Netzdesign in MATSim

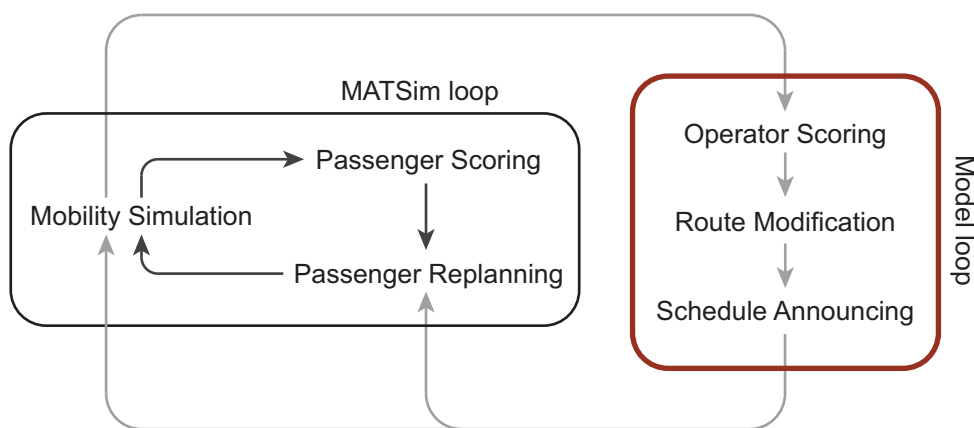
Ein erster Ansatz zum Entwerfen von ÖV-Netzen hat Neumann^[4] in MATSim implementiert. Der von Neumann entwickelte Ansatz ist inspiriert von profitorientierten und selbstorganisierten öffentlichen Verkehrssystemen. Solche Systeme werden «Paratransit» oder «Minibus-Systeme» genannt und stellen vor allem in Entwicklungsländern ein sehr konkurrenzfähiges Verkehrsmittel dar. Sie füllen dort die Lücken im bestehenden, offiziellen ÖV-Angebot^[5]. Diese Systeme bestehen aus kleinen und mittleren Fahrzeuggrößen (auch Jitneys) und bieten einen Service an, der stark auf die Bedürfnisse der Passagiere zugeschnitten ist. Der von Neumann eingeführte Algorithmus ist somit auf das Optimieren von Busnetzen ausgelegt und wird in diesem Rahmen auch dafür angewendet.

Im Gegensatz zum ÖV in der Schweiz ist Paratransit nicht subventioniert und dadurch viel stärker auf Gewinn angewiesen. Damit hat ein Paratransit-System die Fähigkeit, Marktlücken in einem existierenden Netz aufzudecken und Relationen zu identifizieren, wo es genügend Nachfrage für ein profitables Angebot gibt. Diese Fähigkeit macht den Ansatz auch für einen hier ansässigen ÖV-Betreiber sehr spannend. Noch interessanter wird der Algorithmus im Zeitalter von selbstfahrenden Fahrzeugen. Ein Betriebsmodell zwischen Taxi und Bussen mit einem effizienten, nachfrageorientier-

ten Angebot könnte einer möglichen Richtung von einem zukünftigen ÖV-Betreiber entsprechen. Diese Arbeit verwendet den von Neumann entwickelten Algorithmus als Startpunkt, erweitert ihn und passt ihn an die Anforderungen an ein ÖV-System in der Schweiz an.

Die Funktionsweise des Algorithmus ist in schematisch in Abbildung 2 dargestellt. Er erweitert den bestehenden MATSim-Kreislauf, in welchem die einzelnen Agenten ihre Tagespläne optimieren, mit einer ÖV-Netz-Optimierung (rechte Box). Diese Optimierung ist – wie auch die Agentenoptimierung – nach dem Prinzip eines genetischen Algorithmus aufgebaut. Einzelne Linien im ÖV-Netz sind einzelne Individuen einer Gesamtpopulation, welche durch Mutationen (Route Modification) die Bewertung ihrer Fitnessfunktion (Operator Scoring, hier gleichbedeutend mit Profitberechnung) maximieren wollen. Auf der Basis von diesen Mutationen (z.B. Verlängerung/Verkürzung der Routen oder andere Bedienungszeiten) werden so in jeder Iteration neue Variationen von den einzelnen Linien ausprobiert (Schedule Announcing). Je nach Bewertung der Fitnessfunktion dürfen die Betreiber neue Busse für die einzelnen Linien kaufen oder müssen Fahrzeuge verkaufen. Sobald einer Linie die Fahrzeuge ausgehen, muss sie den Betrieb einstellen. Dieser Prozess wird simultan zu der Agentenoptimierung ausgeführt, d.h., Agenten können sofort auf ein neues Angebot reagieren und im Falle einer ungünstigen Mutation auf ein anderes Verkehrsmittel wechseln oder eine andere Route nehmen. Am Schluss überleben nur gewinnbringende Individuen (Buslinien).

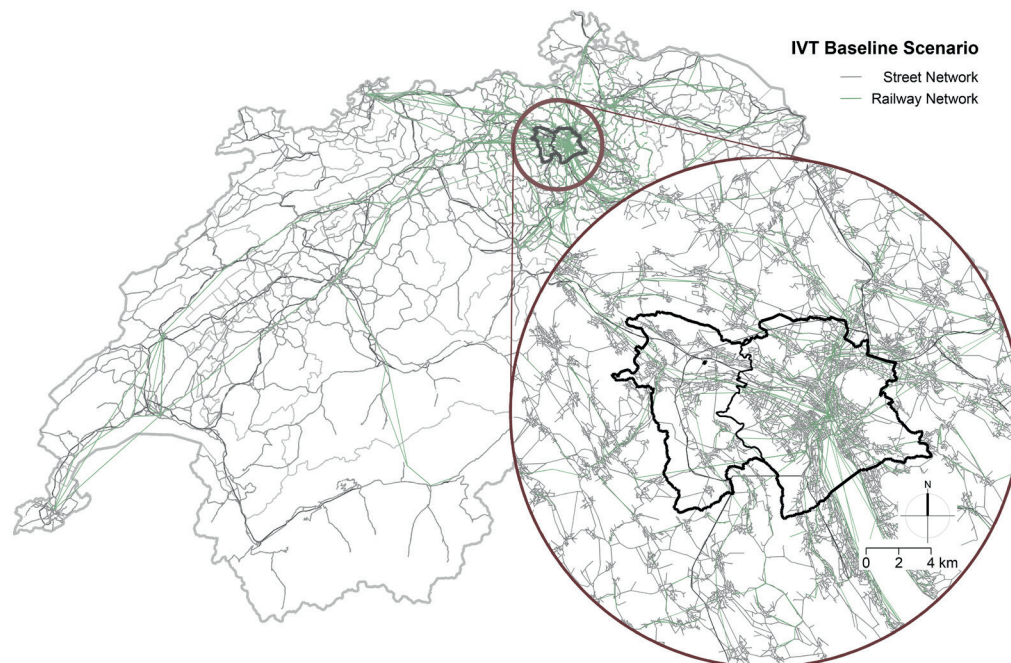
Exkurs in die Spieltheorie: Der Algorithmus ist ähnlich aufgebaut wie ein Stackelberg-Duopol^[6]. Der Bus-Betreiber ist der führende Spieler (Leader) und führt eine Angebotsveränderung ein. Die Agenten sind die nachfolgenden Spieler



2 | Einbettung vom Algorithmus in den MATSim-Loop.
2 | Intégration de l'algorithme dans la boucle MATSim.

Dans un proche avenir, de nouvelles formes de mobilité vont confronter les transports publics à de grands défis. Les exploitants doivent planifier une offre aussi efficiente que possible et ce malgré des disruptions externes difficiles à prévoir. L'algorithme génétique destiné à concevoir des réseaux de TP, qui est présenté ici,

permet aux différentes lignes de s'adapter de manière dynamique à la demande momentanée. Résultat: une offre de TP efficiente et axée sur la demande. L'algorithme est implémenté dans une plateforme de microsimulation (MATSim) multi-agents appliquée au cas de la ville de Zurich.



3 | Das IVT-MATSim-Szenario.
3 | Le scénario MATSim de l'IVT.

(Follower) und reagieren darauf, indem sie bei einer schlechten Planbewertung auf andere Routen oder Verkehrsmittel ausweichen. Die Buslinien kooperieren nicht, haben aber vollständige Information über das Reiseverhalten der Agenten. Sie können ihre Routen dort anpassen, wo sie am meisten Profit machen können. Damit die Agenten ebenso vollständige Information über Veränderungen im Angebot haben, müssen sie ihre Routen regelmässig updaten. Durch dieses Zusammenspiel werden beide Zielfunktionen (Betreiber- und Passagiersicht) in der Optimierung des Busnetzes berücksichtigt.

Szenario und Ergebnisse

Für die Anwendungen wird das MATSim-Szenario vom IVT (Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, ETHZ) verwendet (Abb. 3). Der Fokus liegt auf dem Stadtgebiet von Zürich, erweitert mit etwas ländlicheren Teilen im Westen.

Um die Rechenzeiten zu verkürzen, werden nur 10% der Bevölkerung simuliert (120 000 Agenten). Es werden zwei Arten von Anwendungsfällen unterscheiden: In einem ersten Schritt werden die Ergebnisse vom Algorithmus mit dem realen ÖV-Angebot in Zürich verglichen. Dabei wird vor allem die Aussagekraft vom Algorithmus untersucht. In einem zweiten Schritt generiert der Algorithmus ein ÖV-Angebot in Kombination mit einer selbstfahrenden Taxiflotte in Zürich. Gerade in ländlicheren Gebieten sollen selbstfahrende Taxis sehr konkurrenzfähig gegenüber dem ÖV werden. Das Modell soll erkennen, auf welchen Linien ein Angebot nicht mehr profitabel sein wird, weil die Agenten das selbstfahrende Taxi als Verkehrsmittel präferieren.

Im ersten Anwendungsfall dient eine Simulation mit dem kompletten ÖV-Angebot in Zürich als Referenz (alle Züge, Trams und Busse). Als Startpunkt für den Netzoptimierungs-Algorithmus wurden sämtliche existierenden Bus- und

Anzeige



Lesen Sie «Strasse und Verkehr» jetzt auch online oder auf Ihrem Tablet als **e-paper!**

Lisez dès maintenant «route et trafic» également en ligne ou sous forme de **e-paper** sur votre tablette!

► www.vss.ch

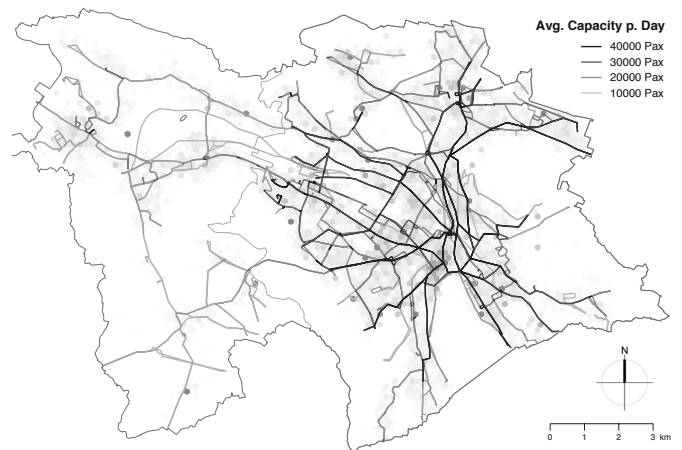
	Referenz	Algorithmus	
		Ohne Subventionen	Mit Subventionen
Betreibersicht:			
Netzwerklänge [km]	463	217	290
Anz. bed. Haltestellen []	1270	701	896
Takt in Spitzenstd. [Fzg/h]	4.7	6.7	9.0
Fahrzeug-Stunden [h]	5862	2630	5698
Fahrzeug-Kilometer [km]	92 411	45 700	101 989
Anz. Passagiere []	51 161	40 992	68 520
Subventionen [CHF]	323 438*	-	270 159
Passagiersicht:			
Wegedauer total [min]	28.9	37.5	37.8
Zeit in Fahrzeug [min]	12.8	17.5	16.1
Gehdistanz Zugang [m]	296	372	388
Gehdistanz Abgang [m]	271	346	369
Wartezeit [min]	4.0	3.8	3.8
Anz. Umstiege []	0.45	0.34	0.46
*geschätzter Wert basierend auf Fahrzeugkilometern und mittleren Betriebskosten aus der Literatur ^[7] .			

Tabelle 1: Netzwerk-Statistiken (Modell gemittelt über 10 Simulationen).
 Tableau 1: Statistiques du réseau (modèle obtenu en calculant la moyenne de 10 simulations).

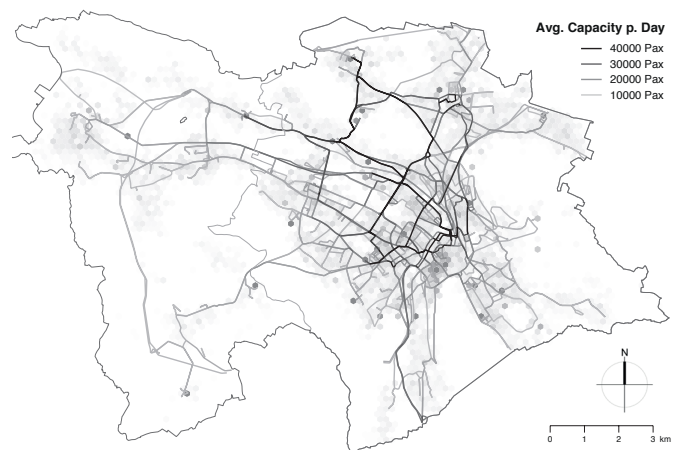
Tramlinien (das gesamte öffentlich Nahverkehrsangebot) im Perimeter entfernt, Züge verkehren aber unverändert. Der Algorithmus kann also innerhalb von diesem Perimeter völlig frei nach optimalen Buslinien suchen. Neben dem normalen Szenario wurde noch ein Szenario mit einem vereinfachten Subventionsansatz gerechnet. Subventionen werden denjenigen Betreibern ausgeschüttet, welche Passagiere in unprofitablen Gebiete bedienen.

Die Resultate sind in Tabelle 1 und Abbildung 4 dargestellt. Die Ergebnisse sind erstaunlich: Nur durch zufällige Linienmutationen und ohne jegliche Vorkenntnisse über das existierende Netz schafft es das Modell gerade in Anwendung mit Subventionen, ein mit der Realität vergleichbares Busangebot für Zürich zu entwerfen. Viele Kennzahlen bewegen sich in einer ähnlichen Grössenordnung. Trotzdem gibt es einige Unterschiede, welche vor allem auf den profitorientierten Ansatz zurückzuführen sind. Während in der Realität die totale Netzwerklänge maximiert wird, tut das Modell dies nicht. Das hat den Grund, dass der Algorithmus keine globalen Kennzahlen optimiert, sondern nur einzelne Linien. Laut Modell ist es also profitabler, sich auf insgesamt weniger Korridore zu konzentrieren. Diese Korridore werden dafür mit einem höheren Takt bedient. Im nicht subventionierten Fall ist sehr schön zu sehen, dass sich das Angebot auf die Kernstadt reduziert (Abb. 4). Zudem verändert sich im Modell das Reiseverhalten der Passagiere. Sie benützen den ÖV für längere Wege, nehmen dafür aber auch längere Zu- und Abgangswege in Kauf.

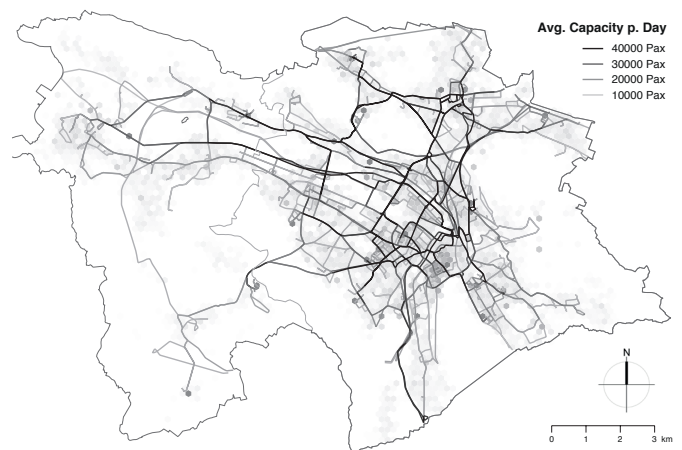
4 | Kapazitätskarten.
 4 | Cartes de capacité.



Referenzfall.
 Cas de référence.



Algorithmus ohne Subventionen.
 L'algorithme sans subventions.



Algorithmus mit Subventionen.
 L'algorithme avec subventions.

Flottengrösse selbstfahrende Taxis		
	0	5000
Betreibersicht ÖV:		
Netzwerklänge [km]	380	304
Anz. bed. Haltestellen []	1106	967
Fahrzeug-Stunden [h]	8705	6415
Fahrzeug-Kilometer [km]	165 605	117 845
Anz. Passagiere []	48 145	35 778
Betreibersicht Taxi:		
Anz. Passagiere []	-	33 235

Tabelle 2: Statistiken aus dem Zukunftsszenario (Mittelwerte über 5 Simulationen).
Tableau 2: Statistiques du scénario d'avenir (moyenne basée sur 5 simulations).

Das Zukunftsszenario untersucht den Einfluss einer selbstfahrenden Taxi-Flotte auf das ÖV-Netz in Zürich. Die Simulation von selbstfahrenden Taxis ist stark vereinfacht. Die Taxis haben beispielsweise keine intelligente Repositionierungsstrategie. Deshalb hat die absolute Flottengrösse wenig Aussagekraft. Trotzdem zeigt das Modell eindeutig, dass der ÖV-Betreiber eine grosse Anzahl an Kunden an den Taxibetreiber verliert (Tab. 2). Darum reduziert der nachfragegerichtete Algorithmus das ÖV-Angebot auf die noch rentablen Linien, welche sich vor allem im Zentrum befinden (Abb. 5). Rot eingefärbt sind Relationen, welche gegenüber der Variante ohne autonome Taxis wegfallen.

Fazit

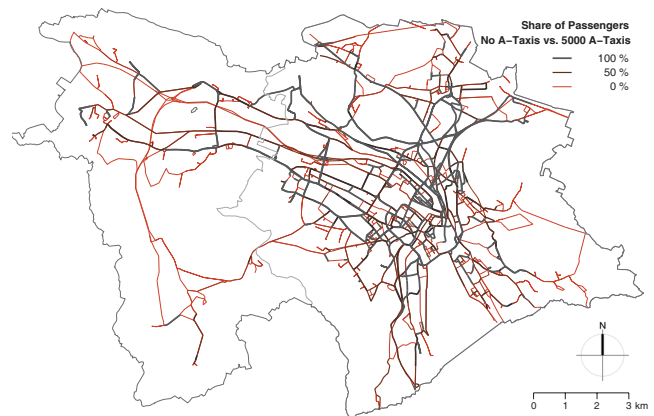
Es wird ein genetischer Algorithmus zum Entwerfen eines Busnetzes vorgestellt, der sich in seinem Grundprinzip (rein profitorientiert) stark von den hier gängigen Rahmenbedingungen an die Netzplanung unterscheidet. Trotzdem zeigt das Modell im Referenzszenario, dass der Algorithmus mit relativ einfachen Mitteln realitätsnahe und plausible Ergebnisse liefert. Als Planungstool für einen Betreiber ist der Algorithmus aber (noch) nicht geeignet: Dazu muss er erstens weitere Rahmenbedingungen (z.B. jeder Haushalt erreicht eine Haltestelle in 300 m Entfernung) in die Optimierung aufnehmen. Zweitens fehlen Komponenten wie Fahrzeug- und Fahrereinsatzplanung.

Das Szenario mit selbstfahrenden Taxis zeigt die Herausforderungen für den ÖV der Zukunft. In diesem Anwendungsfall werden aber zahlreiche Annahmen getroffen, die mit grossen Unsicherheiten verbunden sind. Deshalb sind die Modellergebnisse nur qualitativ zu sehen. Für quantitative Prognosen sind sowohl Algorithmus als auch die Annahmen zu wenig ausgereift. Die Simulation von Interaktionen zwischen einem dynamischen ÖV-Angebot mit zukünftigen Mobilitätsformen ist jedoch extrem vielversprechend und kann einem Betreiber helfen, sich in dieser Welt zu positionieren.

5 | Karten mit Passagier-Aufkommen im Zukunftsszenario. 5 | Cartes avec nombre de passagers dans le scénario d'avenir.



Referenzfall ohne selbstfahrende Taxis.
Cas de référence sans taxis autonomes.



Vergleich zwischen Passagieraufkommen ohne bzw. mit 5000 autonomen Taxis.
Comparaison du nombre de passagers avec et sans les 5000 taxis autonomes.

Quellen

- [1] Ceder, A. und N.H.M. Wilson (1986) Bus network design, Transportation Research Part B, 20 (4) 331-344.
- [2] Horni, A., K. Nagel und K. W. Axhausen (2016) The Multi-Agent Transport Simulation MATSim, Ubiquity Press, London.
- [3] Hörl, S. (2017) Agent-based simulation of autonomous taxi services with dynamic demand responses, Procedia Computer Science, 109C, 899-904.
- [4] Neumann, A. (2014) A paratransit-inspired evolutionary process for public transit network design, Ph.D.thesis. TU Berlin, Berlin.
- [5] Cervero, R. und A. Golub (2007) Informal transport: A global perspective, Transport Policy, 14 (6) 445-457.
- [6] Von Stackelberg, H. (1934) Marktform und Gleichgewicht, Springer, Berlin und Wien.
- [7] Bösch, P. M., F. Becker, H. Becker and K. W. Axhausen. 2018. Cost-based analysis of autonomous mobility services. Transport Policy 64: 76-91.