

Dynamische Nachfrageabschätzung für ein AMoD-System in Zürich

Hauptaugenmerk dieses Fachbeitrags ist die Flottendimensionierung für ein Autonomous Mobility on Demand (AMoD)-System in Zürich. Es werden Resultate für eine Simulation vorgestellt, in welcher die Flottengrösse, die erzeugten Wartezeiten und auch die Fahrtpreise im Gleichgewicht stehen. Diese Werte sind dabei direkt von der Nachfrage selbst abhängig, sodass auch diese Teil der Gleichgewichtslösung ist. Der Fall der „dynamischen Nachfrage“ errechnet 17.500 AMoD-Fahrten pro Tag in Zürich bei einer Flottengrösse von ca. 4.500 Fahrzeugen. Dies entspricht nur ca. der Hälfte der Fahrten, die strukturell möglich wären, wenn Nutzerpräferenzen nicht berücksichtigt würden. Die Studie zeigt daher deutlich, dass statische Nachfragemuster, wie sie bisher oft für Flottendimensionierungen verwendet wurden, meist zu einer Überschätzung führen.

The main focus of the paper is fleet sizing of an Autonomous Mobility on Demand (AMoD) system in Zurich. Results are presented for a simulation in which fleet size, generated waiting times and service costs are in equilibrium. These values are directly dependent on the demand itself, which therefore is also part of the equilibrium state. The "dynamic demand" case for Zurich yields 17,500 AMoD trips per day with a fleet size of approx. 4,500 vehicles. This amounts to only about half the trips that are structurally possible in the "static demand" case where user preferences are not taken into account. Therefore, the study provides strong evidence that static demand patterns as they are used frequently in current research lead to an overestimation in fleet sizing.

1 Einleitung

Automatisierte Fahrzeuge sind in den letzten Jahren zu einem aktiven Forschungsgebiet in der Verkehrsplanung geworden. Während sich die Technologie schnell entwickelt, werden immer detailliertere Studien über die Auswirkungen automatisierter Fahrzeuge auf das Verkehrssystem durchgeführt. Insbesondere der Fall des Autonomous Mobility on Demand (AMoD), d. h. der automatisierten Taxis, wird intensiv diskutiert: Während eine Verlagerung hin zur Sharing Economy mit weniger Privatfahrzeugbesitz und mehr serviceorientierter Mobilität verspricht, die Anzahl der zugelassenen Fahrzeuge zu reduzieren und den bisher ausgeschlossenen Nutzergruppen Mobilität zu bieten, sind auch negative Auswirkungen zu erwarten. Eine übliche Annahme ist, dass, obwohl weniger Fahrzeuge vorhanden sind, sie mehr fahren würden als vorher. Die gefahrenen Fahrzeugkilometer (VKT) würden durch Leerfahrten zu den Kunden, Umverteilung von Fahrzeugen im Netz oder sogar durch eine induzierte Nachfrage steigen, wenn das Reisen so bequem wird. Dies würde mit den negativen Auswirkungen einhergehen, die mit der Zunahme der VKT korrelieren, wie z. B. eine beschleunigte Abnutzung der Infrastruktur oder mehr Emissionen.

Eine wichtige Fragestellung dabei ist, welche Flottengrösse unter bestimmten Zielstellungen optimal für eine Stadt oder einen An-

bieter ist. Während bisherige Arbeiten in diesem Bereich meist eine fixe Nachfrage angenommen haben, geht der vorliegende Fachbeitrag einen Schritt weiter: Eine Flotte automatisierter Taxis muss eine bestimmte Nachfrage bedienen, die sich allerdings rekursiv aus den erzeugten Wartezeiten und Preisen ergibt. Somit werden Szenarien vorgestellt, in denen die Anzahl der Reisen, die Kosten wie auch das Serviceangebot im Gleichgewicht stehen.

2 Hintergrund

Experimente zur Dimensionierung von AMoD-Flotten existieren bereits für viele Städte weltweit. So wurde eine der ersten Studien für Singapur durchgeführt (Spieser et al. 2014), in welcher festgestellt wird, dass der Reisebedarf der Stadt durch ein Drittel der heutigen Fahrzeugflotte mit automatisierten Taxis gedeckt werden könnte. Zu ähnlich vielversprechenden Ergebnissen kommen die Studien von Fagnant und Kockelman (2014) für Austin, welche eine Flottenreduktion von 90 % berechnen und später mit verschiedenen Elementen, z. B. elektrischer Ladeinfrastruktur oder gepoolten Taxiangeboten, erweitert wurden (Chen et al. 2016; Levin et al. 2017; Fagnant und Kockelman 2018). In Liu et al. (2017) werden erstmals Kundenpräferenzen berücksichtigt, aber nur in einem Nachbearbeitungsschritt.

Auf Basis von Aimsun stellen Dandl et al. (2017) und Dandl und Bogenberger (2018) Simulationen für München vor, welche auf statischen Nachfragedaten basieren. Ähnlich gehen Martinez und Viegas (2017) vor, bei denen eine statische Nachfrage genutzt wird, in welcher Reisenden auf Basis eines heuristischen, auf Expertenmeinungen basierenden Prozesses automatisierte Verkehrsmittel zugewiesen werden.

Für den Fall Berlin verwenden Bischoff und Maciejewski (2016b) MATSim (Horni et al. 2016, siehe unten), um eine AMoD-Simulation zu erstellen. In Bischoff und Maciejewski (2016a) wird dieses Modell mit ÖPNV-Nutzern erweitert und schliesslich werden der Effekt verschiedener Kapazitätsannahmen auf die Staubbildung (Maciejewski und Bischoff 2017) sowie der Effekt auf die

■ Verfasser

Sebastian Hörl

Corresponding Author
sebastian.hoerl@ivt.baug.ethz.ch

Felix Becker

felix.becker@ivt.baug.ethz.ch

Kay W. Axhausen

axhausen@ivt.baug.ethz.ch

IVT - Institut für Verkehrsplanung
und Transportsysteme
ETH Zürich
Stefano-Francini-Platz 5
CH-8093 Zürich

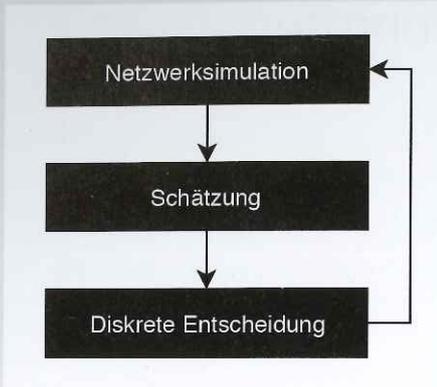


Bild 1: Iterativer Aufbau der Simulation: Zunächst wird die synthetische Population simuliert (in Kombination mit automatisierten Taxis). Zweitens werden Schätzungen für die Wahldimensionen aktualisiert. Drittens, basierend auf der Vorhersage, wird ein Verkehrsmittelwahlmodell verwendet, um neue tägliche Reisepläne zu erstellen

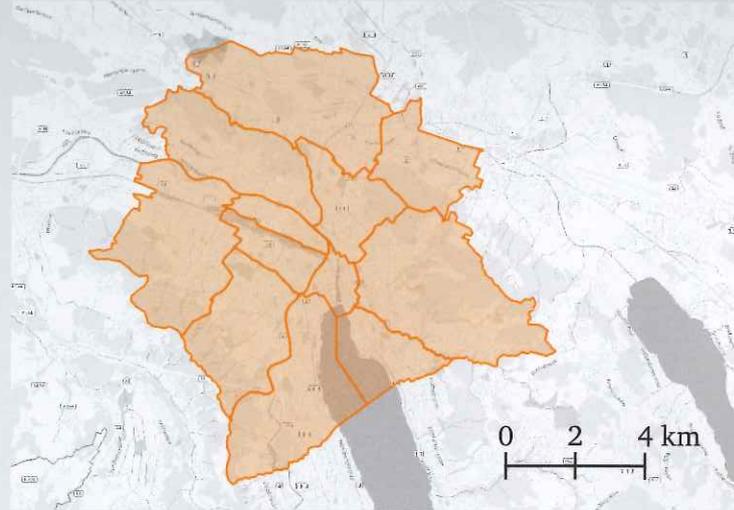


Bild 2: Karte von Zürich mit den 12 Stadtteilen. Der farbige Bereich wird in dieser Studie als Servicegebiet verwendet (Karte: OpenStreetMap/Wikimedia)

Parkplatzsuche (Bischoff et al. 2018) analysiert. Die Nachfrage wird dabei statisch gehalten. In einem ähnlichen Aufbau untersuchen Hörl et al. (2019b) den Effekt verschiedener Flottensteuerungsalgorithmen auf Leerkilometer und Wartezeiten in der Stadt Zürich. Dabei wird festgestellt, dass eine Flottengrösse von rund 7.000 bis 14.000 automatisierten Taxis unter idealen Kapazitätsbedingungen in der Lage wäre, den gesamten Mobilitätsbedarf der Stadt mit sinnvollen Fahrtpreisen und Wartezeiten zu decken.

Eine erste nachfragedynamische Simulation wird in Poulhès und Berrada (2017) und Berrada et al. (2019) vorgestellt, in welcher sich Agenten für die Nutzung eines automatisierten Campus-Transportsystems in Pa-leiseau bei Paris entscheiden können. Die Parameter des Entscheidungsmodells sind dabei jedoch der Literatur entnommen. Ebenfalls im französischen Kontext stellen Vosooghi et al. (2019) eine Simulation basierend auf MATSim vor, welche Agenten mittels dynamischer Entscheidungen eine Flotte automatisierter Taxis nutzen lässt. Das Entscheidungsmodell berücksichtigt dabei soziodemografische Einflüsse bei der Entscheidungsfindung.

Eine der aktuellsten Simulationen mit dynamischer Nachfrage wird von Wen et al. (2018) vorgestellt. Die Simulation basiert nicht auf einem agentenbasierten Transportmodell, sondern auf Tourenerzeugungsraten, die wiederum von einem diskreten Auswahlmodell abhängen. Dieses wird mit Reise- und Wartezeiten aus einer früheren Simulation der generierten Touren gespeist. Dadurch kann ein Gleichgewicht von Angebot und Nachfrage erreicht werden.

Ein Grossteil der vorliegenden Arbeit basiert auf einem laufenden Projekt, welches im Raum Zürich durchgeführt wird (Hörl et al. in Vorbereitung). Es lässt sich in drei Teile gliedern: Zunächst wird eine detaillierte Kostenschätzung automatisierter Mobilitätsangebote in der Schweiz durchgeführt (Bösch et al. 2018). Mit durchschnittlichen Reisecharakteristiken kommt die Teilstudie dabei zu dem Ergebnis, dass automatisierte Taxis zu einem Preis von ca. 0.40 CHF pro Passagierkilometer angeboten werden könnten, was deutlich niedriger ist als ca. 2.70 CHF/km, die heute bei konventionellen Taxis fällig sind. Im zweiten Schritt der Studie wird eine Umfrage im Kanton Zürich durchgeführt, bei welcher die Befragten zunächst eine reguläre tägliche Reise angeben sollen. Auf Basis dieser Wege werden Stated-Choice-Experimente erstellt. Neben den bisherigen Verkehrsmitteln werden automatisierte Taxis (einzeln und geteilt), private automatisierte Fahrzeuge und automatisierte ÖV-Zubringer als Alternativen präsentiert. Die Entscheidungssituationen unterscheiden sich durch die jeweiligen Attribute (Kosten, Reisezeit etc.). Für verschiedene Distanzen (hier am Beispiel von 5 km) kann dabei festgestellt werden, dass die VTTS (*Value of travel time savings*) für ein automatisiertes Taxi mit ca. 13 CHF/h niedriger als die des konventionellen Privatfahrzeugs (19 CHF/h) und näher an denen des ÖPNV (12 CHF/h) liegen. Zudem kann die Zahlungsbereitschaft zur Verkürzung der Wartezeit berechnet werden, welche beim automatisierten Taxi bei ca. 32 CHF/h liegt, während eine Verkürzung der Umsteigezeit im ÖPNV zum Vergleich ca. 21 CHF/h wert ist. Diese Werte

werden im dritten Teil der Studie verwendet, um in einer auf dem Simulationstool MATSim basierenden Simulation die tatsächliche Nachfrage mit diesen Verhaltensparametern und Kosten zu bestimmen. Die Simulationen, die im Folgenden beschrieben werden, basieren, mit kleinen Abwandlungen, wesentlich auf diesen laufenden Arbeiten.

3 Simulations-Framework

Wie aus dem vorherigen Abschnitt hervorgeht, werden agentenbasierte Modelle häufig für die Simulation von AMoD-Systemen verwendet, da sie individuelle Reisen und die Interaktion zwischen Reisenden und Taxis modellieren können. Für die vorliegende Studie wurde das agentenbasierte Verkehrssimulationssystem MATSim (Horni et al. 2016) gewählt. Im nächsten Abschnitt wird eine kurze Einführung in MATSim gegeben, gefolgt von einer Vorstellung zusätzlicher Erweiterungen, die am System vorgenommen wurden.

3.1 MATSim

Eine typische MATSim-Simulation benötigt eine Population von Agenten als Input. Sie enthält eine grosse Anzahl von Reisenden mit soziodemografischen Attributen und detaillierten Tagesplänen. Ein Agent kann an einem Tag mehrere Aktivitäten ausüben, die zu einem bestimmten Zeitpunkt und für eine bestimmte Dauer durchgeführt werden sollten. Diese Aktivitäten sind durch Wege verbunden, denen ein bestimmtes Verkehrsmittel zugeordnet ist.

Für die Simulation des Straßenverkehrs stellt MATSim eine Netzwerksimulationskomponente zur Verfügung, die zeitschritt- und warteschlangenbasiert arbeitet. Je nachdem, wann Agenten in bestimmte Straßenabschnitte einfahren, können sie durch aufkommende Staus verzögert werden oder durch Busse oder andere Fahrzeuge, die die Straße blockieren, gebremst werden. Für die vorliegende Arbeit werden hauptsächlich die komfortablen Datenstrukturen von MATSim sowie die Netzwerksimulation verwendet. Darüber hinaus bietet die Standardvariante von MATSim auch eine „evolutionäre Lernschleife“, in der Agenten ihre Tagespläne an das jeweilige Transportsystem und die Entscheidungen anderer Agenten anpassen. In dieser Arbeit wird ein anderer Ansatz verwendet, der ein diskretes Verkehrsmittelwahlmodell direkt auf die Pläne der Agenten anwendet.

3.2 Discrete Mode Choice Modell

In letzter Zeit wurde vermehrt daran gearbeitet, bestehende diskrete Entscheidungsmodelle innerhalb der MATSim-Schleife zu nutzen, um Entscheidungen zu treffen (Hörl et al. 2018, 2019a). Die Funktionsweise des Systems (Bild 1) besteht darin, dass Entscheidungsdimensionen wie Reisezeiten, Wartezeiten und andere aus einer vorhergehenden Netzwerksimulation und/oder früheren Iterationen geschätzt werden. Am Ende jedes Zyklus wendet ein konfigurierbarer Anteil von Agenten das Verkehrsmittelwahlmodell auf ihre Pläne an. In der Folge wird sich der Zustand des Verkehrssystems ändern und in den nächsten Iterationen können andere Entscheidungen getroffen werden. Letztendlich stabilisiert sich die Verkehrsmittelwahl und steht in einem Gleichgewicht mit den Verkehrsbedingungen im Netzwerk.

Das System erleichtert den Wechsel zwischen verschiedenen Modellformulierungen. Derzeit können Nutzenfunktionen in einem Best-Response-Kontext oder als Teil eines multinomialen Logit-Modells (Train 2009) verwendet werden. Ausserdem kann eine rein zufällige Auswahl konfiguriert werden. In jedem Fall werden die Optionen, die einem Agenten zur Verfügung stehen, durch eine Reihe von Einschränkungen bestimmt, wobei die wichtigste der „vehicle continuity constraint“ ist. Dieser legt fest, dass ein Agent nur dann ein bestimmtes Verkehrsmittel wählen darf, wenn das entsprechende Fahrzeug bereits zum Ausgangspunkt der betreffenden Reise ge-

bracht wurde. Bei wegebasierten (*trip-based*) Modellen bestehen die betrachteten Auswahlmöglichkeiten aus einzelnen Verkehrsmitteln für die jeweiligen Reisen. Es können aber auch tourbasierte oder ganztägige Alternativen generiert werden, um realistischere, aber rechnerisch teurere Entscheidungen zu ermöglichen.

3.3 Simulation automatisierter Taxis

Für die Simulation von automatisierten Fahrzeugen wird eine Erweiterung für MATSim (Hörl 2017; Maciejewski et al. 2017) verwendet. Jedes Fahrzeug wird unabhängig voneinander im Netzwerk simuliert. Eine globale Dispatcher-Komponente steuert die Bewegung von Flottenfahrzeugen und verwaltet die Zuordnung von Anfragen. Diese Anfragen werden ohne Voranmeldung erstellt, d. h. erst sobald ein Reisender an einem bestimmten Ort abgeholt werden möchte. Der Dispatcher verwendet dann einen heuristischen Algorithmus, der in Bischoff und Maciejewski (2016b) beschrieben ist. Dieser Ansatz ist auf Geschwindigkeit optimiert, während andere Algorithmen optimiertere Ergebnisse liefern können (Hörl et al. 2019b; Ruch et al. 2018).

4 Simulationsszenarien

Die Simulationsszenarien basieren auf einer synthetischen Agentenpopulation der Stadt Zürich und des Umlandes. Diese beinhaltet detaillierte Tagespläne von Anwohnern und Durchreisenden. Das Szenario wurde anhand von Befragungen zum Alltagsverhalten in den wichtigsten Kategorien, die für die Verkehrsmittelwahl entscheidend sind, kalibriert (Reisezeitverteilungen, Modal Split nach Distanzklassen etc.)

Ziel der Zukunftsszenarien ist es, eine Vorstellung von der Nachfrage nach AMoD-Reisen in Zürich zu erhalten. Der Einfachheit halber wird in dieser Studie nur das Stadtgebiet von Zürich, bestehend aus den 12 Stadtkreisen, von einer Flotte automatisierter, elektrischer Einzeltaxis bedient (Bild 2).

Es werden drei Experimente durchgeführt. Im ersten Experiment wird ein Best-Response-Modell so konfiguriert, dass alle Fahrten, die von dem automatisierten Taxisdienst bedient werden *könnten*, von ihm auch tatsächlich bedient werden müssen.

Das heisst, unabhängig von Wartezeiten oder Reisekosten werden alle Fahrten in den Tagesplänen aller Reisenden, die nicht anderweitig eingeschränkt sind, auf AMoD umgestellt. Offensichtlich geht das Experiment davon aus, dass die Dienstleistung so attraktiv ist, dass sie in jedem Fall genutzt wird. Die Simulation liefert daher eine Schätzung der Flottengrösse, die benötigt wird, um das Szenario „Maximale statische Nachfrage“ zu bedienen.

Zweitens wird die Simulation mit einem multinomialen Logitmodell für konventionelle Verkehrsmittel und dem zusätzlichen AMoD-Transportmodus durchgeführt (siehe Hörl et al. in Vorbereitung, für die genaue Spezifikation und Parameterwerte). Die Nutzenfunktion ist wie folgt definiert:

$$u_{\text{AMoD}} = \alpha_{\text{pt}} + \beta_{\text{travelTime,pt}} \cdot x_{\text{travelTime,av}} + \beta_{\text{transferTime,pt}} \cdot x_{\text{waitingTime,av}} + \beta_{\text{cost}} \cdot p_{\text{av}} \cdot x_{\text{networkDistance,av}} \quad (1)$$

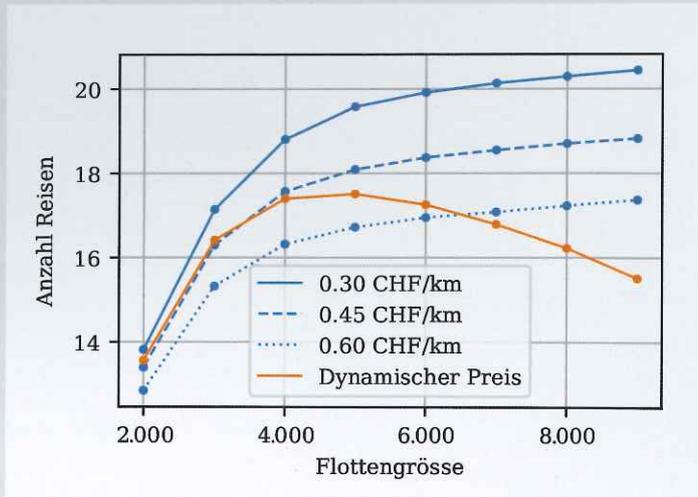
Die Wartezeiten werden dabei iterativ in der Simulation gemessen. Der Parameter p_{av} bezeichnet hier den Kilometerpreis, der in einer Reihe von Experimenten auf verschiedene statische Werte festgelegt wird. Das Experiment hat daher den Zweck, die resultierende Nachfrage im System zu untersuchen, wenn die Reisenden sensitiv gegenüber Wartezeiten sind. Die Flottengrösse und der Preis bleiben dabei statisch.

Das dritte Experiment nutzt ein detailliertes Kostenmodell automatisierter Mobilität in der Schweiz (Bösch et al. 2018). Abhängig von der Flottenauslastung, der Leerdistanz, der Flottengrösse und anderer Komponenten berechnet das Kostenmodell einen Fahrgastpreis pro Kilometer, der die Kosten für den Betrieb der AMoD-Flotte deckt.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass in allen Experimenten Wege, die im Basisszenario mit dem Verkehrsmodus „zu Fuss“ oder „Fahrrad“ durchgeführt werden, nie in AMoD-Reisen umgewandelt werden. Darüber hinaus werden die Reisezeiten basierend auf dem Basisszenario auf allen Straßenabschnitten fixiert. Effekte der Reisezeitänderung durch weniger oder mehr Fahrzeuge auf der Straße werden daher hier bewusst ignoriert. Auf diese Weise wird vermieden, zusätzliche Annahmen über die Kapazitätsauswirkungen automatisierter Fahrzeuge im aktuellen Stand dieser Simulationen machen zu müssen.

Alle Simulationen werden mit einer 10%igen Stichprobe der gesamten Agentenpopulation durchgeführt. Auf diese Weise werden realisierbare Simulationszei-

Bild 3: Abhängigkeit der Anzahl der Fahrten mit dem AMoD-Service von der Flottengrösse. In den Szenarien mit festem Preis (blau) führen niedrige Flottengrössen zu hohen Wartezeiten und geringer Nachfrage, im Fall mit dynamischem Preis (orange) führen hohe Preise für grosse Flottengrössen zu einem Nachfragemaximum bei ca. 4.500 Fahrzeugen



ten von ca. 3 Stunden pro Simulation auf einem modernen Cluster erreicht.

5 Ergebnisse

Das Szenario „Maximale statische Nachfrage“ ergibt eine Anzahl von 38.000 Fahrten, die von der AMoD-Flotte bedient werden müssen. Diese Zahl ist mit den in Bild 3 dargestellten wartezeitabhängigen Fällen (blau) zu vergleichen: Die Nachfrage, die unter Berücksichtigung des Verkehrsmittelwahlmodells und der Wartezeit angezogen wird, erreicht diesen Maximalwert für die gestesteten Flottengrössen nie.

Die Abhängigkeit der Nachfrage von der Flottengrösse ist wie erwartet: Mit zunehmender Flottengrösse wird mehr Nachfrage erzeugt. Die geringe Anzahl von Fahrten für kleine Flottengrössen ist eine direkte Folge der hohen Wartezeiten, die von kleineren AMoD-Flotten produziert werden. Auch die Reaktion der Reisenden auf unterschiedliche Preise, die auf AMoD-Reisen erhoben werden, ist sinnvoll: Je niedriger der Preis, desto mehr Nachfrage wird in diesen Simulationen geweckt. Dennoch, mit maximal ca. 20.000 Fahrten kann selbst bei einem Preis von 0,3 CHF/km nur etwas mehr als die Hälfte aller potenziellen AMoD-Reisen angezogen werden.

Schliesslich wird in der letzten Reihe von Simulationen der Preis nicht vordefiniert, sondern aus dem Kostenmodell berechnet. Der Graph „Dynamischer Preis“ in Bild 3 zeigt, dass es ein Nachfragemaximum gibt, wenn Wartezeiten und Preise berücksichtigt werden: Grössere Flottengrössen führen zu höheren Kosten und damit zu einer gerin-

geren Nachfrage. In diesen Simulationen ergibt sich eine optimale Flottengrösse von ca. 4.500 Fahrzeugen, die an einem Tag ca. 17.500 Fahrten anziehen. Das ist wiederum nur die Hälfte aller Reisen, die strukturell möglich wären.

Da die Preise, wie die Wartezeiten, in diesen Simulationen endogen sind, ist es interessant, diese ebenfalls zu analysieren. Der Preis bei der nachfrageoptimalen Flottengrösse von ca. 4.500 Fahrzeugen liegt bei ca. 0,5 CHF pro Personenkilometer. Im Vergleich dazu wird ein Preis von 0,71 CHF/km als die Vollkosten pro Fahrzeugkilometer für Pkw-Besitz in der Schweiz angegeben.¹ Daher könnte ein solcher Service für die heutigen Autofahrer sehr attraktiv sein, wenn ihre Fahrten sich hauptsächlich auf das vorgesehene Einsatzgebiet beschränken. Kaum verwunderlich ist, dass der heutige Taxitarif von 2,70 CHF/km (Bösch et al. 2018) in der Stadt Zürich den AMoD-Tarif bei Weitem übersteigt.

6 Diskussion

Der Kürze halber beschränkt sich die Analyse in diesem Beitrag auf das Zusammenspiel von Flottengrössen, Wartezeiten, (kostendeckenden) Preisen und der AMoD-Nachfrage. Natürlich ermöglicht das Simulationssystem die Analyse einer Vielzahl weiterer Dimensionen wie z. B. Leerdistanz, VKT, Emissionen, Reisezeitgewinne und -verluste, ja sogar Gewinne und Verluste in

¹ Kosten eines Mustersautos (TCS, 16.2.2019): <https://www.tcs.ch/de/testberichte-ratgeber/ratgeber/kontrollenunterhalt/kilometerkosten.php>.

(nutzenbasierten) Wahlfaktormetriken auf Basis einzelner Agenten. Dies ermöglicht es auch, die Auswirkungen eines AMoD-Dienstes auf bestimmte soziodemografische Gruppen zu analysieren. Insbesondere die Analyse von Modal-Splits wird wichtig sein, da ein grosser Teil des Bedarfs in den vorgestellten Simulationen durch ehemalige ÖPNV-Nutzer erzeugt wird. Weitere Fragestellungen sind im Folgenden in Kürze aufgelistet.

- Die finanziellen Aspekte eines AMoD-Dienstes können untersucht werden. Wie beeinflussen spezifische Gewinnmargen oder Subventionen das System?
- Anstelle von *door-to-door*-Reisen kann die AMoD-Flotte als Zubringerdienst für das S-Bahn-Netz (Haslebacher 2018) simuliert werden. Wie würde dies die Nutzung von Bussen in der Stadt beeinflussen?
- Derzeit wird das System erweitert, um die Knappheit von Einstiegs- und Ausstiegsstellen im Netz sowie die Bereitstellung spezieller Verkehrsknotenpunkte (*Mobility hubs*) zu ermöglichen. Können räumliche Beschränkungen beim Ein- und Ausstieg, aber auch beim Parken, zu einem Problem für die Machbarkeit eines gross angelegten AMoD-Dienstes werden?
- Intelligenter Dispatching-Algorithmen können getestet werden. Ausgehend von früheren Studien erwarten die Autoren einen starken Einfluss auf die dynamische Nachfrage, je nachdem, ob ein leerdistanzminimierender Dispatcher eingesetzt wird oder einer, der versucht, die Wartezeiten im Betriebsbereich gleichmässig zu verteilen. Während vergleichende Studien für statische Nachfrageszenarien durchgeführt wurden, gibt es nach Kenntnis der Autoren bisher keine Studie, die verschiedene Flottensteuerungsstrategien unter dem Einfluss von Kundenverhalten bewertet.

7 Fazit

Abschliessend soll der Fokus auf zwei wesentliche Erkenntnisse der Studie gelegt werden. Erstens wird gezeigt, dass die Berücksichtigung des Reiseverhaltens bei der Nachfrageschätzung für einen AMoD-Dienst einen grossen Unterschied in den Ergebnissen macht. Die dynamische Nachfrage beträgt im vorliegenden Fall nur die Hälfte der maximal möglichen Anzahl Fahrten.

Zweitens kommen wir zu dem Schluss, dass unter unseren Annahmen eine AMoD-Flotte innerhalb des Zürcher Stadtgebiets mit ca. 4.500 Fahrzeugen zu einem Preis von 0,5 EUR/km betrieben werden könnte, was im Vergleich zu den Vollkosten für die Nutzung des eigenen Privatfahrzeugs in Zürich niedrig ist. Zwar wurde hier von kostendeckenden Preisen ausgegangen, die Ergebnisse weisen jedoch darauf hin, dass ein städtisches AMoD-System durchaus eine wirtschaftliche Alternative zum privaten Pkw-Besitz darstellen könnte.

Literaturverzeichnis

- Berrada, J.; Andreasson, I.; Burghout, W.; Leurent, F. (2019): Demand modelling of autonomous shared taxis mixed with scheduled transit, 98th Annual Meeting of the Transportation Research Board
- Bischoff, J.; Maciejewski, M. (2016a): Autonomous taxicabs in berlin – a spatiotemporal analysis of service performance, Transportation Research Procedia, 19, 176–186
- Bischoff, J.; Maciejewski, M. (2016b): Simulation of City-wide Replacement of Private Cars with Autonomous Taxis in Berlin, Procedia Computer Science, 83, 237–244
- Bischoff, J.; Maciejewski, M.; Schlenker, T.; Nagel, K. (2018): Autonomous vehicles and their impact on parking search, IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 1–1
- Bösch, P. M.; Becker, F.; Becker, H.; Axhausen, K. W. (2018): Cost-based analysis of autonomous mobility services, Transport Policy, 64, 76–91
- Chen, T. D.; Kockelman, K. M.; Hanna, J. P. (2016): Operations of a shared, autonomous, electric vehicle fleet: Implications of vehicle & charging infrastructure decisions, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 94, 243–254
- Dandl, F.; Bogenberger, K. (2018): Comparing future autonomous electric taxi with an existing free-floating carsharing system, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 1–11
- Dandl, F.; Bracher, B.; Bogenberger, K. (2017): Microsimulation of an autonomous taxi-system in munich
- Fagnant, D. J.; Kockelman, K. M. (2014): The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 40, 1–13
- Fagnant, D. J.; Kockelman, K. M. (2018): Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas, Transportation, 45 (1) 143–158
- Haslebacher, R. (2018): Intermodal Routing in MATSim Applied to SBB Green Class, Diplomarbeit, ETH Zurich
- Hörl, S. (2017): Agent-based simulation of autonomous taxi services with dynamic demand responses, Procedia Computer Science, 109, 899–904
- Hörl, S.; Balac, M.; Axhausen, K. W. (2018): A first look at bridging discrete choice modelling and agent-based microsimulation in MATSim, Procedia Computer Science, 130, 900–907
- Hörl, S.; Balac, M.; Axhausen, K. W. (2019a): Pairing discrete mode choice models and agent-based transport simulation with MATSim, 98th Annual Meeting of the Transportation Research Board
- Hörl, S.; Becker, F.; Dubernet, T.; Axhausen, K. W.: (in Vorbereitung) Induzierter Verkehr durch autonome Fahrzeuge: Eine Abschätzung, Laufendes Projekt SVI 2016/001
- Hörl, S.; Ruch, C.; Becker, F.; Frazzoli, E.; Axhausen, K. W. (2019b): Fleet operational policies for automated mobility: a simulation assessment for Zurich, Transportation Research: Part C, Forthcoming
- Horni, A.; Nagel, K.; Axhausen, K. W. (2016): The Multi-Agent Transport Simulation MATSim, Ubiquity Press, London
- Levin, M. W.; Kockelman, K. M.; Boyles, S. D.; Li, T. (2017): A general framework for modeling shared autonomous vehicles with dynamic network-loading and dynamic ride-sharing application, Computers, Environment and Urban Systems, 64, 373–383
- Liu, J.; Kockelman, K. M.; Boesch, P. M.; Ciari, F. (2017): Tracking a system of shared autonomous vehicles across the Austin, Texas network using agent-based simulation, Transportation, 44 (6) 1261–1278
- Maciejewski, M.; Bischoff, J. (2017): Congestion effects of autonomous taxi fleets, Transport, 33, 1–10
- Maciejewski, M.; Bischoff, J.; Hörl, S.; Nagel, K. (2017): Towards a testbed for dynamic vehicle routing algorithms, Vortrag: Highlights of Practical Applications of Cyber-Physical Multi-Agent Systems, 69–79, Cham
- Martinez, L. M.; Viegas, J. M. (2017): Assessing the impacts of deploying a shared selfdriving urban mobility system: An agent-based model applied to the city of lisbon, portugal, International Journal of Transportation Science and Technology, 6 (1) 13–27
- Poulhès, A.; Berrada, J. (2017): User assignment in a smart vehicles' network: dynamic modelling as an agent-based model, Transportation Research Procedia, 27, 865–872
- Ruch, C.; Hörl, S.; Frazzoli, E. (2018): AMoDeus, a Simulation-Based Testbed for Autonomous Mobility-on-Demand Systems, 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)
- Spieser, K.; Treleaven, K.; Zhang, R.; Frazzoli, E.; Morton, D.; Pavone, M. (2014): Toward a Systematic Approach to the Design and Evaluation of Automated Mobility-on-Demand Systems: A Case Study in Singapore, 229–245, Springer International Publishing, Cham
- Train, K. E. (2009): Discrete choice methods with simulation, Cambridge university press
- Vosooghi, R.; Kamel, J.; Puchinger, J.; Leblond, V.; Jankovic, M. (2019): Robotaxi service fleet sizing: Assessing the impact of user trust and willingness to use, 98th Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- Wen, J.; Chen, Y. X.; Nassir, N.; Zhao, J. (2018): Transit-oriented autonomous vehicle operation with integrated demand-supply interaction, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 97, 216–234

16. Auflage



Vollständig überarbeitete und erweiterte **16. Auflage** des **bewährten Standardkommentars** zur Straßenverkehrs-Ordnung einschließlich der VwV-StVO (Rechtsstand Juli 2018)

Roland Schurig
863 Seiten, zahlreiche farbige Grafiken und Tabellen
Format 12,5 x 19 cm, kartoniert
Als E-Book über den KV-Reader (Einzelplatz-Lizenz)
49,20 € inkl. MwSt., zzgl. Versand bei Druckwerk (ab 75,- € im Inland versandkostenfrei)
ISBN 978-3-7812-2045-4

Paketpreis für Druckwerk mit E-Book-Lizenz:
86,10 € statt 98,40 € inkl. MwSt. und Versand im Inland

Weitere Infos/Online-Bestellung unter www.kirschbaum.de

KIRSCHBAUM 70 Jahre 1948-2018
Ihr Fachverlag für
Verkehr und Technik