

# Simulationsbasierte Analyse der Wirkungen von Flotten autonomer Fahrzeuge auf städtischen Verkehr

VON KAI NAGEL, JOSCHKA BISCHOFF, GREGOR LEICH UND MICHAŁ MACIEJEWSKI

## 1 Einleitung

Es ist inzwischen denkbar, dass vollständig autonome, also selbstfahrende Fahrzeuge im Straßenverkehr zugelassen werden. Der hier vorliegende Text betrachtet insbesondere so genannte “Level 5” Fahrzeuge, die also noch nicht einmal mehr über ein Lenkrad verfügen. Weiterhin geht der Text zunächst davon aus, dass diese Fahrzeuge sich weitgehend nicht in Privatbesitz befinden, sondern stattdessen von einem oder mehreren Unternehmen als Flotte(n) betrieben werden. In diesem Kontext werden solche Fahrzeuge oft auch als Robotaxis bezeichnet, wobei zunächst offenbleibt, wie viele Passagierplätze pro Fahrzeug angenommen werden.

Robotaxis haben das Potential, sowohl unser Verkehrssystem als auch unsere urbanen Systeme grundlegend zu verändern (LEVINSON & KRIZEK, 2015; AXHAUSEN, 2016). Möglicherweise werden sie die Leistungsfähigkeit des motorisierten Verkehrs deutlich erhöhen, möglicherweise werden sie kundenfreundlicheren und gleichzeitig preiswerteren öffentlichen Verkehr bereitstellen können als existierende Systeme, und wenn sie elektrisch betrieben werden, können sie dies möglicherweise weitgehend CO<sub>2</sub>-neutral. Die Autoren

---

### *Anschrift der Verfasser:*

Prof. Dr. Kai Nagel  
Technische Universität Berlin  
Fachgebiet Verkehrssystemplanung und  
Verkehrstelematik  
Salzufer 17-19  
D-10587 Berlin  
E-Mail: nagel@vsp.tu-berlin.de

Joschka Bischoff  
Technische Universität Berlin  
Fachgebiet Verkehrssystemplanung und  
Verkehrstelematik  
Salzufer 17-19  
D-10587 Berlin  
E-Mail: bischoff@vsp.tu-berlin.de

Gregor Leich  
Technische Universität Berlin  
Fachgebiet Verkehrssystemplanung und  
Verkehrstelematik  
Salzufer 17-19  
D-10587 Berlin  
E-Mail: leich@vsp.tu-berlin.de

Michał Maciejewski  
Technische Universität Berlin  
Fachgebiet Verkehrssystemplanung und  
Verkehrstelematik  
Salzufer 17-19  
D-10587 Berlin  
E-Mail: maciejewski@vsp.tu-berlin.de

sind solchen Fragen in den letzten Jahren mit Hilfe von mikroskopischen Simulationen nachgegangen. Diese Simulationen beschäftigen sich eher nicht mit Verhaltensaspekten, sondern vor allem mit “mechanischen” Aspekten eines solchen Systems – wie die Wartezeit von der Flottengröße abhängt, wie viele Ladestationen für elektrischen Betrieb notwendig sind und was sie kosten, zu welchen Kosten Zubringerbusse zur S-Bahn durch Robotaxis ersetzt werden können, etc.

Der folgende Text wird über diese Simulationen zusammenhängend berichten. Er startet mit einem Abschnitt über die verwendete Technologie der mikroskopischen Simulation urbanen Verkehrs (Abschnitt 2), gefolgt von einem Abschnitt über die Integration von Robotaxis in das Simulationssystem (Abschnitt 3). Abschnitt 4 diskutiert den Dispatch dieser Fahrzeuge, und sich daraus ergebende Leistungsfähigkeiten. Abschnitt 5 untersucht die Konsequenzen eines vollständigen Ersatzes aller privaten Autos innerhalb der Stadtgrenzen von Berlin durch eine Flotte von Robotaxis. Dies führt, da zusätzlich zu den Passagierfahrten nun auch noch die Zubringerfahrten von einer Kundin zur nächsten abgewickelt werden müssen, auf jeden Fall zunächst zu mehr Fahrzeugkilometern und damit mehr Stau; Abschnitt 6 diskutiert, wie sich die vermutete höhere Flußkapazität der Straßen hier auswirkt. In Abschnitt 7 werden die Konsequenzen einer vollständigen Elektrifizierung dieser Flotte untersucht. Abschnitte 8 und 9 diskutieren den Einsatz von Sammeltaxis, also wenn mehrere Kunden ein Fahrzeug auf einem Teil der Strecke gemeinsam verwenden. Der Text endet mit einer Diskussion (Abschnitt 10) und sowie politisch relevanten Schlussfolgerungen und sich daraus ergebenden Fragen (Abschnitt 11).

## 2 Mikroskopische Simulation urbanen Verkehrs

Schon seit vielen Jahren finden mikroskopische Simulationen des Verkehrs von Städten und Regionen weltweit Anwendung. ‘Mikroskopisch’ bedeutet dabei, dass jede Person, jedes Fahrzeug, jede Kreuzung etc. durch einen synthetischen Avatar in der Simulation repräsentiert wird. Insbesondere bei den Personen handelt es sich dabei um synthetisch erzeugte Objekte, die nur im statistischen Mittel die Gesamtbevölkerung widerspiegeln. Jede synthetische Person erhält mindestens einen aktivitäten-basierten Tagesplan, z.B. “zu Hause – Arbeiten – Einkaufen – Freizeit – zu Hause”. Jede Aktivität enthält einen Ort und eine Uhrzeit, zu der sie beendet wird.<sup>1</sup> Aktivitäten an unterschiedlichen Orten werden durch Wege verbunden, die mit einem Verkehrsmittel durchgeführt werden. In der von uns

---

<sup>1</sup> Eine einfache Möglichkeit, solche Tagespläne zu erzeugen, besteht darin, sie aus Wegetagebüchern, wie in Deutschland z.B. SrV (System repräsentativer Verkehrsbefragungen, AHRENS ET AL., 2014) oder MiD (Mobilität in Deutschland, INFAS & DLR, 2010), zu übernehmen. In den Wegetagebüchern sind aus Datenschutzgründen die exakten Ortsangaben normalerweise durch relativ grobe Zonen ersetzt; es reicht oft, innerhalb der Zone einen Zufallspunkt zu wählen, wobei die Zufälligkeit optimalerweise durch die Flächennutzung (Strukturdaten) gewichtet wird.

verwendeten Software MATSim (Multi-Agent Transport Simulation, HORNI ET AL., 2016) sieht eine synthetische Bevölkerung mit solchen Tagesplänen in etwa wie folgt aus:

```
<population>
  <person id="1">
    <plan>
      <act type="home" x="5.0" y="8.0" end_time="08:00:00" />
      <leg mode="car" />
      <act type="work" x="1500.0" y="890.0" end_time="17:30:00" />
      <leg mode="car" />
      <act type="home" x="5.0" y="8.0" />
    </plan>
  </person>
  <person id="2">
    ...
  </person>
</population>
```

Im weiteren Verlauf der Simulation erzeugt MATSim die fehlenden Routen, und startet dann einen iterativen Prozess, der aus folgenden Schritten besteht:

1. Jede synthetische Person hat einen "ausgewählten" Plan (und vielleicht noch weitere, siehe unten).
2. **MobSim:** Eine Verkehrsfluss-Simulation, von uns auch oft MobSim = Mobilitätssimulation oder synthetische Realität genannt, führt für jede synthetische Person den ausgewählten Plan in der synthetischen Realität aus. Daraus ergeben sich z.B. Verkehrsstaus oder überfüllte Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs.
3. **Scoring:** Alle synthetischen Personen bewerten den daraus entstehenden simulierten Tag. Diese Bewertung entspricht meist einer ökonomischen Nutzenfunktion, und enthält positive Anteile für die Zeit, in der Aktivitäten durchgeführt werden, und negative Anteile für die Zeit, die im Verkehrssystem zugebracht werden. Falls es gewünscht ist, können z.B. die Effekte von Verkehrsstaus oder überfüllten Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs für jedes Individuum zusätzlich berücksichtigt werden.
4. **Replanning:** Allen synthetischen Personen wird die Möglichkeit gegeben, ihren ausgewählten Plan zu revidieren. Einige dieser erzeugen daraufhin neue Pläne, die z.B. eine andere Route, ein anderes Verkehrsmittel, andere Abfahrtszeiten, andere Aktivitätenorte oder andere Aktivitätenreihenfolgen enthalten. Diese neu

erzeugten Pläne werden dann “ausgewählt” im Sinne von Punkt 1; da sich die synthetischen Personen die vorher verwendeten Pläne weiterhin merken, entstehen so für jede synthetische Person mehrere Pläne/Alternativen. Diejenigen Personen, die sich in einer Iteration keinen neuen Plan ausdenken, wählen einen gut bewerteten vorhandenen Plan, oft mit einem Logit-Modell (z.B. BEN-AKIVA & LERMAN, 1985).

Anschließend kehrt die Simulation zu Schritt 2 zurück.

Die Iterationen werden beendet, wenn ein Großteil der synthetischen Bevölkerung nur noch selten bessere Alternativen entdeckt.

### 3 Integration von Robotaxis

Auf der Nachfrageseite ist die Integration von Robotaxis denkbar einfach; es wird einfach entweder schon zu Beginn oder in Schritt 4 das Verkehrsmittel (*mode*) auf *robotaxi* gesetzt. Auf der Angebotsseite ist es aufwändiger: Wenn in der Verkehrsfluss-Simulation, Schritt 2, eine synthetische Person ihre Aktivität beendet und als nächstes einen Weg per Robotaxi vorgesehen hat, so fordert sie an dieser Stelle das Robotaxi an, und wartet auf dessen Ankunft.<sup>2</sup> Eine Taxizentrale enthält die Anforderung des Robotaxis, wählt ein Fahrzeug aus, und schickt es zur Kundin. Das Robotaxi fährt zur Kundin, lässt diese einsteigen, fährt zum Fahrziel, und lässt die Kundin aussteigen. In der einfachsten Implementierung bleibt das Robotaxi dann an diesem Ort stehen, bis es von der Taxizentrale wieder angefordert wird.

### 4 Dispatch

Es stellt sich heraus, dass die Zuordnung von Fahrzeugen zu Kunden von zentraler Bedeutung für die Leistungsfähigkeit des Systems ist. Hier soll es zunächst um Fahrten mit höchstens einem Passagier gehen. Dabei wurden durch die Autoren unterschiedliche Algorithmen untersucht (MACIEJEWSKI & NAGEL, 2012, 2013a, 2013b); einige davon sind:

- **Räumlich nächstes freies Fahrzeug** – Hier wird bei einer neu hereinkommenden Fahrtanforderung unter den freien Fahrzeugen dasjenige ausgewählt, welches schnellstmöglich beim Kunden sein kann.

Dieser auf den ersten Blick plausible Algorithmus ist auf den zweiten Blick sehr schlecht unter hoher Belastung: Wenn gar keine freien Fahrzeuge mehr zur Verfügung stehen, dann kommen die hereinkommenden Anforderungen in eine Warteschlange, und werden in der Reihenfolge des Eingangs bearbeitet. Ein

---

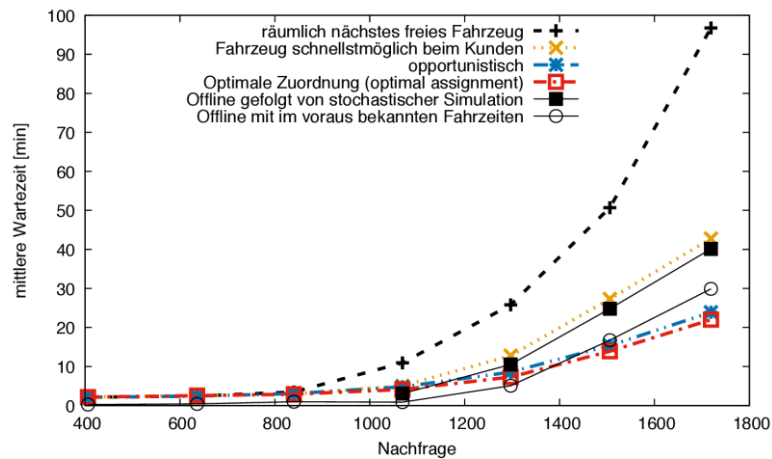
<sup>2</sup> Vorbestellungen wurden bisher nicht untersucht; siehe dazu Abschnitt 10.1

gerade freiwerdendes Fahrzeug wird dann einfach der ältesten noch nicht zugeordneten Anforderung zugeordnet, wobei es leicht passieren kann, dass sich beide an unterschiedlichen Enden des Bedienegebietes befinden, und somit lange Zugangswege gefahren werden müssen.

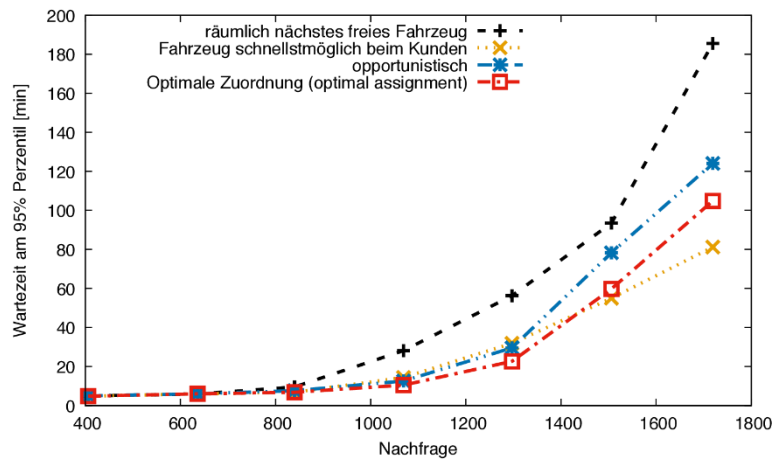
- **Fahrzeug schnellstmöglich beim Kunden** – Hier werden im Gegensatz zum letzten Algorithmus auch die besetzten Fahrzeuge einbezogen, sowie eine Vorhersage über deren zukünftiges Verhalten. So kann z.B. ein besetztes Fahrzeug bereits in der Nähe der Anforderung sein, und nur noch einen kurzen weiteren Weg zum Fahrziel des derzeitigen Passagiers haben. Die erwartete Ankunftszeit bei der neuen Anforderung ergibt sich also aus der erwarteten Fahrzeit zum derzeitigen Ziel, der erwarteten Zeit für den Bezahl- und Aussteigevorgang, und der erwarteten Fahrzeit von dort zur neuen Anfrage. Es wird das nach dieser Metrik nächste Fahrzeug der Anfrage zugeordnet. Neue Anfragen werden mit diesem Algorithmus in der Reihenfolge des Eingangs abgearbeitet; einmal erfolgte Zuordnungen zwischen Fahrzeug und Kundin sind dann fest.
- **Nächste Anforderung (= opportunistisch)** – Hier erfolgt die Sortierung nicht in der Reihenfolge der Anfragen, sondern in der Reihenfolge der frei werdenden Fahrzeuge: Jedes gerade freiwerdende Fahrzeug wird der nächsten unbedienten Anfrage zugeordnet.

Es ist offensichtlich, dass dieser Ansatz Zubringerfahrten reduziert und somit effizient ist, und andererseits bzgl. der Anforderungen potentiell unfair ist: Anforderungen aus Gebieten, in denen aktuell wenige Fahrten enden, werden erst dann wieder bedient, wenn alle anderen Anforderungen abgearbeitet sind.

- **Optimale Zuordnung (optimal assignment)** – Man kann versuchen, die Optimierung recht häufig neu zu rechnen, z.B. wenn Fahrzeuge frei werden oder neue Anfragen hereinkommen, aber auch, wenn Fahrten schneller oder langsamer ablaufen als ursprünglich geplant. Immer noch eine Heuristik, aber mit einem optimal lösbaren Teilproblem, ist hier die optimale Zuordnung aller Anforderungen zu allen Fahrzeugen. Dies lässt sich z.B. mit der so genannten ungarischen Methode (Kuhn, 1955) optimal lösen, wobei im Falle von weniger Fahrzeugen als Anforderungen die Fahrzeugseite mit “dummy vehicles”, und im Falle von weniger Anforderungen als Fahrzeugen die Anforderungsseite mit “dummy requests” aufgefüllt wird. Die Heuristik besteht hier insbesondere darin, dass im Falle hoher Nachfrage bei Fahrzeugen nur bis zum nächsten Kunden geplant wird und nicht weiter in die Zukunft. Alle unsere Versuche, hier mittels eines Mixed-Integer-Programms optimal weiter in die Zukunft zu planen, sind an zu hoher Rechenzeit gescheitert.



**Abbildung 1: Mittlere Wartezeit auf ein autonomes Fahrzeug/Taxi in einer Simulation mit verschiedenen Dispatch-Algorithmen als Funktion der Nachfrage. Man sieht, bei hoher Nachfrage, deutlich die hohen Wartezeiten von “räumlich nächstes freies Fahrzeug” sowie die im Mittel niedrigen Wartezeiten von “opportunistisch” sowie “optimal assignment”. Vgl. MACIEJEWSKI & NAGEL (2013a, 2013b); MACIEJEWSKI (2014a, 2014b).**



**Abbildung 2: 95% Perzentil der höchsten Wartezeiten. Man sieht deutlich, dass “opportunistisch”, obwohl im Mittel sehr leistungsfähig (Abbildung 1), gleichzeitig sehr unfair ist, indem es für 5% der Kunden sehr lange Wartezeiten erzeugt. Nur “räumlich nächstes freies Fahrzeug” ist noch schlechter, allerdings deswegen, weil die Wartezeiten unter hoher Belastung hier insgesamt sehr lang sind. Vgl. MACIEJEWSKI (2014a).**

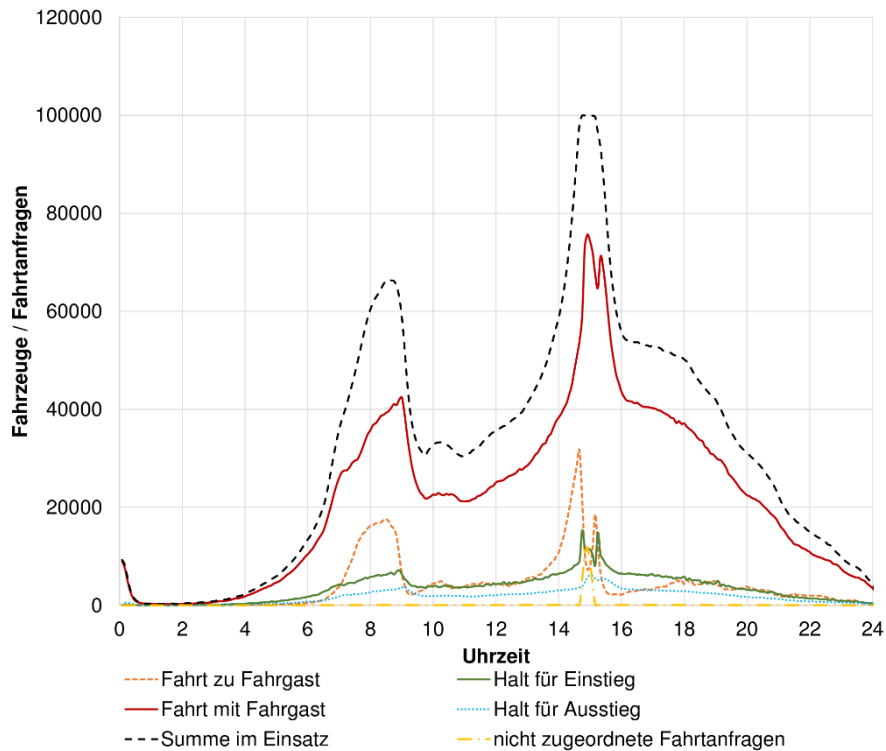
Bei niedriger Belastung sind alle diese Algorithmen ungefähr gleich gut (Abbildung 1); die Anfahrtszeit zu einem Kunden hängt im Mittel einfach von der Dichte der Fahrzeuge ab. Bei hoher Belastung ist, wie erwartet, der Ansatz "räumlich nächstes freies Fahrzeug" sehr ineffizient, akkumuliert schnell eine große Menge nicht abgearbeiteter Anfragen, und ist darum im Mittel sehr langsam. Der Ansatz "Fahrzeug schnellstmöglich beim Kunden" ist hier deutlich besser, aber noch besser ist hier der opportunistische Ansatz. Dies ist auch intuitiv nachvollziehbar, da letzterer die Leerfahrten zwischen den Kunden kurzhält, und somit für hohen Durchsatz sorgt. Dies wird damit erkauft, dass der Algorithmus potentiell unfair ist – Kunden werden nicht in der Reihenfolge ihrer Anforderungen abgearbeitet. "Optimale Zuordnung" ist hier nur noch leicht besser, woraus man ableiten kann, dass die opportunistische Heuristik schon recht gut ist.

Es ist an dieser Stelle von Interesse, wie so genannte Offline-Ansätze abschneiden, also wenn alle Anfragen bereits im Voraus bekannt sind. Hier ergibt sich das kuriose Resultat, dass diese zunächst *schlechter* abschneiden als die besseren der obigen Online-Ansätze. Der Grund ist, dass die Fahrzeiten in der Simulation stochastisch sind, und eine vorausberechnete feste Zuordnung darauf nicht reagiert. Nur wenn auch die Fahrzeiten im Voraus bekannt sind, kann ein Offline-Ansatz nochmal deutliche Gewinne bringen, benötigt aber für optimale Lösungen deutlich mehr Rechenzeit, als im Echtzeit-Betrieb verfügbar ist (MACIEJEWSKI, 2014b). Insgesamt ergibt sich daraus, dass als Reaktion auf die fluktuierenden Fahrzeiten ein Online-Ansatz auf jeden Fall sinnvoll ist, selbst wenn Anfragen im Voraus bekannt sein sollten, und dass der Algorithmus "optimale Zuordnung" bereits ein guter Benchmark ist.

Basierend auf den obigen Erkenntnissen wird im Folgenden weitgehend der Algorithmus "Fahrzeug schnellstmöglich beim Kunden" eingesetzt, außer bei zu hoher Nachfrage, wo zum opportunistischen Algorithmus übergegangen wird. Dabei wird von realitätsnahen Nachfrage-Kurven ausgegangen, so dass die hohe Nachfrage irgendwann endet, und bisher nicht bediente Kunden abgearbeitet werden können. Alternativ könnte man solche Anfragen seitens des Betreibers auch ablehnen, oder die Kunden könnten sich umentscheiden.

## 5 Ersatz privater Autos in Berlin durch eine Flotte autonomer Fahrzeuge

Eine mögliche Frage ist nun, wie ein urbanes System mit einer Flotte autonomer Fahrzeuge aussehen würde. Wir haben daher für ein bereits vorhandenes Berlin-Modell alle privaten Autofahrten innerhalb der Stadtgrenzen durch Robotaxi-Fahrten ersetzt (BISCHOFF & MACIEJEWSKI, 2016b). Fahrten von oder nach außerhalb der Stadtgrenzen werden weiterhin durch konventionelle Fahrzeuge durchgeführt. Hierzu wurden mehrere Simulationen mit unterschiedlich großen Fahrzeugflotten durchgeführt, wobei im weiteren eine Flotte von 100 000 Fahrzeugen betrachtet wird. Ferner wird in dieser Untersuchung davon ausgegangen, dass es *keine* weiteren Verkehrsmittelwahleffekte gibt.

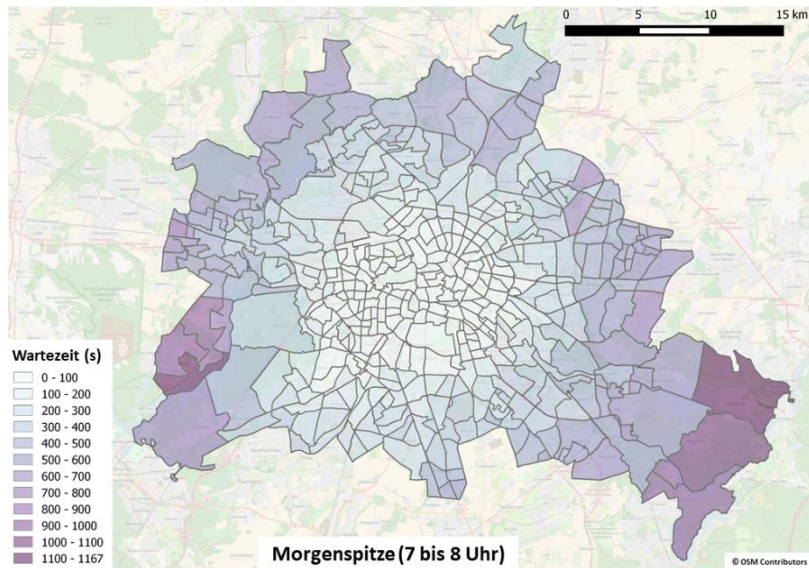


**Abbildung 3: Fahrzeugzustände in Abhängigkeit von der Tageszeit. Vgl. BISCHOFF & MACIEJEWSKI (2016b).**

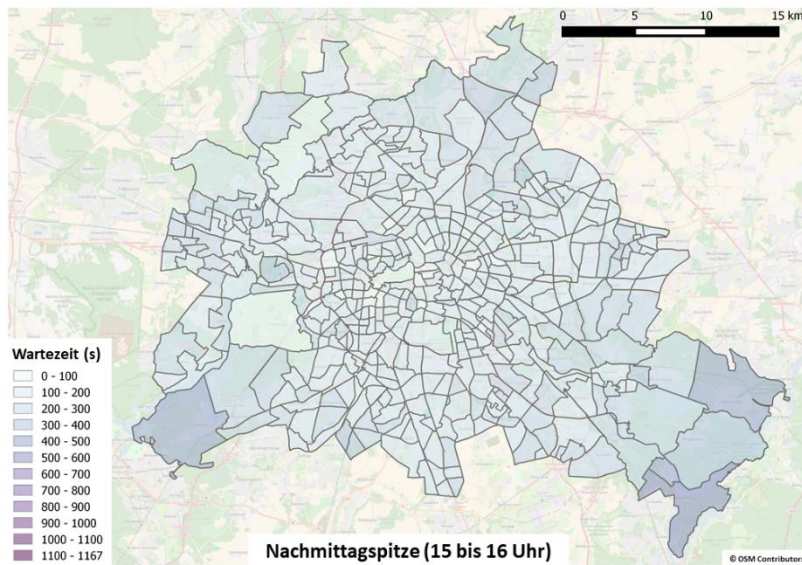
Abbildung 3 zeigt die unterschiedlichen Fahrzeugzustände als Funktion der Tageszeit. Zu jeder Zeit werden die Fahrzeuge in den unterschiedlichen Zuständen “Fahrt zu Fahrgast”, “Halt für Einstieg”, “Fahrt mit Fahrgast” oder “Halt für Ausstieg” angegeben. Die Summe dieser vier Zahlen ergibt die Anzahl der Fahrzeuge “im Einsatz”; alle weiteren Fahrzeuge sind unbeschäftigt. Zusätzlich wird gegen 15 Uhr die Anzahl nicht zugeordneter Anfragen wegen hoher Belastung angegeben. Aus der Belastung zu diesem Zeitpunkt (in Berlin höher als die Morgenspitze) ergibt sich die schlussendlich gewählte Anzahl von Fahrzeugen: Weniger Fahrzeuge führen zu deutlich längeren Wartezeiten; mehr Fahrzeuge führen zu deutlich höheren Kosten für Fahrzeuge ohne entsprechende Gewinne bei den Wartezeiten.

Es ist deutlich erkennbar, dass große Teile der Flotte während großer Teile des Tages nicht beschäftigt sind. Hier ergeben sich also weitere Potentiale, z.B. für den kleinräumigen urbanen Güterverkehr. Weiterhin würde die Flotte mit 100 000 Fahrzeugen die derzeitig ca. 1 Million privater Autos ersetzen, womit auch die entsprechenden Parkflächen für andere Zwecke zur Verfügung stehen könnten.





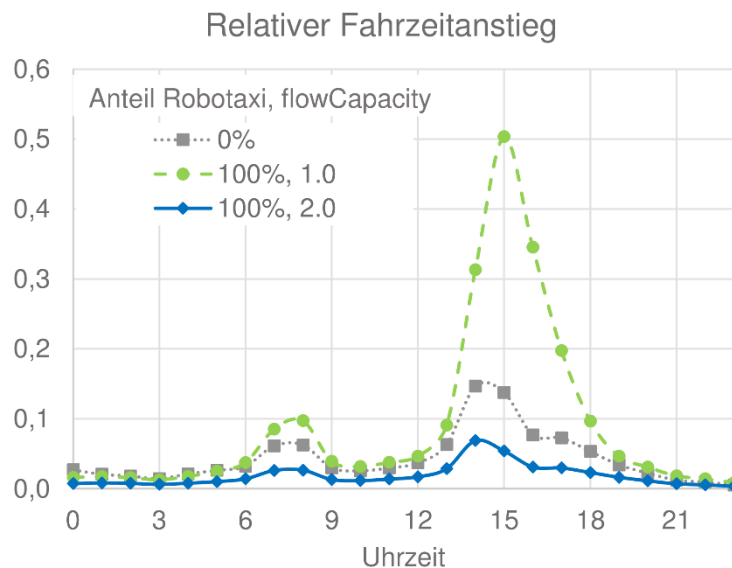
**Abbildung 4: Wartezeiten nach Abfahrtsort (morgens). Vgl. BISCHOFF & MACIEJEWSKI (2016a).**



**Abbildung 5: Wartezeiten nach Abfahrtsort (nachmittags). Vgl. BISCHOFF & MACIEJEWSKI (2016a).**

Abbildung 4 zeigt die resultierenden Wartezeiten in Berlin zwischen 7 und 8 Uhr morgens. In den Außenbezirken treten dabei deutlich erkennbar Wartezeiten von 15 Minuten und länger auf. Eine erste Welle von Fahrten in die Innenstadt hat hier bereits stattgefunden, so dass die meisten der freiwerdenden Fahrzeuge in der Innenstadt sind, und erstmal wieder in die Außenbezirke fahren müssen. Nachmittags ergibt sich *nicht* der gleiche Effekt (Abbildung 5) – in der Innenstadt gibt es immer viele freiwerdende Fahrzeuge, selbst während der Nachmittags-Spitze.

## 6 Staueffekte



**Abbildung 6: Relativer Fahrzeitanstieg im Abhängigkeit von der Tageszeit. Vgl. MACIEJEWSKI & BISCHOFF (2017).**

Das Szenario von Abschnitt 5 erzeugt unzweifelhaft zusätzliche Fahrzeugkilometer, da die Fahrzeuge neben den Passagierfahrten, die die gleiche Nachfrage befriedigen wie bisher private Autos, auch noch die Leerfahrten von einem Passagierausstieg zum nächsten Passagiereinstieg zurücklegen müssen. Im genannten Szenario betrug dieser Wert 13% mehr Fahrzeugkilometer durch die Flotte im Vergleich zu privatem Fahrzeugbesitz (BISCHOFF & MACIEJEWSKI, 2016a, Abschnitt 4.2). Durch diesen Mehrverkehr ergibt sich

zunächst ein sehr deutliches Anwachsen der relativen Zeitverluste zur Spitzenstunde von ca. 15% auf ca. 50% (Abbildung 6, vgl. MACIEJEWSKI & BISCHOFF, 2017).<sup>3</sup>

Es ist allerdings auch zu vermuten, dass autonome Fahrzeuge weniger Kapazität verbrauchen als konventionelle Fahrzeuge. Offenbar muss dieser Kapazitätsgewinn mindestens 13% betragen, um obigen Effekt auszugleichen. Abbildung 6 zeigt auch die Wirkungen eines möglichen Kapazitätsgewinnes von 50%. Unsere Simulationen enthalten nicht genügend Details der Fahrdynamik, um solche Aspekte endogen abbilden zu können; wir sind hier also auf Input von anderen Arbeitsgruppen angewiesen. Immerhin sei darauf hingewiesen, dass es sich hier nicht um eine rein technische Fragestellung handelt. Z.B. könnte man eine Nachrüstung konventioneller Fahrzeuge z.B. mit RFID (radio frequency identification) Transpondern erzwingen, die weniger als 100€ pro Fahrzeug kosten würde und durch die Hauptuntersuchung innerhalb weniger Jahren durchzusetzen wäre. Als Konsequenz könnten sich fahrerlose Fahrzeuge den konventionellen Fahrzeugen von hinten bis auf wenige Meter nähern. Neben der technischen Machbarkeit stellt sich hier also eher die Frage, ob diese Nachrüstung erzwungen werden sollte, und falls ja, ob Fahrzeugführende solch kurze Abstände im Rückspiegel akzeptabel fänden. Ähnliche Fragen stellen sich bzgl. der Integration von Fahrrädern und Fußgängern in ein solches System. Auch hier sei darauf hingewiesen, dass inzwischen viele Erwachsene ohnehin ein Smartphone mitführen, und die flächendeckende Ausrüstung von Kindern zumindest in den Vereinigten Staaten nicht völlig unwahrscheinlich zu sein scheint.<sup>4</sup>

Insgesamt erscheint die Annahme plausibel, dass mit fahrerlosen Fahrzeugen höhere Flusskapazitäten möglich sein werden. Eine gesellschaftliche Diskussion ist nötig, in welchem Umfang wir diese realisiert sehen wollen, und welche kulturellen Veränderungen wir dafür akzeptieren wollen.

## 7 Elektrifizierung

Simulationsresultate für die Elektrifizierung liegen uns nur für Simulationen der Berliner Taxiflotte vor (BISCHOFF & MACIEJEWSKI, 2014, 2015); sie dürften aber auf eine Flotte autonomer Fahrzeuge übertragbar sein, da die Betriebscharakteristika sehr ähnlich sind. Für die Elektrifizierung der Taxiflotte stellt sich heraus, dass eine Ausrüstung von ca. 350 der insgesamt knapp 450 Taxistände mit je zwei Schnellladesäulen (50 kW) den Bedarf deckt.

An dieser Stelle ist die Überlegung relevant, dass die Flotte eine bestimmte Menge an kWh pro Tag benötigt, und diese durch Ladestationen unterschiedlicher Leistung zur Verfügung gestellt werden kann. Es stellt sich aber heraus, dass die Preise von Ladestationen ungefähr

---

<sup>3</sup> Eine Zahl von 15% bedeutet hier, dass die Fahrten im Mittel 15% länger brauchen als im leeren Netz. Die Zahl ist hier relativ klein, weil die Simulation erhebliche Teile des Umlandes miteinbezieht.

<sup>4</sup> Vgl. <https://www.safewise.com/resources/wearable-gps-tracking-devices-for-kids-guide>.

proportional zur Ladeleistung sind, und somit die Wahl zwischen vielen langsamen und weniger, aber schnelleren Ladestationen besteht. Offenbar bietet Schnellladeinfrastruktur mehr Flexibilität, da, z.B. bei mehreren gleichzeitig leer eintreffenden Fahrzeugen, das erste Fahrzeug bereits nach 1/2 h wieder einsatzbereit ist. Aus diesem Grund wurde nur eine Ausstattung mit Schnellladesäulen untersucht, da diese bei gleichen Kosten eine höhere Flexibilität bieten. Weltweit gesehen wird zudem in Städten, in denen bereits heute eine nennenswerte Anzahl an Elektrotaxis verkehrt, auf den Einsatz von Schnellladesäulen gesetzt (ZOU ET AL., 2016).

Für die Simulationen wurde neben dem Dispatch für die Kunden (Abschnitt 4) nun ein Dispatch für die Ladesäulen hinzugefügt. Mehrere Ansätze wurden durchgespielt; eine recht einfache Heuristik ist, dass ein Fahrzeug, bei dem beim Aussteigen des Passagiers der Ladezustand unterhalb von 30% ist, eine geeignete Ladesäule mit kurzfristig verfügbaren Kapazitäten anfährt. Es stellt sich heraus, dass dies kein größeres Problem ist, weil ein Taxi in Berlin im Durchschnitt nur 150 km pro Tag zurücklegt; das ist i.a. sogar mit einer einzigen Ladung pro Tag zu schaffen. Bei den Berechnungen in Abschnitt 5 liegt die tägliche Fahrleistung eher bei 280 km, aber selbst hierfür haben wir ja schon in Abbildung 3 gesehen, dass die Flotte meistens nicht sehr stark ausgelastet ist und somit genügend Zeit für Ladevorgänge zur Verfügung steht. Insofern reicht es einfach aus, die nötige Ladekapazität räumlich verteilt in der Stadt zur Verfügung zu stellen.

Basierend auf diesen Überlegungen wurden mehrere Kostenszenarien durchgerechnet (BISCHOFF & MACIEJEWSKI, 2015). Das für Berlin schwierigste Szenario war eines mit erhöhter Belastung (z.B. wegen Messe) verbunden mit sehr kalten Tagesdurchschnittstemperaturen von unter  $-10$  Grad Celsius. Bei diesen Temperaturen halbiert sich wegen der kalten Batterien die Ladeleistung, gleichzeitig ist insgesamt die doppelte Leistung nötig, um auch noch die Fahrzeuge zu heizen, so dass sich ein insgesamt um einen Faktor vier erhöhter Bedarf an Ladestationen ergibt. Da dies für im Mittel wenige sehr kalte Tage pro Jahr übertrieben erscheint, empfiehlt sich stattdessen der Einsatz fossil betriebener Standheizungen, wie sie z.B. in Wohnwagen üblich sind. Perspektivisch könnte man z.B. auch die Fahrzeuge besser isolieren, oder die Batterien während der Fahrt und bis zum Laden warmhalten. In den aktuell auf dem Markt befindlichen Elektrofahrzeugen wurde zudem die Heizleistung durch den Einsatz von Wärmepumpen bereits erheblich verbessert. Klimatisierung während warmer Tage wurde auch berücksichtigt, stellte sich aber in Berlin als geringeres Problem heraus als das Heizen. Für andere geographische Regionen mag dies anders sein.

Aus solchen Überlegungen ergibt sich schlussendlich Tabelle 1. Dabei schließen die Energiekosten den Betrieb aller Aggregate einschl. Heizung und Klimaanlage ein, außerdem bei den Elektrofahrzeugen die anteiligen Kosten für die Ladesäulen. Für die Ersatzbatterie wurde angenommen, dass eine Batterie frühestens nach 100 000 km ausgetauscht wird. Als Resultat stellt man fest, dass für den hier diskutierten Anwendungsfall die jährlichen Betriebskosten für batterieelektrische bzw. hybrid-elektrische Fahrzeuge in etwa gleich hoch sind. Sicher gibt es andere Rechnungen, die zu anderen Werten führen. Schlussendlich ist aber zu vermuten, dass sowohl Strompreis als

auch Batteriepreise weiter fallen werden, so dass der ungefähre Gleichstand in den Kosten sich eher noch zugunsten der batterie-elektrischen Fahrzeuge verschieben dürfte.

	BEV	HEV
Fahrleistung [km/Jahr]	75 000	75 000
Energiekosten [€/Jahr]	4 620	6 390
Ersatzbatterie [€/Jahr]	2 500	0
Motorwartung [€/Jahr]	150	1 000
<b>Summe [€/Jahr]</b>	<b>7 270</b>	<b>7 390</b>

**Tabelle 1: Jährliche Betriebskosten eines batterieelektrischen Fahrzeugs (BEV) und eines hybrid-elektrischen Fahrzeugs (HEV). Vgl. BISCHOFF & MACIEJEWSKI (2015).**

Insgesamt ist also zu erwarten, dass die Betriebskosten einer batterieelektrisch motorisierten Flotte eher niedriger sein werden als die der bisherigen fossil angetriebenen Flotte. Es verblieben die Investitionskosten der Umstellung. Da aber die Investitionskosten für die Ladestationen bereits in der Kalkulation enthalten sind, handelt es sich nur um die Kosten für die Neufahrzeuge. Da der Preis für die Batterie auch bereits in obiger Kalkulation enthalten ist, verbleibt der Preis für ein solches Auto minus den Batteriepreis. Es ist zu erwarten, dass dieser unterhalb der Preise für fossile Fahrzeuge liegt, so dass dieser Ersatz des Fahrzeugparkes aus den ohnehin notwendigen Ersatzinvestitionen bestritten werden könnte.

Somit ergibt sich insgesamt das Bild, dass sowohl die Berliner Taxiflotte als auch eine potentielle Flotte für den gesamten innerstädtischen Autoverkehr, zu vermutlich niedrigeren Kosten als bisher, elektrisch betrieben werden könnten. Zugegebenermaßen geht diese Betrachtung davon aus, dass die nötigen Rohstoffe, z.B. Lithium für die Batterien, in den nötigen Mengen zu den bisherigen Preisen beschafft werden können; weiterhin werden z.B. Sozial- oder Umweltstandards ausgeblendet. Beides liegt außerhalb unserer Expertise. Zumindest wollen wir aber darauf hinweisen, dass auch fossile Brennstoffe oft aus Ländern mit niedrigeren Sozial- oder Umweltstandards importiert werden.

## 8 Sammeltaxis

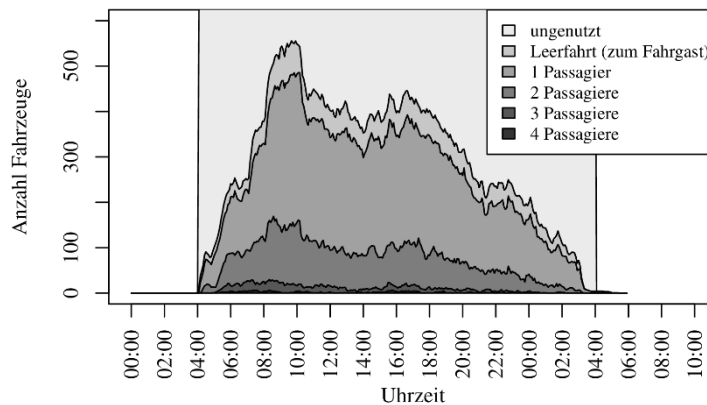
Bisher wurden Fahrten mit maximal einem Passagier pro Fahrzeug betrachtet. Im Rahmen unserer Simulationen kann man sich dem Thema Sammeltaxis über einen Algorithmus nähern, wie er z.B. von UberPool (UBER, 2017) verwendet wird: Das Einfügen eines weiteren Passagiers in eine schon vorhandene Fahrt wird akzeptiert, wenn für keinen der Passagiere deren Fahrt dadurch länger wird als

$$\alpha \times t_{single} + \beta, \quad (1)$$

wobei  $t_{single}$  die Reisezeit als Einzelpassagier ist. Typische Werte sind  $\alpha=1,7$  und  $\beta=2min$ ; wenn also z.B. die Reisezeit als Einzelpassagier 10 min beträgt, dann darf die Reisezeit durch andere Passagiere nicht größer werden als

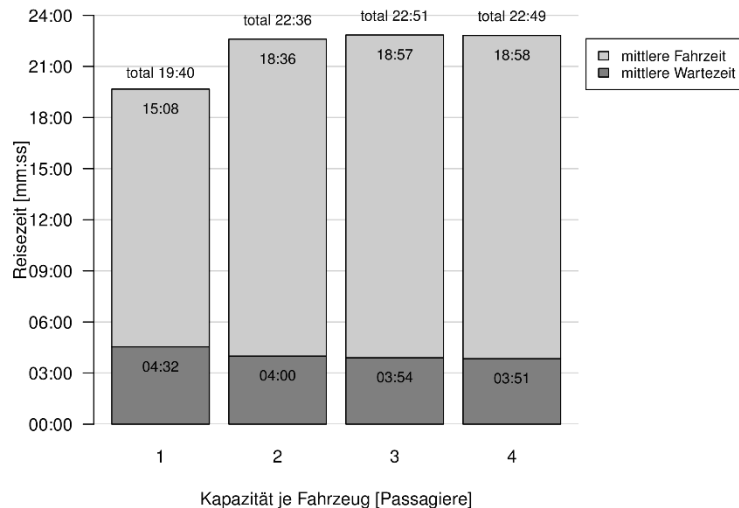
$$1,7 \times 10 \text{ min} + 2 \text{ min} = 19 \text{ min} . \quad (2)$$

Die Simulation entsprechend Abschnitt 5 kann dann also weiterhin voranschreiten, aber im Dispatch entsprechend Abschnitt 4 werden auch bereits zugeordnete Fahrzeuge einbezogen, solange sie für jeden bereits zugeordneten Passagier immer noch Bedingung (1) erfüllen. Dieser Sammeltaxi-Algorithmus wird in BISCHOFF ET AL. (2017) näher beleuchtet und auf einen Datensatz mit Taxifahrten an einem Werktag in Berlin angewendet. Aus dieser Studie stammen die folgenden Abbildungen in diesem Kapitel.



**Abbildung 7: Besetzungsgrad (Kapazität 4 Personen pro Fahrzeug,  $\alpha=1.7$  und  $\beta=2min$ ). Vgl. BISCHOFF ET AL. (2017).**

Dabei ergeben sich typischerweise Verläufe wie in Abbildung 7. Es ist erkennbar, dass zu jedem Zeitpunkt ca. 40% der Fahrzeuge mit Passagier mehr als einen Passagier an Bord haben. Man sieht aber auch, dass dies meist nur zwei Passagiere sind; drei oder mehr kommen selten vor, auch wenn man gar keine Sitzbegrenzung in den Fahrzeugen annimmt. Dies entspricht Resultaten wie z.B. von KNAPEN ET AL. (2013), welche besagen, dass Fahrgemeinschaften für beliebige Punkt-zu-Punkt Verbindungen nur schwierig zu finden sind, wenn man nicht allzu lange Umwege oder zeitliche Abweichungen in Kauf nehmen will.



**Abbildung 8: Warte- und Fahrzeiten der Sammeltaxis ( $\alpha=1.7$  und  $\beta=2min$ ).**  
**Vgl. BISCHOFF ET AL. (2017).**

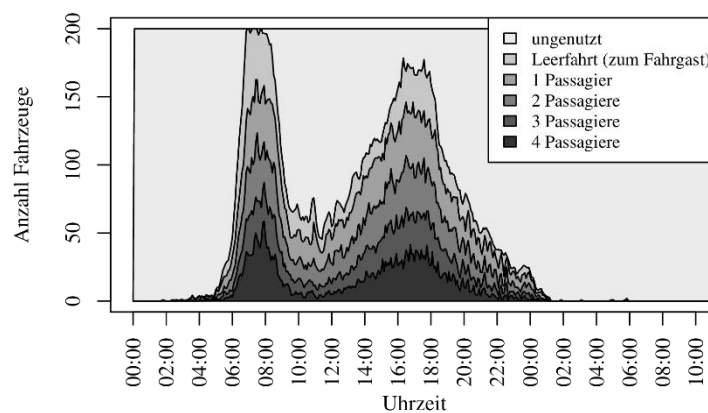
Für das Berlin-Szenario steigt die mittlere Reisezeit (Abbildung 8) von ca. 20 auf ca. 23 Minuten an. Der Anteil geteilter Fahrten (mindestens ein weiterer Fahrgast auf einer Teilstrecke) beträgt 61% im Szenario mit 4 Plätzen je Sammeltaxi. Tendenziell werden eher längere als kürzere Fahrten geteilt, weil auf längeren Fahrten mit einer größeren Wahrscheinlichkeit eine Fahrtenbündelung möglich ist. Betrachtet man nur Fahrten mit einer direkten Distanz (ohne Umwege zur Fahrtenbündelung) von 2 bis 5 km, dann beträgt die Summe aus Warte- und Fahrzeit bei den ungeteilten Fahrten im Mittel knapp 10 min und bei den geteilten rund 14 min, wobei lt. Gleichung 1 bis zu 19 min zulässig sind. Den tatsächlichen Wert erfährt der Fahrgast erst nach der Bestellung, muss also entsprechend großzügig planen. Ob dies insgesamt attraktiv ist, mag jeder selbst entscheiden. Immerhin sinkt die Fahrleistung der Fahrzeuge damit selbst einschließlich der Leerfahrten auf ein Niveau unterhalb des derzeitigen Niveaus mit privaten Fahrzeugen, so dass ein solcher Ansatz auch ohne Kapazitätsgewinne durchführbar wäre. Für Betreiber ist das Anbieten von Sammeltaxifahrten im Punkt-zu-Punkt-Verkehr vermutlich nur innerhalb des Stadtzentrums rentabel (BISCHOFF ET AL., 2018b), hier werden in der Simulation auch mit Abstand die meisten Fahrten geteilt.

## 9 Sammeltaxis als Ersatz für herkömmlichen ÖPNV

Aufgrund der bisherigen Überlegungen liegt es nahe, auch darüber nachzudenken, im öffentlichen Verkehr potentiell schlecht ausgelastete Busse durch Robotaxis zu ersetzen. Allerdings ist im öffentlichen Verkehr die Komplexität höher als bei den bisher

beschriebenen Studien, so dass wir noch nicht so weit sind. Zwei Anhaltspunkte ergeben sich aus den folgenden zwei Studien, bei denen die Verkehrsmittelwahl fix war, das heißt nur bisherige Nutzer des ÖPNV konnten Sammeltaxis und ggf. den verbleibenden konventionellen ÖPNV nutzen.

### 9.1 ZU- UND ABGANG MASSENVERKEHRSSYSTEME



**Abbildung 9: Besetzungsgrad in der Last-Mile-Studie. Vgl. LEICH & BISCHOFF (2018).**

LEICH (2017) hat eine Studie durchgeführt, bei der für ein gut abgrenzbares Untersuchungsgebiet im Nordwesten von Berlin (im Bereich Heiligensee) das derzeitige Busangebot durch unterschiedliche Konstellationen von Sammeltaxis ersetzt wurde (siehe auch LEICH & BISCHOFF, 2018). Die Busse führen hauptsächlich Zugangs- und Abgangsfahrten nach Tegel durch, entweder zu den U-/S-Bahnstationen dort, oder zum Ortskern selber. Im Sinne unserer Simulation wurde neben den bisherigen ÖV-Router, welcher ÖV-Routen mit Zu- und Abgang zu Fuß generiert, ein weiterer gestellt, welcher ÖV-Routen mit Zu- und Abgang mit Sammeltaxis vorsieht.

Die Bündelung gelingt hier besser (Abbildung 9): Knapp 96 % aller Fahrten sind geteilt und 80% der besetzten Fahrzeuge haben mindestens 2 Passagiere, und immerhin 50% drei oder mehr. Eine mögliche Ursache für die bessere Bündelung ist die Konzentration der Nachfrage in einem kleinen Gebiet am Rand des Untersuchungsraums, dem Zentrum von Tegel, wo sich die wichtigsten Umstiegsmöglichkeiten zur U- und S-Bahn sowie Schulen und Einkaufszentren befinden. Dagegen konzentriert sich die Taxinachfrage in BISCHOFF ET AL. (2017) zwar zum Teil am Flughafen Tegel, jedoch ist diese Konzentration deutlich schwächer ausgeprägt. Zudem ist die Taxinachfrage deutlich dünner, es gibt also weniger Nachfrage pro Flächen- und Zeiteinheit, als in LEICH (2017), wo alle ÖPNV-Nutzer im Untersuchungsgebiet die Sammeltaxis nutzen konnten.



Bzgl. der Kosten wurden in LEICH (2017) hypothetisch fahrerlose Linienbusse mit hypothetisch fahrerlosen Minibussen verglichen; für alle untersuchten Konfigurationen sind die Linienbusse leicht bis deutlich preiswerter. Offenbar gelingt es dem Betreiber, einen hohen Auslastungsgrad der Linienbusse zu erreichen.

Bzgl. der Fahrzeiten ergibt sich ein komplexes Bild. Die reinen Fahrzeiten steigen leicht, was sich durch die (zusätzlichen) Fahrten von und zu den Haustüren und durch die Umwege zur Bedienung anderer Fahrtwünsche durch das gleiche geteilte Robotaxi erklärt. Hingegen gehen die Gehzeiten durch den Haustürbetrieb deutlich zurück. Insgesamt gehen die Gesamtfahrzeiten nur leicht, durchschnittlich um 100 Sekunden pro Fahrt, zurück. Dies erklärt sich durch Wartezeiten von ca. 400 Sekunden pro Sammeltaxi-Fahrt, die dadurch entstehen, dass der Sammeltaxi-Algorithmus die Anzahl der beteiligten Fahrzeuge niedrig hält, anstatt freie Fahrzeuge in bessere Bedienung zu investieren. Es stellt sich aber auch die Frage, ob Wartezeit am Wohnort vielleicht weniger stark negativ bewertet werden sollte als Wartezeit an den Haltepunkten.

## 9.2 VOLLSTÄNDIGER ERSATZ DES FAHRPLANGEBUNDENEN ÖFFENTLICHEN VERKEHRS IN EINER MITTELGROßEN STADT

FÜHRER (2018); BISCHOFF ET AL. (2018a) haben ähnliches für eine Simulation von Cottbus durchgeführt, wobei der gesamte ÖPNV (überwiegend Busse und Straßenbahnen) durch unterschiedliche Konstellationen von Sammeltaxis ersetzt wurden. Die Arbeit zeigt, dass ein Verzicht auf einen Haustürservice und stattdessen Bedienung an den bisherigen Haltepunkten zu erheblich geringeren Kosten führt. Allerdings sinkt dann auch der Nutzen deutlich, da durch Laufwege von und zu Haltestellen die Wegdauern ansteigen. Basierend auf einer Abschätzung von Kosten für das konventionelle Angebot erscheint es, dass Sammeltaxis bei Bedienung an den bisherigen Haltepunkten weniger Kosten erzeugen als das konventionelle Angebot, im Haustürbetrieb aber nicht. Diese Rechnung enthält beim konventionellen Angebot die Lohnkosten für die Fahrer, wohingegen diese im Sammeltaxibetrieb entfallen. Dies basiert auf der Annahme, dass eine Automatisierung eines herkömmlichen ÖPNV-Fuhrparks auch auf absehbare Zeit nicht erfolgt. Die Resultate sind nicht direkt mit der Arbeit von LEICH (2017) vergleichbar, da z.B. Auslastungsgrade und Anschlusswartezeiten in Cottbus deutlich anders sind als in Berlin und der herkömmliche ÖPNV vollständig entfernt wurde, sodass keine Wartezeiten auf Anschlusszüge anfallen.

## 9.3 IMPLIKATIONEN FÜR DEN ÖPNV

Es gibt weitere Studien von anderen Arbeitsgruppen. Z.B. hat ISV (2016, S. 42f.) den Ersatz aller Pkws und aller konventionellen Linienbusse in der Region Stuttgart durch autonome Fahrzeuge mit 6 Sitzplätzen mit einem anderen Simulationsmodell untersucht. Im am besten zu vergleichenden Szenario, dem mit 100 % geteilten autonomen Fahrzeugen und unverändert weiter betriebenen schienengebundenen ÖPNV (Szenario 2), sind bei über der Hälfte der Abfahrten zwischen 6:00 und 19:00 Uhr alle 6 Plätze des Fahrzeugs besetzt,

es wird somit offenbar eine große Bündelung erreicht. Diese Studie unterscheidet sich vielen Hinsichten von unseren, z.B. durch die Kombination von MIV- und ÖPNV-Nachfrage zu einer größeren kombinierten Nachfrage, einer a priori Bündelung der Nachfrage auf Verkehrszellen und 15-Minuten-Intervalle, oder einen anderen Fahrtenbündelungs- und Umlaufplanungsalgorithmus.

Von den Autoren wurden bisher noch keine Verkehrsmittelwahleffekte durch das mögliche Angebot von fahrerlosen Sammeltaxis in Konkurrenz zum ÖPNV untersucht. HÖRL ET AL. (2018) gehen in ihrer Studie für Zürich davon aus, dass der Preis einer Sammeltaxifahrt in etwa den Vollkosten der Pkw-Nutzung entsprechen, jedoch deutlich über den subventionierten Preisen des ÖPNV liegen wird. Insofern wären Sammeltaxis preislich nur zu konventionellen Taxis und Pkw konkurrenzfähig. Während FÜHRER (2018) für Cottbus eine Reduktion der Reisezeit um ein Drittel für Haltestellenbetrieb bzw. um mehr als die Hälfte für Haustürbedienung berechnet hat, fiel der Reisezeitgewinn in der Last-Mile-Studie von LEICH (2017) trotz Haustürbedienung eher gering aus. Autonome Sammeltaxis bieten also nicht per se immer große Reisezeitgewinne, zudem können die Betreiber über verschiedene Flottengrößen und Dispatch-Algorithmen das angebotene Serviceniveau variieren. Trotzdem nennen heutige Ridesharing-Kunden in einer Umfrage von CLEWLOW & MISHRA (2017) zu hohe Reisezeiten als wichtigsten Grund für die Nutzung von Ridesharing-Dienstleistern anstelle des ÖPNV.

Insgesamt ergibt sich, natürlich nicht ganz unerwartet, dass die Bewertung von Sammeltaxis als Ersatz oder Ergänzung des bisherigen Systems des öffentlichen Verkehrs komplexer ist als beim System Auto. Eine zu diskutierende Frage ist, ob man die durch den potentiellen Wegfall des Fahrers eingesparten Kosten lieber in reduzierte Preise/Subventionen oder in verbesserte Bedienqualität investieren will. Falls letzteres gewünscht ist, so lassen sich Verbesserungen vor allem in Gegenden erreichen, wo die bisherigen Linienbusse selbst zur Hauptverkehrszeit nicht voll ausgelastet sind. Weiterhin muss ein Gleichgewicht zwischen Pooling auf der einen Seite, und dadurch verlängerte Fahrzeiten auf der anderen Seite gefunden werden. Möglicherweise sollte auf Haustürbedienung während der Hauptverkehrszeit verzichtet werden. Hier ergibt sich für uns derzeit noch kein verallgemeinerbares Bild; stattdessen sollten weitere Szenarien für unterschiedliche Regionen durchgerechnet werden.

## 10 Diskussion

### 10.1 BETREIBERMODELLE, VORBESTELLUNGEN, UND PREISE

Es sollte deutlich geworden sein, dass zur Beurteilung von Varianten die Betreibermodelle genau spezifiziert sein müssen. Unsere Simulation geht derzeit davon aus, dass Reisende bei Beendigung ihrer Aktivität eine Art Knopf drücken, worauf sich dann ein Robotaxi in Bewegung setzt. Im Berliner Taxisystem erweist sich dies als weitgehend ausreichend; Wartezeiten von mehr als ca. 5 Minuten sind selten, und rechtfertigen nicht den Aufwand von Vorbestellungen, zumal diese typischerweise auch nicht ohne gelegentliche Fehler

abgewickelt werden. Im dünn besiedelten Raum hingegen wird es ohne Vorbestellungen nicht gehen, da ansonsten selbst das nächste verfügbare Fahrzeug zu weit weg sein wird. Vorbestellungen werden endgültig notwendig, wenn eine bestimmte Ankunftszeit, z.B. für einen Arbeitsbeginn oder eine Zugabfahrt, eingehalten werden soll: Hier muss ein Betreiber zu spät hereinkommende Anfragen auf jeden Fall ablehnen, woraus sich eine Mindestvorbestellzeit ergibt. Ansonsten ergibt sich die Möglichkeit der Ablehnung eher aus dem Bedienkonzept: will man lieber die Anzahl der Fahrzeuge knapphalten und dafür bestimmte Anfragen ablehnen, oder garantiert man die Bedienung aller Anfragen und hat dafür eine größere Flotte? Weiterhin könnte man preislich differenzieren, z.B. quasi sofortige Abholung für einen höheren Preis vs. Abholung "wenn es am Weg liegt" zu einem niedrigeren Preis.

BÖSCH ET AL. (2018) haben die Kostenstrukturen von autonomen Fahrzeugen untersucht und gehen in urbanen Gebieten von nur geringen Kostenvorteilen geteilter Fahrzeuge (Ridesharing sowie Carsharing) gegenüber ungeteilten autonomen Fahrzeugen in Privatbesitz aus, da sie bei geteilten fahrerlosen Fahrzeugen von hohen Overhead- und Reinigungskosten ausgehen. Nur in ländlichen Räumen erwarten sie deutlich niedrigere Preise für geteilte Fahrzeuge, die jedoch immer noch über den variablen Kosten eines Pkw in Privatbesitz liegen würden.

Insofern bleibt abzuwarten, wie viele Menschen tatsächlich kein eigenes Auto mehr besitzen werden und welchen Modal Split Betreiber autonomer Flotten erreichen werden. Falls der Modal Split letzterer gering ausfällt, könnte es schwierig sein, eine ausreichend große Flotte zu finanzieren, um auch in Gebieten mit schwacher Nachfrage ein attraktives Angebot zu gewährleisten.

## 10.2 PREEMPTIVES VERLEGEN DER FAHRZEUGE

Betreiber können Fahrzeuge dort stehen lassen, wo der letzte Passagier ausgestiegen ist; sie können aber auch "auf Verdacht" dorthin fahren, wo in der Vergangenheit eine starke Nachfrage war. Dies ist z.B. im Berufsverkehr sinnvoll. In diesem Zusammenhang wird auch immer mal wieder die Frage gestellt, ob leere Fahrzeuge "cruisen" sollten, so wie es Taxifahrer auf der Suche nach Kunden machen. Unsere Intuition ist, dass dies nur dann sinnvoll ist, wenn die Anforderung nicht-elektronisch (also z.B. durch Winken) erfolgen soll. Bei Anforderung durch Smartphone oder ähnlich ist mit dem preemptiven Verlegen eines Fahrzeuges bereits das Optimum erreicht; jede weitere Fahrzeugbewegung erzeugt nur Kosten, ohne den mittleren Abstand zum nächsten Kunden zu verkleinern.

Von den Autoren wurden bereits erste Rebalancing-Strategien für geteilte (Sammel-)Taxis implementiert, jedoch noch nicht publiziert. Für ungeteilte Taxis haben HÖRL ET AL. (2017) in MATSim bereits verschiedene Dispatch- und Rebalancing-Strategien untersucht und in einem Zürich-Modell angewendet. Um eine mittlere Wartezeit von 5 min zur Hauptverkehrszeit zu erreichen, sind ohne Rebalancing 10 000 Fahrzeuge nötig, während es mit Rebalancing nur 8 700 sind. Dafür sind jedoch zusätzliche Leerfahrten nötig, die zu einem Anstieg der gefahrenen Kilometer in der Größenordnung von 10 % bis 15 % und

damit zu höheren Kosten führen. Es zeigte sich, dass im untersuchten Zürich-Modell für eine angestrebte mittlere Wartezeit unter 5 min der Einsatz einer Rebalancingstrategie zu geringeren Kosten je Passagierkilometer führt, während es für ein niedrigeres Serviceniveau mit mittleren Wartezeiten über 5 min günstiger ist, kein Rebalancing durchzuführen (und eine entsprechend größere Flotte vorzuhalten).

### 10.3 INDUZierter VERKEHR UND REGULIERUNG

Es steht zu erwarten, dass solche Systeme sehr attraktiv sind, und daher zusätzliche Wege erzeugen. Unserem Eindruck nach noch wichtiger dürften Verkehrsmittelwahl-Reaktionen sein: Personen, die von zu Fuß, vom Fahrrad oder vom konventionellen öffentlichen Verkehr auf eine autonome Flotte wechseln. Wenn man alle Argumente dieses Textes – einschließlich der zu erwartenden Kapazitätserhöhung – zusammennimmt, dann kann man durchaus damit rechnen, dass wir dann doppelt so viele fahrende automobile Fahrzeuge auf den urbanen Straßen haben werden wie jetzt. Im Extremfall werden Lichtsignalanlagen an den Kreuzungen nicht mehr nötig sein, so dass der Verkehrsfluss auch nicht mehr durch diese unterbrochen wird. Hier stellt sich dann die Frage, ob wir als Gesellschaft dies wollen. Falls nicht, so müssten wir eingreifen, z.B. durch Maut, oder regulativ, z.B. durch eine restriktive Lizenzvergabe. Eine Möglichkeit wäre ein Verbot privater Autos, zusammen mit einer Lizenzvergabe an wenige Betreiber, verbunden mit der Auflage, auch die dünn besiedelten Randbezirke zu bestimmten Standards zu versorgen. Dies wäre analog zu Modellen z.B. im Telekommunikationsbereich.

### 10.4 MÖGLICHE ÜBERGANGSSZENARIEN

Wir simulieren vor allem Szenarien, bei denen angenommen wird, dass eine Umstellung bereits stattgefunden hat. Natürlich ist es sinnvoll, über Übergangsszenarien auf dem Weg dorthin nachzudenken. Generell würden wir erwarten, dass sich autonome Fahrzeuge aus (mindestens) drei Richtungen etablieren:

**Szenario “Kalifornische Autobahn”** Autobahnen sind weniger komplex als Stadtverkehr, und im Vergleich zu Landstraßen auch relativ sicher. Es ist mit einem geeigneten Auto bereits jetzt möglich, das Lenkrad loszulassen, auch wenn die Verantwortung derzeit noch beim Fahrer liegt. Eventuell noch problematische Bereiche können vermutlich durch ein Nachziehen der Fahrbahnmarkierungen oder notfalls durch ein paar elektronische Baken entschärft werden.

**Szenario “Flotte im Stadtverkehr”** Dies entspricht dem in diesem Beitrag hauptsächlich diskutierten Szenario: Eine Flotte autonom fahrender Fahrzeuge im urbanen Bereich, die entweder ergänzend zu konventionellen Fahrzeugen agiert, oder diese ersetzt.

**Szenario “Ländlicher Verkehr”** Als drittes Szenario könnte man sich ein Verkehrssystem vorstellen, welches den ländlichen Raum bedient. Hier würden die autonomen Fahrzeuge selten und oft recht leer fahrende Busse ersetzen.

Für jedes dieser Szenarien wären andere Fahrzeugtypen sinnvoll: für die “kalifornische Autobahn” vielleicht Fahrzeuge, die den heutigen ähneln, für die “Flotte im Stadtverkehr” vermutlich für niedrigere Geschwindigkeiten ausgelegte und somit deutlich leichtere Fahrzeuge als heutige Pkws, und für den “ländlichen Verkehr” vielleicht Fahrzeuge, die auch größere Gruppen und/oder Lasten transportieren können.

Zudem sind auch Übergangsvarianten vorstellbar, z.B. eine Variante des derzeitigen free floating car sharing, bei dem ein fahrerloses Fahrzeug zunächst recht langsam zum Kunden fährt, der Kunde es dann selbst mit normaler Geschwindigkeit zu seinem Ziel fährt und dort aussteigt, woraufhin das Fahrzeug sich dann wieder mit niedriger Geschwindigkeit einen Parkplatz sucht oder zum nächsten Kunden fährt. Ein solcher Ansatz hätte den Vorteil, dass solche Fahrzeuge den fahrerlosen Betrieb zunächst nur mit niedrigen Geschwindigkeiten durchführen würden.

Während manche Befürworter autonomer Fahrzeuge vorhersagen, dass fahrerlose Autos ab 2030 bezahlbar und (technisch) geeignet genug sein werden, um die meisten von Menschen gesteuerten Autos ersetzen, erwartet LITMAN (2018) einen deutlich langsameren Übergang. Zunächst blieben autonome Fahrzeuge in den 2020er und möglicherweise 2030er Jahren teuer und ungeeignet für schlechte Wetter- und Straßenverhältnisse. Erst ab den späten 2030er und 2040er Jahren würden sie für die Mittelklasse erschwinglich werden. In der langen Übergangszeit mit einem Parallelbetrieb manuell und autonom gesteuerter Fahrzeuge ließen sich viele erwartete Vorteile autonomer Fahrzeuge insbesondere im Bereich Straßenkapazität nicht realisieren. Robotaxi- und Sammeltaxifahrerdienste, wie wir sie in den vorhergehenden Kapiteln betrachtet haben, könnten ab den 2020er und 2030er Jahren in vielen Ballungsräumen angeboten werden. Aufgrund des fehlenden Fahrers würden Vandalismus und Verschmutzung durch Fahrgäste jedoch zu recht geringer Servicequalität führen, sodass der Modal Split dieser geteilten Fahrzeuge recht gering bliebe und viele Haushalte weiterhin private Pkw anschaffen würden.

## 11 Schlussfolgerungen

Insgesamt ergibt sich eine durchaus komplexe Situation. Für Berlin ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

1. Eine Umstellung des gesamten privaten Autoverkehrs innerhalb der Stadtgrenzen auf eine Flotte autonomer Fahrzeuge (mit zunächst einem Passagier pro Fahrzeug) wäre verkehrlich möglich.
2. Diese Fahrzeuge würden unzweifelhaft mehr Fahrleistung erbringen, da neben den Passagierfahrten die Leerfahrten von einem Passagierausstieg zum nächsten Passagiereinstieg hinzukommen. In unserem Szenario beträgt dieser Anstieg 13%.
3. Die Literatur geht davon aus, dass sich durch autonome Fahrzeuge zusätzliche Kapazität für den Verkehrsfluss ergibt. Dieser Anstieg müsste offenbar mindestens 13% betragen, um den Effekt von Punkt 2 auszugleichen. Dies setzt

somit auch einem von menschlichen Fahrern betriebenen (also nicht autonom fahrenden) Flottensystem Grenzen.

4. Eine mögliche Elektrifizierung einer solchen Flotte ist im Betrieb im Vergleich zur heutigen fossilen Antriebstechnik mindestens kostenneutral und könnte somit bereits zu heutigen Preisen durchgeführt werden.
5. Die Verwendung von autonomen Fahrzeugen für den Zugang zu und Abgang von Massenverkehrssystemen scheint plausibel, insbesondere dort, wo die Nachfrage nicht ausreicht, konventionelle Busse zu füllen.

Folgende Fragen sollten politisch diskutiert werden:

- Wollen wir die zu erwartende deutliche Erhöhung der Zahl der fahrenden Fahrzeuge im urbanen Bereich?
- Was machen wir mit den frei werdenden Parkflächen?
- Wollen wir entweder sehr niedrige Preise oder hoch profitable Anbieter im urbanen Kern bei gleichzeitiger Subvention entsprechender Angebote im ländlichen Raum, oder eher eine implizite Quersubvention durch entsprechende Lizenzvergabe?
- Wollen wir, dass autonome Fahrzeuge beliebige Punkt-zu-Punkt Verkehre anbieten, oder sollten sie sich auf Zugang zu/Abgang von Massenverkehrssystemen konzentrieren? Falls ersteres, wie halten wir die Anzahl der Fahrzeuge trotzdem klein (falls so gewünscht, s.o.)?

## Literatur

- Ahrens, G.-A., F. Ließke, R. Wittwer, S. Hubrich, & S. Wittig. Mobilität in Städten – SrV 2013. 2014. URL <http://www.tu-dresden.de/srv/>.
- Axhausen, K. W. Sind wir bald alle Passagiere? *Neue Züricher Zeitung*, 4.10.2016, 2016.
- Ben-Akiva, M. & S. R. Lerman. *Discrete choice analysis*. The MIT Press, Cambridge, MA, 1985.
- Bischoff, J., Führer, K., & M. Maciejewski. Impact assessment of autonomous DRT systems. VSP Working Paper 18-04, TU Berlin, Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik, 2018a. URL <http://www.vsp.tu-berlin.de/publications>.
- Bischoff, J., I. Kaddoura, M. Maciejewski, & K. Nagel. Simulation-based optimization of service areas for pooled ride-hailing operators. *Procedia Computer Science*, 130, 816, 2018b. doi:10.1016/j.procs.2018.04.069.
- Bischoff, J. & M. Maciejewski. Agent-based simulation of electric taxicab fleets. *Transportation Research Procedia*, 4, 191, 2014. doi:10.1016/j.trpro.2014.11.015.
- Bischoff, J. & M. Maciejewski. Electric taxis in Berlin – Analysis of the feasibility of a large-scale transition. In J. Mikulski, ed., *Tools of Transport Telematics*. Springer International Publishing, 2015. doi:10.1007/978-3-319-24577-5.
- Bischoff, J. & M. Maciejewski. Autonomous taxicabs in Berlin – a spatiotemporal analysis of service performance. *Transportation Research Procedia*, 19, 176, 2016a. doi:10.1016/j.trpro.2016.12.078.
- Bischoff, J. & M. Maciejewski. Simulation of city-wide replacement of private cars with autonomous taxis in Berlin. *Procedia Computer Science*, 83, 237, 2016b. doi:10.1016/j.procs.2016.04.121.
- Bischoff, J., M. Maciejewski, & K. Nagel. City-wide shared taxis: A simulation study in Berlin. In *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE, 2017. doi:10.1109/itsc.2017.8317926.
- Bösch, P. M., F. Becker, H. Becker, & K. W. Axhausen. Cost-based analysis of autonomous mobility services. *Transport Policy*, 64, 76, 2018. doi:10.1016/j.tranpol.2017.09.005.
- Clewlow, R. & G. S. Mishra. Disruptive transportation: The adoption, utilization, and impacts of ride-hailing in the United States. Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, 2017. URL [https://itspubs.ucdavis.edu/wp-content/themes/ucdavis/pubs/download\\_pdf.php?id=2752](https://itspubs.ucdavis.edu/wp-content/themes/ucdavis/pubs/download_pdf.php?id=2752), letzter Zugriff 12.04.2018.

- Führer, K. *Simulation-based assessment of demand responsive transport systems*. Bachelor's thesis, TU Berlin, Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik, Berlin, 2018.
- Horni, A., K. Nagel, & K. W. Axhausen, eds. *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. Ubiquity, London, 2016. doi:10.5334/baw.
- Hörl, S., C. Ruch, F. Becker, E. Frazzoli, & K. W. Axhausen. Fleet control algorithms for automated mobility: A simulation assessment for Zurich. Annual Meeting Preprint 18-02171, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2017.
- infas & DLR. *Mobilität in Deutschland 2008 – Ergebnisbericht. Schlussbericht für Forschungsprojekt FE Nr. 70.801/2006*, Institut für angewandte Sozialwissenschaft, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2010. URL <http://daten.clearingstelle-verkehr.de/223/>.
- ISV. *Modellergebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des öffentlichen Nahverkehrs. Abschlussbericht*, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart, 2016. URL [https://www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/publikationen/downloads/MEGAFON\\_Abschlussbericht\\_V028\\_20161212.pdf](https://www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/publikationen/downloads/MEGAFON_Abschlussbericht_V028_20161212.pdf).
- Knapen, L., D. Keren, A.-U.-H. Yasar, S. Cho, T. Bellemans, D. Janssens, & G. Wets. Estimating scalability issues while finding an optimal assignment for carpooling. *Procedia Computer Science*, 19, 372, 2013. doi:10.1016/j.procs.2013.06.051.
- Kuhn, H. W. The Hungarian method for the assignment problem. *Naval research logistics quarterly*, 2(1-2), 83, 1955.
- Leich, G. *Agentenbasierte Simulation autonom fahrender Rufbusse im Nordwesten Berlins*. Masterarbeit, TU Berlin, Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik, Berlin, 2017.
- Leich, G. & J. Bischoff. Should autonomous shared taxis replace buses? A simulation study. VSP Working Paper 18-05, TU Berlin, Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik, 2018. URL <http://www.vsp.tu-berlin.de/publications>.
- Levinson, D. M. & K. J. Krizek. *The end of traffic and the future of transport*. Amazon Digital Services LLC, 2. Auflage, 2015.
- Litman, T. *Autonomous vehicle implementation predictions*. Victoria Transport Policy Institute, 2018. URL <http://www.vtpi.org/avip.pdf>.
- Maciejewski, M. Benchmarking minimum passenger waiting time in online taxi dispatching with exact offline optimization methods. *Archives of Transport*, 30(2), 67, 2014a. doi:10.5604/08669546.1146978.



- Maciejewski, M. Online taxi dispatching via exact offline optimization. In *7th International Conference on Logistic Systems – Theory and Practice*. 2014b. Siehe auch VSP WP 14-14 <http://www.vsp.tu-berlin.de/publications>.
- Maciejewski, M. & J. Bischoff. Congestion effects of Autonomous Taxi fleets. *Transport*, 0, 1, 2017. doi:10.3846/16484142.2017.1347827.
- Maciejewski, M. & K. Nagel. Towards multi-agent simulation of the dynamic vehicle routing problem in MATSim. In R. Wyrzykowski et al, ed., *Parallel Processing and Applied Mathematics (PPAM), Revised Selected Papers, Part II*, Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, 2012. doi:10.1007/978-3-642-31500-8\_57.
- Maciejewski, M. & K. Nagel. The influence of multi-agent cooperation on the efficiency of taxi dispatching. In R. Wyrzykowski et al., ed., *10th International Conference Parallel Processing and Applied Mathematics (PPAM) Part II*, no. 8385 in LNCS. Warschau, Polen, 2013a. doi:10.1007/978-3-642-55195-6\_71.
- Maciejewski, M. & K. Nagel. A microscopic simulation approach for optimization of taxi services. In T. Albrecht, B. Jaekel, & M. Lehnert, eds., *3rd International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems 2013*, pp. 1–10. TUDpress, 2013b. Siehe auch VSP WP 13-12, see <http://www.vsp.tu-berlin.de/publications>.
- Uber. uberPOOL – Sharing is saving, 2017. URL <https://www.uber.com/nyc-riders/products/uberpool/>, letzter Zugriff 12.05.2017.
- Zou, Y., S. Wei, F. Sun, X. Hu, & Y. Shiao. Large-scale deployment of electric taxis in Beijing: A real-world analysis. *Energy*, 100, 25, 2016. doi:10.1016/j.energy.2016.01.062.