Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Induzierter Verkehr durch autonome Fahrzeuge: Eine Abschätzung

Le trafic induit par les véhicules automatisés: Une évaluation

Induced demand by autonomous vehicles: An assessment

Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, ETH Zürich

Sebastian Hörl
Felix Becker
Thibaut Dubernet
Kay W. Axhausen

Forschungsprojekt SVI 2016/001 auf Antrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)

Februar 2019 **1650**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.
Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.
Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.
Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.
Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Induzierter Verkehr durch autonome Fahrzeuge: Eine Abschätzung

Le trafic induit par les véhicules automatisés: Une évaluation

Induced demand by autonomous vehicles: An assessment

Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, ETH Zürich

Sebastian Hörl
Felix Becker
Thibaut Dubernet
Kay W. Axhausen

Forschungsprojekt SVI 2016/001 auf Antrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)

Februar 2019 **1650**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung
Kay W. Axhausen
Francesco Ciari (bis Juli 2017)
Thibaut Dubernet (ab Juli 2017)

Mitglieder
Sebastian Hörl
Felix Becker

Begleitkommission

Präsident
Hauke Fehlberg

Mitglieder
Bernard Oehry
Jürg Michel
Frank Bruns
Markus Maibach
Martin Buck
Paul Widmer
Karin Tausz
Mirjam Bütler
Christian Egeler

Antragsteller

Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von http://www.mobilityplatform.ch heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 19

2 Allgemeine Literaturanalyse ... 21
2.1 Übersicht ... 21
2.1.1 Technologischer Fortschritt ... 21
2.1.2 Diffusionsprognosen ... 22
2.1.3 Methodik ... 24
2.2 Auswirkungen auf die Mobilität ... 25
2.3 Auswirkungen auf die Stadtplanung ... 27
2.3.1 Infrastruktur ... 27
2.3.2 Erreichbarkeit ... 29
2.3.3 Umwelt und Emissionen ... 29
2.4 Auswirkungen auf die Automobilindustrie ... 30
2.4.1 Produzent, Betreiber, Eigentümer ... 30
2.4.2 Recht, Haftung und Versicherung ... 32
2.5 Auswirkungen auf die Arbeitsorganisation ... 33
2.6 Auswirkungen auf Mobilitätsprofile ... 33
2.7 Auswirkungen auf die Logistik ... 35
2.8 Auswirkungen auf Preis und Zahlungsbereitschaften ... 36

3 Spezifische Literaturanalyse ... 37
3.1 Verhaltensexperimente ... 37
3.1.1 Einleitung ... 37
3.1.2 Methodologie ... 38
3.1.3 Vergleich von Umfang und Methodik ... 38
3.1.4 Vergleich der Ergebnisse ... 40
3.1.5 Fazit und Ausblick ... 49
3.2 Kapazitätsgewinne ... 50
3.3 Simulationsansätze ... 51

4 Kostenrechner ... 53
4.1 Einleitung ... 53
4.2 Kostenstrukturen ... 55
4.2.1 Personenwagen ... 56
4.2.2 Öffentliche Verkehrsmittel ... 58
4.2.3 Kosteneffekte und Technologie ... 59
4.2.4 Kosten- und Preiskalkulation ... 60
4.3 Nutzungsparameter ... 61
4.4 Validierung mit aktuellen Daten ... 64
4.4.1 Privatfahrzeug ... 64
4.4.2 Taxi ... 64
4.4.3 Öffentlicher Verkehr ... 64
4.5 Ergebnisse ... 64
4.5.1 Kostenstrukturen ... 66
4.5.2 Auswirkungen der Fahrzeugautomation ... 67
4.5.3 Robustheit der Schätzungen ... 68
4.6 Die neue Wettbewerbssituation ... 70
4.6.1 Die Gesamtansicht ... 70
4.6.2 Bedarfsorientierte Sicht ... 71
4.7 Diskussion ... 72
4.7.1 Eine neue Welt? ... 72
4.7.2 Einschränkungen ... 74
4.8 Fazit ... 75

5 Umfrage ... 77
5.1 Beschreibung des Szenarios ... 77
5.2 Beschreibung der Studie ... 78
5.3 Durchführung der Studie ... 81
5.4 Stichprobe ... 81
5.5 Besitz von Mobilitätswerkzeugen ... 81
5.6 Verkehrsmittelwahlmodelle ... 85
5.7 Auswirkungen auf die Verkehrsmittelwahl ... 91
5.8 Fazit ... 94

6 Simulationen ... 97
6.1 Methodik ... 97
6.1.1 MATSim ... 97
6.1.2 Grundszenario ... 99
6.1.3 Simulationskomponenten ... 115
6.2 Dispatching Algorithmen ... 124
6.3 Szenarien ... 129
6.3.1 Bewertungskriterien ... 129
6.3.2 Automatisierter öffentlicher Verkehr ... 130
6.3.3 Automatisierte Taxiflotte ... 130
6.3.4 Private automatisierte Fahrzeuge ... 131
6.3.5 Verkehrsmittelwahlmodell ... 132
6.4 Simulation und Auswertung ... 133
6.4.1 Flottenauslegung ... 133
6.4.2 Stadtgebiet ... 135
6.4.3 Gesamtes Analysegebiet ... 146
6.4.4 Mischszenarien ... 153
6.5 Diskussion der Ergebnisse ... 153
6.5.1 Vergleich mit der Literatur ... 153
6.5.2 Schlussfolgerungen ... 154
6.6 Forschungs- und Arbeitsbedarf ... 155
6.6.1 Verhalten, Population und Nachfrage ... 156
6.6.2 Automatisierte Fahrzeuge ... 157
6.6.3 Öffentlicher Verkehr ... 158
6.6.4 Konvergenz ... 159

7 Fazit ... 161
7.1 Schlussfolgerungen für die Verkehrsplanung ... 161
7.2 Zielerreichung der Forschungsarbeit ... 162

Zusammenfassung

Das Projekt SVI 2016/001 beschäftigt sich mit der Einführung automatisierter Fahrzeuge in der Stadt Zürich und Umgebung in einem Zeithorizont von ca. 20 Jahren. Ein Hauptaugenmerk ist dabei der induzierte Verkehr durch den Umgang der Bevölkerung mit neuen Mobilitätsangeboten, die durch die Automatisierung der Fahrzeugflotte entstehen. Die Studie besteht aus vier Hauptteilen: Zuerst wird eine umfassende Literaturrecherche zum aktuellen Stand der Forschung durchgeführt, zweitens werden konsistente Kostenstrukturen für zukünftige automatisierte Mobilitätsangebote für den Schweizer Kontext entwickelt. Diese Kosten werden für die Verkehrsmittelwahlexperimente im Rahmen der Befragung genutzt. Aufbauend darauf werden im vierten Teil Simulationen in der Simulationssoftware MATSim entwickelt, die aufbauend auf Kostenstrukturen und Verkehrsverhalten die Auswirkungen auf das Verkehrssystem in genauer Weise betrachten. Mittels makroskopischen Regressionen wird zudem ein Zusammenhang zwischen den Erreichbarkeitsänderungen in ausgewählten Zukunftsszenarien auf die erwartete Zunahme der Anzahl an Reisen im System hergestellt.

Das Projekt untersucht dabei verschiedene Szenarien: Einerseits wird der Einfluss der Automatisierung auf den öffentlichen Verkehr (ÖV) betrachtet, andererseits auf den motorisierten Individualverkehr (MIV). Hinzu kommt eine Analyse zukünftiger automatisierter Taxi-Angebote, welche in der Forschungsliteratur und den Medien heute teils als Hoffnungsträger zur Lösung unserer Verkehrsprobleme, teils als “ÖV-Killer” beschrieben werden.

Der Kostenteil des Projekts beschäftigt sich mit einer detaillierten Analyse der Kosten und Preise automatisierter Mobilität. Zu diesem Zweck wird zunächst eine genaue Untersuchung der Kostenbestandteile heutiger Mobilitätsangebote (für den ÖV, für Privatwagen und Taxis) durchgeführt. Dies schliesst die Betriebskosten, Zinskosten, Servicekosten und viele weitere Elemente mit ein. Das Kostenmodell wird anhand existierender Referenzwerte in der Schweiz, z.B. für Taxiunternehmen validiert. Anschliessend werden, basierend auf der internationalen Literatur zum Thema, die Einflüsse der Elektrifizierung und Automatisierung auf die einzelnen Komponenten bestimmt.

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass sich die Kostenstrukturen für Privatfahrzeuge auch in Zukunft kaum ändern werden: Den Hauptteil der laufenden Kilometerkosten stellen die Abschreibungen dar. Eine dramatische Änderung der Kostenstrukturen ist jedoch im Taxi-Bereich zu erwarten. Während die Fahrerlöhne heute rund 88% der Kosten ausmachen, fallen diese als Hauptkostenpunkt weg, wenn die Fahrzeuge zukünftig fahrerlos operieren. Ein interessantes Ergebnis der Studie ist, dass das Gros der Kosten (mit rund 29%) dann auf die Reinigung der Fahrzeuge fällt, abgeleitet von heutigen Erkenntnissen im Bereich der Car-Sharing Flotten.

Während Privatfahrzeuge (mit oder ohne Automatisierung) in der Schweiz Vollkosten von rund 0.50 CHF/km aufweisen, kommt die Studie zu dem Schluss, dass automatisierte Taxis im städtischen Bereich für rund 0.41 CHF/Passagierkilometer angeboten werden können, während es heute noch 2.73 CHF/km sind. Das Taxi wird also im städtischen Raum, wo kurze Zugangswege und eine hohe Verfügbarkeit angenommen werden können, preislich zu einer klaren Konkurrenz des MIV. Auf der Seite des öffentlichen Verkehrs sind für lokale und regionale Angebote (Busse) Preishalbierungen möglich, während bedingt durch die bestehenden Kostenstrukturen kaum Änderungen im Fernverkehr (Bahn) zu erwarten sind.

Insgesamt kommt die Kostenstudie also zu dem Schluss, dass Mobilität durch den Wegfall von Fahrerlöhnen günstiger angeboten werden kann. Allerdings bleiben die laufenden Kosten für den Privatbesitz konstant. Die Preisänderungen führen zu einer Situation in der der öffentliche Verkehr (inklusive Taxiangeboten) hochgradig kompetitiv zum MIV werden kann. Es ist also zu erwarten, dass automatisierte Fahrzeuge in verschiedenen Marktsegmenten aus finanzieller Sicht einen erheblichen Vorteil haben werden.

Methodisch ist festzuhalten, dass die vorliegende die Studie die erste weltweit ist, die eine Analyse auf diesem Detailgrad durchführt. Die Ergebnisse zu zukünftigen Kostenstrukturen automatisierter Mobilität sind also nicht nur für den Schweizer Markt bisher einmalig, sondern gehen auch im internationalen Vergleich über den bisherigen Stand der Forschung hinaus.

Die im Kanton Zürich durchgeführte Befragung hat das Ziel die Intentionen der Bevölkerung im Hinblick auf deren Besitz an Mobilitätswerkzeugen (Anzahl PW, ÖV-Abonnemente etc.) und deren Nutzung konventioneller und automatisierter Verkehrsmittel zu erfassen. Es wurde davon ausgegangen, dass die automatisierten Fahrzeuge Leerfahrten unternehmen können, und dass die Zielorte nicht nur auf den Kanton beschränkt sind. Des Weiteren wurde auf Grund der verkehrsplanerischen Relevanz zwischen zwei verschiedenen Szenarien unterschieden. Im ersten Szenario werden dem heutigen Verkehrssystem eine Flotte selbstfahrender Taxis, die auch im Rahmen eines pooling-Services gebucht oder als Zubringer für Zugverbindungen gebucht werden können, hinzugefügt. Das zweite Szenario unterscheidet sich durch die Möglichkeit selbst automatisierte Fahrzeuge zu erwerben.

Für beide Szenarien haben die Befragten erst Auskunft über die Anpassung der Mobilitätswerkzeuge gegeben. Zudem haben die Befragten Angaben über einen kurzen (max. 50 km) und einen langen (über 50km) Weg gemacht. Auf Basis dieser Informationen wurden persönliche Verkehrsmittelwahlexperimente für die Befragten konstruiert. Des Weiteren wurden die Befragten unter Anderem nach deren Einstellungen gegenüber selbstfahrenden Fahrzeugen sowie deren Einstellungen gegenüber dem Führen eines Fahrzeugs gefragt.

Im ersten Szenario ist ein substantieller Rückgang des durchschnittlichen Besitzes an Personenwagen pro Haushalt beobachtbar. Wird den Befragten jedoch die Möglichkeit geboten ein automatisiertes Fahrzeug zu erwerben, entspricht die Anzahl an Personenwagen pro Haushalt der heutigen Zahl. Dabei möchten die Befragten in etwa gleich viele konventionelle wie automatisierte Fahrzeuge besitzen. Der Besitz an ÖV-Abonnements verändert sich zudem kaum in den Szenarien. Die Modellierung des Besitzes zeigt zudem, dass insbesondere die ÖV-Güteklasse des Wohnorts einen Einfluss auf den Besitz an PWs und ÖV-Abonnements hat. Der Preis automatisierter Fahrzeuge spielt hingegen für die im Experiment präsentierte Bandbreite keine belegbare Rolle.

Die Verkehrsmittelwahlmodelle, welche die Einstellungen der Befragten gegenüber dem Führen eines Fahrzeugs und gegenüber automatisierten Fahrzeugen berücksichtigen, haben weiterhin ergeben, dass die Zahlungsbereitschaft für eine Reisezeitverkürzung weiterhin am niedrigsten für konventionelle Massenverkehrsmittel ist. Auch der automatisierte Zubringer zum Bahnhof wird höher bewertet. Für kurze Distanzen schätzen die Befragten den Komfort gewöhnlicher und gepoolter automatisierter Taxis gleich ein. Mit zunehmender Distanz bevorzugen die Befragten jedoch die Privatsphäre eines Einzeltaxis. Die Modelle zeigen weiterhin, dass jüngere Befragte eine positivere Einstellung gegenüber automatisierten Fahrzeugen haben. Gleichzeitig würden ältere Befragte sie eher nutzen.

Die auf Basis dieser Studie errechneten Modal Splits zeigen, dass insbesondere der konventionelle PW durch automatisierte Alternativen bei der Verkehrsmittelwahl ersetzt wird. Für kurze Wege sinkt der Anteil zurückgelegter Wege durch Massenverkehrsmittel (inkl. des AV-Zubringers) marginal, während er bei längeren Wegen sogar zunimmt. Sollten Pooling-Angebote breit verfügbar sein, überwiegt der niedrigere Preis den niedrigeren Komfort gegenüber Einzeltaxis für die Befragten. Des Weiteren ist die Nachfrage nach automatisierten Alternativen für längere Wege elastischer als für kurze Wege.

Im Simulationsteil der Studie wird das agenten-basierte Simulationstool MATSim verwendet, welches die Tagesabläufe einer grossen Anzahl virtueller Reisender auf einer gemeinsamen Verkehrsinfrastruktur simuliert. Entsprechend der Projektplanung wird auf zwei Formen der automatisierten Mobilität eingegangen: Einmal wird eine Flotte automatisierter Taxis im Stadtgebiet Zürichs simuliert, während in einer zweiten Simulationsreihe der Effekt der Verfügbarkeit privater automatisierter Fahrzeuge untersucht wird. Die Preisniveaus stellen sich dabei dynamisch auf die Resultate des

Kostenrechners ein, beispielsweise anhand der momentanen Flottenauslastung und -grösse. Wartezeiten (für die Taxis) ergeben sich ebenfalls adaptiv aus der Flottengrösse und der aktuellen Nutzung des Angebots. Die Entscheidungen der Reisenden werden wiederum durch die beobachteten Wartezeiten und Preise beeinflusst und basieren auf den zuvor gemessenen Verkehrsmittelwahlmodellen. Methodisch wird also eine Simulation aufgebaut, die den Kreis zwischen Angebot und Nachfrage schliesst und dabei endogen ein Nachfragelevel, als auch ein Preislevel bei vorgegebener Flottengrösse erzeugt. Dieser Aufbau ist nach Wissen der Autoren bisher einmalig. Zwar ist das Gesamtsystem bisher noch unvollständig modelliert (beispielsweise sind keine Erste/Letzte-Meile-Angebote möglich, ebenso werden bisher keine Park- und Aufladebeschränkungen berücksichtigt), allerdings sind schon jetzt grobe Abschätzungen möglich.

In fast allen bisherigen Studien zu geteilter Mobilität werden Idealbedingungen angenommen, beispielsweise, dass jeder Verkehrsteilnehmer ein automatisiertes Taxi nutzen muss, solange die Wartezeiten unter einem bestimmten kritischen Wert bleiben. Was dabei nicht berücksichtigt wird sind die tatsächlichen Kosten des Systems als auch die Nutzerpräferenzen. Entsprechend werden recht hohe Ersatzraten erzielt, beispielsweise, dass eine Flotte von nur 10% des aktuellen Fahrzeugbestands in verschiedenen Städten den Reisebedarf decken könnte. Diese Ergebnisse werden momentan gern zu Werbezwecken genutzt. Unsere Studie zeigt jedoch, dass wenn Nutzerpräferenzen und realistische Preise berücksichtigt werden, weitaus kleinere Effekte beobachtet werden können.

Die Simulationen für die Stadt Zürich zeigen, dass ein automatisierter Taxiservice hauptsächlich Kunden aus dem MIV anzieht, unter der Annahme, dass der städtische ÖV durch die Automatisierung ebenfalls günstiger wird. Zählt man die Taxiangebote zum bestehenden ÖV hinzu (beispielsweise unter der Annahme, dass sie von einem bestehenden ÖV-Anbieter betrieben werden), so werden sogar Anteile des "automatisierten ÖV" von bis zu 60% erwartet, wohingegen der MIV von ca. 44% heute auf 29% (nach Personenkilometern) im untersuchten Gebiet sinkt. Die Flottenkonfiguration für Zürich, die in den vorgestellten Simulationen die grösste Nachfrage erhält liegt bei 3000 automatisierten Taxis und einem Kilometerpreis von ca. 0.56 CHF/km. Verkehrsmittelwahl und Leerdistanzen führen dabei zu einem Anstieg der Fahrzeugkilometer in der Stadt um +25%.

Werden nicht nur automatisierte Taxis im Stadtbereich zugelassen, sondern private automatisierte Fahrzeuge ergibt sich ein anderes Bild: Durch die Kombination aus hoher Flexibilität der Fahrzeuge und der Möglichkeit, die Zeit im Fahrzeug sinnvoll zu nutzen, ist diese Mobilitätsform sehr attraktiv, auch für Nutzergruppen, die vorher den ÖV gewählt haben. Dies ist insbesondere der Fall, wenn nicht nur bisherige Autofahrer, sondern alle Familienmitglieder das Fahrzeug nutzen können. In der Stadt wird in den Simulationen ein Anstieg der Fahrtdistanz von +40% im Vergleich zu heute errechnet.

Zusätzlich lässt sich auf Basis bestehender Regressionsstudien schlussfolgern, dass der Verbesserung der Reisezeiten durch die Automatisierung ein Anstieg des Reisevolumens folgt. Wird eine solche Regression auf die aus den Simulationen errechneten Reisezeitvorteile angewandt, ergibt sich ein Neuverkehr (in Personenkilometern) von ca. +0.5%. Dieser Effekt ist somit klein im Vergleich zur Verkehrsmittelwahl.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass die Zulassung privater automatisierter Fahrzeuge zu einer starken Mehrbelastung des Verkehrssystems führen könnte und regulatorisch mit Bedacht begleitet werden muss. Im Bereich der Taxis sind der Studie zufolge weniger negative Effekte zu erwarten, tatsächlich könnte ein solches System eine Bereicherung des heutigen ÖV-Angebots darstellen.

Die Resultate des Projekts SVI 2016/001 stellen einen wichtigen Schritt hin zu einer umfassenden und konsistenten Untersuchung von Zukunftsszenarien automatisierter Mobilität in der Schweiz dar. Erstmalig werden Kostenstrukturen automatisierter Mobilitätsangebote en detail beleuchtet. Zudem werden nach Kenntnis der Autoren die ersten umfassenden *Stated-Choice* Experimente zur Verkehrsmittelwahl und dem Mobilitätswerkzeugbesitz in Bezug auf selbstfahrende Fahrzeuge durchgeführt. Im Laufe

des Projekts konnte ein agent-basiertes Simulationsszenario für Zürich entwickelt werden, welches ebenfalls in diesem Detailgrad nur für zwei oder drei Städte weltweit existiert. Die konsistente Fusion von Kostenstrukturen, Verkehrsmittelwahlmodellen und agentenbasierter Simulation in MATSim ist in dieser Form ebenfalls einmalig und eine wichtige Neuerung, die für das Projekt entwickelt wurden.

Résumé

Le projet SVI 2016/001 traite de l'introduction de véhicules automatisés dans et autour de la ville de Zurich sur un horizon temporel d'environ 20 ans. L'accent est mis sur le trafic induit par la réaction de la population face aux nouvelles offres de mobilité résultant de l'automatisation de la flotte de véhicules. L'étude se compose de quatre parties principales. D'abord, une analyse documentaire complète sur l'état actuel de la recherche est effectuée. Ensuite, des structures de coûts cohérentes pour les futures offres de mobilité automatisées sont développées dans le contexte suisse. Ces coûts sont utilisés dans la troisième partie, une enquête sur le comportement possible des utilisateurs dans la région de Zurich. Sur cette base, dans la quatrième partie, des simulations sont développées à l'aide du logiciel de simulation MATSim, qui examine de près les effets sur le système de transport sur la base de ces structures de coûts et du comportement de la population. Des régressions macroscopiques sont également utilisées pour établir un lien entre le changement dans l'accessibilité et l'augmentation prévue du nombre de déplacements pour certains scénarios futurs.

Le projet étudie divers scénarios: l'influence de l'automatisation, est alors prise en compte d'une part sur les transports publics et d'autre part sur le transport individuel motorisé (TIM). En outre, des futurs services de taxis automatisés sont analysés. Dans la littérature scientifique ainsi que dans les médias d'aujourd'hui, elles sont décrits tantôt comme une source d'espoir pour résoudre nos problèmes de circulation, tantôt comme des "tueurs du transport public".

La partie du projet traitant des coûts présente une analyse détaillée des coûts et des prix de la mobilité automatisée. A cette fin, une analyse détaillée des éléments de coût des offres de mobilité actuelles (transports publics, voitures particulières et taxis) a été effectuée. Cela comprend les frais d'exploitation, les frais d'intérêt, les frais de service et bien d'autres éléments. Le modèle de coût est validé en comparant aux valeurs de référence existantes en Suisse, par exemple pour les compagnies de taxis. Ensuite, sur la base de la littérature internationale sur le sujet, les influences de l'électrification et de l'automatisation sur les différents éléments de coût sont déterminées.

En conséquence, on peut conclure que les structures de coûts des véhicules privés ne changeront guère à l'avenir : La dépréciation du véhicule représente la partie principale des frais actuels par kilomètre. Toutefois, on peut s'attendre à un changement radical dans la structure des coûts dans le secteur des taxis. Alors que les salaires des conducteurs représentent aujourd'hui environ 88 % des coûts, ceux-ci seront éliminés si les véhicules fonctionnent à l'avenir sans conducteur. L'étude démontre, d'après des résultats actuels dans le domaine du covoiturage, que la majeure partie des coûts (environ 29%) sera consacrée au nettoyage de véhicules.

Alors que les véhicules privés (avec ou sans automatisation) en Suisse ont un coût total d'environ 0.50 CHF/km, l'étude conclut que les taxis automatisés pourront être proposés en zone urbaine pour environ 0.41 CHF/passager-kilomètre, contre 2.73 CHF/km aujourd'hui. Dans les zones urbaines, où l'on peut supposer des temps d'accès courts et une disponibilité élevée, le taxi automatisé deviendra ainsi un concurrent évident du TIM en termes de prix. En ce qui concerne les transports publics, il sera possible de diviser par deux le prix des offres locales et régionales (bus), alors qu'en raison des structures de coûts existantes, on ne peut guère s'attendre à des changements dans le transport longue distance (rail).

Dans l'ensemble, l'étude des coûts conclut que la mobilité peut être offerte à moindre coût en raison de l'élimination des salaires des conducteurs. Cependant, les coûts de possession de véhicules restent constants. Les changements de prix conduisent à une situation dans laquelle les transports publics incluant les services de taxi automatisé pourront devenir très compétitifs par rapport au TIM. Il faut donc s'attendre à ce que les véhicules automatisés aient un avantage financier considérable dans les différents segments du marché.

Sur le plan méthodologique, la présente étude est la première au monde à effectuer une analyse si détaillé. Les résultats sur les futures structures de coûts de la mobilité automatisée ne sont donc pas seulement uniques pour le marché suisse, mais surpassent également l'état actuel de la recherche au niveau international.

L'objectif de l'enquête menée dans le canton de Zurich est d'évaluer les intentions du public en ce qui concerne la possession d'outils de mobilité (nombre de voitures, abonnements aux transports publics, etc.) et l'utilisation des moyens de transport conventionnels et automatisés. On a supposé que les véhicules automatisés peuvent effectuer des trajets à vide et que leurs déplacements ne sont pas limités au canton de Zürich. En outre, une distinction a été faite entre deux scénarios en raison de leur pertinence pour la planification du transport. Dans le premier scénario, une flotte de taxis automatisés, qui peuvent également être réservés dans le cadre d'un service de trajet partagé ou comme services de rabattement aux gares, sont ajoutés au système de transport actuel. Le deuxième scénario diffère en ce qui concerne la possibilité d'acheter des véhicules automatisés.

Pour les deux scénarios, les répondants ont d'abord fourni des informations sur l'adoption des outils de mobilité. En outre, les répondants ont donné des informations sur un itinéraire court (max. 50 km) et un itinéraire long (plus de 50 km). Sur la base de ces informations, des expériences de choix de transport personnalisées ont été construites pour les personnes interrogées. En outre, les répondants ont été interrogés sur leur attitude à l'égard de la conduite de véhicules et des véhicules automatisés .

Le premier scénario montre une baisse substantielle du nombre moyen de propriétaires de voitures par ménage. Cependant, si les répondants ont la possibilité d'acheter un véhicule automatisé, le nombre de voitures par ménage reste au niveau actuel. Les répondants aimeraient posséder à peu près le même nombre de véhicules conventionnels et automatisés. De plus, la possession des abonnements aux transports publics ne change guère dans les scénarios. Le modèle de possession des outils de mobilité montre également que la qualité des transports publics du lieu de résidence a une influence sur la possession de voitures et d’abonnements aux transports publics. La gamme de prix des véhicules automatisés ne joue cependant aucun rôle important dans la présente étude.

Les modèles de choix de transport ont également montré que la volonté de payer pour une réduction du temps de déplacement reste la plus faible pour les moyens de transport de masse conventionnels. De plus, le rabattement des véhicules automatisés aux gares ferroviaires est mieux cotée. Pour les courtes distances, les répondants apprécient également le confort des taxis automatisés ordinaires et collectifs. Toutefois, à mesure que la distance augmente, les répondants préfèrent l'intimité d'un taxi privé. Les modèles montrent également que les jeunes répondants ont une attitude plus positive à l'égard des véhicules automatisés. En même temps, les répondants plus âgés seraient plus susceptibles de les utiliser.

Les parts modales calculées sur la base de cette étude montrent que surtout la voiture conventionnelle est remplacée par des alternatives automatisées. Pour les courtes distances, la proportion de trajets parcourus en transport public incluant le rabattement par véhicule automatisé diminue légèrement, alors qu'elle augmente même pour les distances plus longues. Si les offres de taxis automatisés partagés sont largement disponibles, le prix l'emporte sur le confort par rapport aux taxis individuels. En outre, la demande d'alternatives automatisées pour des distances plus longues est plus élastique que pour des distances plus courtes.

La partie de l'étude traitant de la simulation utilise l'outil de simulation multi-agents MATSim, qui simule les déplacements quotidiens d'un grand nombre de voyageurs virtuels sur une infrastructure de transport commune. Selon la planification du projet, deux formes de mobilité automatisée sont abordées : L'une consiste à simuler une flotte de taxis automatisés dans la ville de Zurich, tandis que l'autre consiste à étudier l'effet de la disponibilité de véhicules automatisés privés. Les niveaux de prix sont ajustés dynamiquement aux résultats du calculateur de coûts, par exemple sur la base de l'utilisation et de la taille de la flotte actuelle. Les temps d'attente (pour les taxis) dérivent également de la taille de la flotte et de l'utilisation actuelle de l'offre. Les décisions des

passagers suivent les modèles de choix du mode de transport précédemment mesurés. Ils sont donc à leur tour influencées par les temps d'attente et les prix observés. Méthodiquement, une simulation qui boucle la boucle entre l'offre et la demande est construite et génère ainsi de manière endogène un niveau de demande ainsi qu'un niveau de prix pour une taille de flotte donnée. A la connaissance des auteurs, cette combinaison est unique à ce jour. Bien que l'ensemble du système ne soit pas encore complètement modélisé (par exemple, aucun service de premier/dernier kilomètre n'est possible et aucune restriction de stationnement et de recharge n'a été prise en compte), des estimations approximatives sont déjà possibles.

Presque toutes les études antérieures sur la mobilité partagée supposent des conditions idéales, par exemple que chaque propriétaire de véhicule doit utiliser un taxi automatisé tant que les temps d'attente restent en dessous d'une certaine valeur critique. Toutefois, les coûts réels du système ainsi que les préférences des utilisateurs ne sont jamais pris en compte. En conséquence, des taux de remplacement assez élevés sont atteints, par exemple, seulement 10 % du parc de véhicules actuelle suffirait pour combler les besoins de déplacement dans diverses villes. Ces résultats sont actuellement utilisés à des fins publicitaires. Cependant, notre étude montre que lorsque les préférences des utilisateurs et des prix réalistes sont pris en compte, des effets beaucoup plus faibles peuvent être observés.

Les simulations pour la ville de Zurich montrent qu'un service de taxi automatisé attire principalement les clients du TIM, en supposant que l'automatisation rend également les transports publics urbains moins chers. Si l'on ajoute les services de taxi aux transports publics existants (en supposant, par exemple, qu'ils sont exploités par un fournisseur de transport public existant), on s'attend même à ce que la part modale des "transports publics automatisés" atteigne 60%, alors que le TIM devrait passer d'environ 44% aujourd'hui à 29% (en terme de kilomètres parcourus) dans la zone étudiée. Pour une flotte de 3000 taxis automatisés, laquelle attire la plus grande demande lors les simulations effectuées, le service pourrait être offert à un prix au kilomètre d'environ 0.56 CHF/km. Le choix modal et les véhicules circulant à vide mènent à une augmentation de la distance conduite d'environ +25% en ville.

Si non seulement les taxis automatisés sont autorisés dans la zone urbaine, mais aussi les véhicules privés automatisés, une autre image se dégage : en raison de la combinaison de la grande flexibilité des véhicules et de la possibilité d'utiliser le temps dans le véhicule de manière plus efficace, cette forme de mobilité est très attrayante, même pour les groupes d'utilisateurs ayant auparavant choisi les transports publics. C'est particulièrement le cas lorsque non seulement les conducteurs actuelles, mais aussi tous les membres de la famille peuvent utiliser le véhicule. Ces simulations prédisent une augmentation de la distance conduite en ville de +40%.

De plus, il est probable que l’amélioration des temps de parcours due à l’automatisation mène à une augmentation du nombre de déplacements. Pour la Suisse, il existe un modèle de régression quantifiant cette relation basé sur des données historiques. Appliqué aux temps de parcours obtenus par le biais des simulations de véhicules automatisés, il s’ensuit une augmentation du trafic (en voyageurs-kilomètres) de +0.5%. Ces effets sont minimes en comparaison aux effets de choix modal.

On peut conclure que l’autorisation des véhicules automatisés privés pourrait entraîner une lourde charge supplémentaire sur le système de transport et doit s'accompagner d'une réglementation prudente.

Les résultats du projet SVI 2016/001 représentent une étape importante vers une étude complète et cohérente des scénarios futurs de la mobilité automatisée en Suisse. Pour la première fois, les structures de coûts des services de mobilité automatisées sont examinées en détail. De plus, à la meilleure connaissance des auteurs, les premières expériences de choix à préférence déclarée sur le choix des moyens de transport et la possession d'outils de mobilité en lien aux véhicules automatisés sont effectuées. Au cours du projet, un scénario de simulation multi-agents, qui n'existe à ce niveau de détail que pour deux ou trois villes dans le monde entier, est développé pour Zurich. La fusion

cohérente des structures de coûts, des modèles de choix de transport et de la simulation multi-agents dans MATSim est également unique sous cette forme et constitue une innovation importante apporté par le projet.

Summary

The SVI 2016/001 project deals with the introduction of automated vehicles in and around the city of Zurich over a time horizon of approximately 20 years. The main focus is on induced traffic caused by the population's reaction to new mobility services resulting from the automation of the vehicle fleet. The study consists of four main parts: First, a comprehensive literature review on the current state of research is carried out. Second, consistent cost structures for future automated mobility services are developed for the Swiss context. These costs are used in the third part, a survey on likely user behaviour in the Zurich area. Based on this, simulations are developed in the fourth part using the MATSim simulation software, which take a close look at the impacts on the traffic system based on cost structures and travel behaviour. Macroscopic regressions are used to establish a connection between the changes in accessibility and the expected increase in the number of trips for selected future scenarios.

The project investigates various scenarios: On the one hand, the influence of automation on public transport, and on the other hand, on individual motorised transport (IMT), is considered. In addition, an analysis of future automated taxi services, which are described in research literature and the media as both a source of hope for solving our traffic problems and as "public transport killers", is performed.

The cost part of the project presents a detailed analysis of the costs and prices of automated mobility. To this end, a detailed analysis of the cost components of today's mobility offers (for public transport, private cars and taxis) is carried out. This includes operating costs, interest costs, service costs and many other elements. The cost model is validated against existing reference values in Switzerland, e.g. for taxi companies. Subsequently, based on the international literature on the topic, the influences of electrification and automation on the individual components are determined.

As a result, it can be concluded that the cost structures for private vehicles will hardly change in the future: The main part of the current distance costs is depreciation. However, a dramatic change in cost structures is to be expected in the taxi sector. While driver's wages now account for around 88% of the costs, these will be eliminated as the main cost factor if the vehicles operate driverless in the future. An interesting result of the study is that the bulk of the costs (around 29%) then fall on the cleaning of the vehicles, as derived from recent findings related to car sharing fleets.

While private vehicles (with or without automation) in Switzerland have full costs of around 0.50 CHF/km, the study concludes that automated taxis can be offered in urban areas for around 0.41 CHF/passenger-kilometre, compared with CHF 2.73/km today. In urban areas, where short access routes and high availability can be assumed, the taxi will thus become a clear competitor to IMT in terms of price. On the public transport side, a reduction of prices by half is possible for local and regional offers (buses), while hardly any changes in long-distance transport (rail) are to be expected due to the existing cost structures.

Overall, the cost study concludes that mobility can be offered more cheaply due to the elimination of driver wages. However, the running costs for private vehicles remain constant. The price changes lead to a situation in which public transport (including taxi services) can become highly competitive with IMT. It is therefore to be expected that automated vehicles will have a considerable financial advantage in various market segments.

Methodologically, the present study is the first to carry out an analysis at this level of detail. The results on future cost structures of automated mobility are therefore not only the first of their kind for the Swiss market, but also exceed the current state of research internationally.

The aim of the survey conducted in the Canton of Zurich is to assess the public's intentions with regard to their mobility tool ownership (number of cars, public transport subscriptions,

etc.) and their use of conventional and automated means of transport. It was assumed that automated vehicles can perform empty rides and that their travel destination is not restricted to the canton of Zurich. Furthermore, a distinction was made between two different scenarios due to their relevance for transport planning. In the first scenario, a fleet of self-driving taxis, which can also be booked as part of a pooling service or as a feeder service for train connections, are added to the current transport system. The second scenario differs in the possibility to purchase automated vehicles.

For both scenarios, respondents first provided information on the adoption of mobility tools. In addition, they gave information on one short (max. 50 km) and one long (over 50 km) routine trip. Based on this information, personalized transport choice experiments were constructed for the interviewees. Furthermore, the respondents were asked about their attitudes towards self-driving vehicles and their attitudes towards driving a vehicle.

The first scenario shows a substantial decrease in the average ownership of passenger cars per household. However, if respondents are given the opportunity to purchase an automated vehicle, the number of cars per household corresponds to the current number. The respondents would like to own about the same number of conventional and automated vehicles. Moreover, the ownership of public transport subscriptions hardly changes in the scenarios. The modeling of ownership also shows that in particular the quality of public transport at the place of residence has an influence on ownership of cars and public transport subscriptions. However, the considered price range of automated vehicles does not play an important role in this experiment.

The transport choice models, which take into account respondents' attitudes towards driving and automated vehicles, have also shown that the willingness to pay for a reduction in travel time remains the lowest for conventional means of mass transport. The automated feeder service to the station is also rated higher. For short distances, respondents appreciate the comfort of ordinary and pooled automated taxis equally. However, as distance increases, respondents prefer the privacy of a single taxi. The models also show that younger respondents have a more positive attitude towards automated vehicles. At the same time, older respondents would be more likely to use them.

The modal splits calculated on the basis of this study show that the conventional car in particular is being replaced by automated alternatives in the mode choice. For short distances, the proportion of trips travelled by public transport (including the AV feeder system) decreases marginally, while it even increases for longer distances. If pooling offers are widely available, the lower price outweighs the lower comfort for respondents compared to individual taxis. Furthermore, the demand for automated alternatives for longer distances is more elastic than for shorter distances.

The simulation part of the study uses the agent-based simulation tool MATSim, which simulates the daily routines of a large number of virtual travellers on a common transport infrastructure. According to the project plan, two cases of automated mobility are addressed: One is to simulate a fleet of automated taxis in the city of Zurich, while a second is to investigate the effect of the availability of private automated vehicles. Price levels are dynamically adjusted to the results of the cost calculation, for example on the basis of current fleet utilization and size. Waiting times (for taxis) are derived adaptively from the fleet size and the current use of the service. Passengers' decisions are in turn obtained from the previously measured mode choice models; hence, they are influenced by the observed waiting times and prices. Methodologically, a simulation that closes the loop between supply and demand is built up and thereby endogenously generates a demand level as well as a price level for a given fleet size. To the knowledge of the authors, this setup is so far unique. Although the overall system is still modeled incompletely (for example, no first/last mile services are possible, and no parking and recharging restrictions have been taken into account), rough estimates are already possible.

Almost all previous studies on shared mobility assume ideal conditions, for example that every vehicle owner must use an automated taxi as long as waiting times remain below a certain critical value. What is not taken into account are the actual costs of the system as well as user preferences. Accordingly, quite high replacement rates are achieved, for

example that only 10% of the current vehicle fleet could cover the full travel demand in various cities. While these results are currently used for the purpose of advertising shared mobility, our study shows that when user preferences and realistic prices are taken into account, much smaller effects can be observed.

The simulations for the city of Zurich show that an automated taxi service mainly attracts customers from IMT, assuming that the automation also makes urban public transport cheaper. If taxi services are added to existing public transport (assuming, for instance, that they are operated by an existing public transport provider), shares of "automated public transport" of up to 60% are expected, whereas IMT is expected to fall from approximately 44% today to 29% (in terms of travel distance) in the area under investigation. For a fleet of 3,000 automated taxis, which attracts the highest demand in our simulations, the service can be offered for a price of approximately 0.56 CHF/km. Mode choice and empty miles lead to an increase of vehicle distance travelled of about +25% in the city.

If not only automated taxis are allowed in the city, but also private automated vehicles, a different picture emerges: Due to the combination of the high flexibility of the vehicles and the possibility to use the time spent in the vehicle in a more useful manner, this form of mobility is very attractive, also for user groups who have previously chosen public transport. This is particularly the case when not only present drivers, but all family members can use the vehicle. In the city the simulations yield an increase of vehicle distance of about +40% compared to today.

Additionally, it is likely that improvement of travel times through automation will lead to an increase of travel volumes. Existing regression studies for Switzerland quantify that relationship on the basis of historical data. Applying such a regression on travel time benefits calculated by our simulations yields an increase of about +0.5% in person kilometres travelled. This number is small in comparison to the effects resulting from mode choice behaviour

It can be concluded that the authorization of private automated vehicles could lead to a heavy additional burden on the transport system and must be accompanied by regulation with caution. According to the study, less negative effects are to be expected in the taxi sector; in fact, such a system could enrich today's public transport services.

The results of the SVI 2016/001 project represent an important step towards a comprehensive and consistent investigation of future scenarios of automated mobility in Switzerland. For the first time, cost structures of automated mobility services are examined in detail. In addition, to the knowledge of the authors, the first comprehensive stated-choice experiments on mode choice and mobility tool ownership in relation to self-driving vehicles are conducted. In the course of the project, an agent-based simulation scenario is developed for Zurich, which also exists in this level of detail for only two or three cities worldwide. The consistent fusion of cost structures, transport selection models and agent-based simulation in MATSim is also unique in this form and an important innovation that the project has brought about.

1 Einleitung

Automatisierte Fahrzeuge (AV für “automated vehicle”) werden sowohl von Verkehrsplanern in der Praxis als auch in wissenschaftlichen Kreisen in den letzten zwei Jahren immer stärker diskutiert. Ihnen werden eine Reihe von positiven Eigenschaften zugeschrieben, z.B., dass mit Ihnen gezielt auf Nachfragemuster reagiert werden kann, dass Zugang zu individueller Mobilität für bisher ausgeschlossene Gruppen geschaffen werden kann und dass das Reisen zu deutlich günstigeren Preisen angeboten werden kann. Auf der anderen Seite wird die Gefahr erkannt, dass solche Angebote zu Mehrverkehr führen können, insbesondere wenn das Reisen einfacher und günstiger wird. Auch bringen Leerkilometer, die in einer Welt automatisierter Fahrzeuge eine neue ungewisse Variable in das Verkehrssystem einbringen, eine weitere Unsicherheit, die so heute noch nicht berücksichtigt werden muss.

Das vorliegende Forschungsprojekt hat die Aufgabe, eine erste Abschätzung zum Mehrverkehr durch automatisierte Fahrzeuge im Kontext der Stadt Zürich und Umland zu bieten. Die einzelnen Arbeitsschritte schliessen dabei Lücken im aktuellen Forschungsstand zu automatisierten Fahrzeugen. Im ersten Teil des Berichts werden aktuelle Forschungsergebnisse der weltweiten Forschungsgemeinschaft vorgestellt und zusammengefasst. Hauptaugenmerk wird dabei auf die zahlreichen Verhaltensstudien gelegt, die erörtern sollen wie Nutzer mit unterschiedlichen Angebotsformen automatisierter Fahrzeuge umgehen würden. Der zweite Teil der Studie stellt eine im Detailgrad einzigartige Kostenschätzung zu AV-Angeboten vor, speziell abgestimmt auf den Schweizer Markt. Die Ergebnisse quantifizieren einerseits erstmals die grossen Kostenersparnisse automatisierter Mobilitätsangebote gegenüber den konventionellen privaten und öffentlichen Verkehrsmitteln und dienen andererseits als eine fundierte Grundlage für Verhaltensexperimente, die im Schweizer Kontext durchgeführt werden können. Eine solche Studie bildet den dritten Teil der vorliegenden Arbeit. In einem Verkehrsmittelwahlexperiment wird die Bevölkerung des Kantons Zürich zu ihrem Nutzungsverhalten gegenüber hypothetischen Angebotsformen automatisierter Mobilität befragt. Aus den Antworten der repräsentativen Umfrage werden statistische Modelle geschätzt, die Aussagen über die Attraktivität automatisierter Fahrzeuge räumlich verteilt im Stadtgebiet und Umland Zürichs, sowie abhängig von soziodemographischen Faktoren und Reisedistanzen erlauben. Somit ist eine erste Nachfrageschätzung für AV-Angebote möglich. Im vierten Teil der Studie werden die entwickelten Verhaltensmodelle genutzt um in einer agentenbasierten Verkehrssimulation die aus den Verhaltensmustern resultierenden Effekte für das Verkehrssystem abzuschätzen.

Die Abschätzung des induzierten Verkehrs findet in dieser Studie in zwei Komponenten statt: Einerseits dienen die Simulationen samt Verkehrsmittelwahlmodellen dazu, den Mehrverkehr aus dem Mobilitätsverhalten der Personen abzuleiten. Mehrverkehr ergibt sich also vorrangig aus der Wahl automatisierter Verkehrsmittel anstelle des öffentlichen Verkehrs oder des Langsamverkehrs. Dies schliesst entstehende Leerfahrten mit ein. Die zweite Komponente des Mehrverkehrs in dieser Studie analysiert die Reisezeitvorteile, die sich durch die neuen Verkehrsmittel ergeben: Historisch kann gezeigt werden, dass eine Verbesserung der Reisezeiten aus makroskopischer Sicht die zurückgelegte Distanz im Verkehrssystem der Schweiz erhöht hat. Anhand existierender Regressionsstudien kann somit in dieser Studie der durch die Automatisierung entstehende Neuverkehr errechnet werden.

Der vorliegende Bericht verwendet eine konsistente Nomenklatur. Die Abkürzung *AV ("automated vehicle")* wird zur Bezeichnung automatisierter Mobilitätsangebote verwendet. Die Fahrzeuge werden synonym als *selbstfahrend* bzw. *automatisiert* bezeichnet. Der ursprüngliche Begriff im Projekttitel des *Automatisierten* Fahrzeugs wird im Text nicht verwendet, da die internationale Literatur, anders als in den frühen Publikationen, mittlerweile dem Begriff *autonomous* die Bezeichnung *automated* vorzieht. Entsprechend findet sich auch im Titel des aktuellen Projektzyklus des ASTRA, "Auswirkungen des *automatisierten* Fahrens", diese Bezeichnung wieder. Es sei jedoch angemerkt, dass speziell im deutschsprachigen Raum noch Uneinigkeit über die genaue Bezeichnung

herrscht. So sprechen deutsche Studien beispielsweise von *VAF* als *vollautomatisierte Fahrzeuge*. Bei der SBB hat sich die Abkürzung *SFF* für *selbstfahrendes Fahrzeug* etabliert.

Fahrzeuge, die nicht automatisiert sind, werden hier als *CV* (*conventional vehicle*) abgekürzt und als *konventionelle Fahrzeuge* im Text bezeichnet.

Die automatisierten Angebote werden hier noch einmal unterteilt. So werden Angebote, bei denen das Fahrzeug das Eigentum des Nutzers ist, als *privat* bezeichnet, beispielsweise das *konventionelle Privatfahrzeug* oder das *automatisierte Privatfahrzeug*. Angebote, die von einem Dritten zur Verfügung gestellt werden, werden als *geteilt* bzw. *on-demand* bezeichnet. Im Projekt wird hauptsächlich zwischen zwei *geteilten automatisierten* Angeboten unterschieden: Das *Taxi-AV* bzw. das *automatisierte Taxi* bezeichnet ein Angebot, bei dem *ein* Passagier samt ihm bekannter Personen von einem Dienstleister transportiert wird, d.h. es handelt sich um die automatisierte Variante eines klassischen Taxis. Das *PAV* (*pooled AV*) bezeichnet ein Konzept bei dem der Nutzer das Fahrzeug mit ihm unbekannten Personen teilt, es handelt sich also um eine automatisierte Form des *ride-sharings*.

2 Allgemeine Literaturanalyse

Zu Projektbeginn wurde zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt, die eine Übersicht über die aktuelle wissenschaftliche Literatur zum Thema automatisierter Fahrzeuge bieten soll. Das folgende Kapitel basiert hauptsächlich auf dieser Recherche, welche als Arbeitsbericht zugänglich gemacht wurde:

Hörl, S., F. Ciari und K.W. Axhausen (2016) Recent perspectives on the impact of autonomous vehicles, *Arbeitsberichte Verkehrsplanung und Raumplanung*, **1216**, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), ETH Zürich, Zürich.

2.1 Übersicht

Die rasante technologische Entwicklung der selbstfahrenden Autos hat dazu geführt, dass Tests mit fahrerlosen Autos in der ganzen Welt durchgeführt werden. In letzter Zeit werden diese Entwicklungen in den Nachrichten ausführlich behandelt (Silberg *et al.*, 2013; Fraedrich und Lenz, 2014). Mit zunehmend automatisierten Fahrassistenzsystemen in der Massenautomobilproduktion hat der Wandel hin zu einem vollautomatisierten Fahrerlebnis bereits begonnen. Während der Übergang in eine solche Zukunft schrittweise erfolgen kann, werden automatisierte Fahrzeuge im Allgemeinen als disruptive Kraft angesehen (Maunsell *et al.*, 2014), die nicht nur das Verkehrsumfeld, sondern auch die Art und Weise, wie wir Mobilität verstehen und wie wir Städte planen ändern kann.

Die grosse Herausforderung der heutigen Forschung besteht darin, kohärente Szenarien einer fahrerlosen Zukunft durch historische Analysen, sinnvollen Annahmen, Vorhersagen und Simulationen zu entwickeln. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über aktuelle Ergebnisse und Prognosen rund um automatisierte Fahrzeuge.

Dazu ist es notwendig zu definieren, was genau unter einem automatisierten Fahrzeug zu verstehen ist. Während die Technologie an eine Vielzahl unterschiedlicher Fahrzeugtypen angepasst werden kann, wird hier speziell der strassengebundene Verkehr betrachtet, der Anpassungen der Selbstfahrtechnik an PKW und ÖV-Lösungen umfasst.

Darüber hinaus muss definiert werden, welchen zeitlichen Bezug die Literaturrecherche hat. Es gibt viele Szenarien, wie der Weg zu einer grossflächigen Nutzung von AVs aussehen kann, mit technologischen, gesellschaftlichen, rechtlichen und wirtschaftlichen Hindernissen. Während diese Aspekte in den nächsten Abschnitten kurz behandelt werden, konzentriert sich der Hauptteil des Kapitels auf das ideale Szenario, in dem AVs zu einem festen Bestandteil der Verkehrssystems geworden sind.

2.1.1 Technologischer Fortschritt

Hauptgrund, warum Fragen bezüglich der gesellschaftlichen Auswirkungen von automatisierten Fahrzeugen immer mehr Beachtung finden, ist, dass die Technologieentwicklung für das automatisierte Fahren mit grosser Geschwindigkeit voranschreitet. Wie die DARPA Challenges zum automatisierten Fahren zeigten (DARPA, 2014), wurden gerade in den letzten zehn Jahren enorme Fortschritte erzielt. Um die Diskussionen über AV-Technologie zu standardisieren, sind 6 Automatisierungsstufen durch SAE International (2014) definiert.

Mit dem automatisierten Fahren auf Autobahnen, wie es von Tesla freigegeben wurde oder bald in Göteborg (Stadt Göteborg, 2016) getestet werden soll, ist Stufe 3 der Skala bereits erreicht. Allmählich wird erwartet, dass AVs immer weniger spezifischen Bedingungen wie Autobahnen oder Parkplätzen gerecht werden müssen, bis ein vollständig automatisiertes

Fahren in allen Umgebungen und Situationen (Level 5) in einer sicheren Weise zur Verfügung gestellt werden kann, wie zum Beispiel in dem Versuch von Waymo in Phoenix[1].

Um die Herausforderungen innerhalb dieser Entwicklung zu erfassen, muss definiert werden, auf was man sich bei "AV Technologie" eigentlich bezieht. Auf der Softwareseite stützt sie sich auf künstliche Intelligenz, Sensorfusion, maschinelles Lernen und Big Data, wo in den letzten Jahren enorme Fortschritte erzielt wurden. Auf der Hardwareseite muss man einerseits die von der ICT-Industrie entwickelte Fahrzeug-zu-Fahrzeug- und Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Technologie (V2V bzw. V2I für “vehicle-to-vehicle” bzw. “vehicle-to-infrastructure”), andererseits die Sensoren und ihre jeweiligen Prozessoren berücksichtigen. Im Allgemeinen muss zwischen miteinander verbundenen und automatisierten Fahrzeugen unterschieden werden. Während AVs wahrscheinlich von Kommunikationstechnologie abhängig sein werden, könnte es auch sein, dass AVs wirklich "automatisiert" in dem Sinne funktionieren, dass keine Kommunikation mit externen Fahrzeugen oder der Infrastruktur nötig sein wird. Darüber hinaus wird oft angenommen, dass AVs elektrisch statt mit fossilen Brennstoffen betrieben werden (Litman, 2014). Daher sind die Elektrifizierung von Privatfahrzeugen und die Entwicklung leistungsfähiger Batterien ebenfalls Hauptbestandteile der AV-Entwicklung.

Eine Vorhersage der Geschwindigkeit, mit der alle verwandten Technologien in Richtung Automatisierung der Stufe 5 konvergieren, ist eine schwierige Aufgabe. Der vergleichsweise langsame Fortschritt in der Batterietechnologie stellt wahrscheinlich die Hauptrestriktion für die technologische Entwicklung dar und noch mehr für die gross angelegte Einführung von selbstfahrenden Fahrzeugen.

Nichtsdestotrotz stimmt die vorhandene Literatur darin überein, dass innerhalb des nächsten Jahrzehnts vollständig automatisierte Autos erscheinen werden und dass in den nächsten 50 Jahren eine grosse Anzahl von Fahrzeugen auf der Strasse vollständig automatisiert fahren wird. Bansal und Kockelman (2016) sagen voraus, dass 25% der Fahrzeuge bis zum Jahr 2045 automatisiert sind. Laut der Simulation zur Technologiediffusion von Lavasani *et al.* (2016) liegt eine Sättigung bis 2050 vor. Litman (2014) sagen vorher, dass AVs für eine breite Mehrheit zwischen 2040 und 2060 erschwinglich sein werden und Bierstedt *et al.* (2014) prognostizieren, dass AVs bis 2040 in kontrollierten Umgebungen und in öffentlichen Strassen ab 2050 verfügbar sein werden. Ein weiterer oft benannter Zeitstempel ist die vollständige Automatisierung des Individualverkehrs, die um 2025 von Mosquet *et al.* (2015) und Bernhart *et al.* (2016) und ab 2030 in Bertoncello und Wee (2015) prognostiziert wird. Im Allgemeinen wird erwartet, dass der Personen- und Güterverkehr ähnlichen Mustern folgen wird, obwohl Unterschiede in der Technologie existieren. Da der Güterverkehr im Fernverkehr überwiegend in besser kontrollierten Strassenverhältnissen stattfindet, wird sogar erwartet, dass die AV-Technologie für LKW zuerst eingeführt werden wird. Dieser Gedanke ist motiviert durch die grossen Einsparungen, die AVs für den Transportsektor bringen können, wie weiter unten genauer erläuert wird.

2.1.2 Diffusionsprognosen

Während es eine Reihe von Vorhersagen von optimistisch bis konservativ gibt, wann genau AVs ein etabliertes Element im Verkehrsumfeld sein werden, scheint der Weg dorthin in der Literatur klarer zu sein. Generell definieren die rechtlichen, gesellschaftlichen und infrastrukturellen Gegebenheiten in den verschiedenen Ländern, was zu tun ist, um völlig automatisierte Fahrzeuge auf den Strassen zu etablieren, und wie einfach oder schwierig dieser Übergang sein wird. Länderspezifische Analysen wurden für Australien (Maunsell *et al.*, 2014), das europaweite CityMobil2-Projekt (Alessandrini *et al.*, 2015), Österreich (Azmat *et al.*, 2016), Korea (Kim *et al.*, 2015), Grossbritannien (Clark *et al.*, 2016), Singapur (Tan und Tham, 2014), die Niederlande (Milakis *et al.*, 2015) und die USA (Fagnant und Kockelman, 2015; Burmeister *et al.*, 2014) durchgeführt.

[1] Siehe https://waymo.com/ontheroad/

Neben den bereits erwähnten technologischen Herausforderungen gibt es eine Reihe von zusätzlichen Barrieren, die es zu überwinden gilt, bis AVs in den Alltag integriert sein werden. Die folgenden Abschnitte geben einen kurzen Überblick über diese limitierenden Faktoren, während mögliche Lösungen in den jeweiligen Kapiteln beschrieben werden:

Rechtliche Fragen und Haftungsfragen müssen beantwortet werden, um automatisierte Fahrzeuge zu ermöglichen. Bis heute ist nicht ganz klar, wer die Verantwortung übernimmt, wenn Eigentum oder Menschen durch automatisierte Fahrzeuge beschädigt respektive verletzt werden. Dies hängt auch stark vom tatsächlichen Automatisierungsgrad ab, da ein Benutzer, der keine Möglichkeit hat, in potentiell schädliche Manöver des Fahrzeugs einzugreifen, nicht zur Verantwortung gezogen werden kann. Andererseits kann es sein, dass Service-Betreiber zögern, dem Fahrer oder der Fahrerin mehr und mehr Verantwortung abzunehmen, solange er oder sie ins Fahrverhalten noch eingreifen kann. Daher können rechtliche Fragen als eine der grössten Herausforderungen in der Adaptionsphase angesehen werden, während die Situation einfacher werden könnte, sobald ein beträchtlicher Teil der Fahrzeuge aus AVs besteht. Wege zu tragfähigen Rechts- und Haftungsszenarien, einschliesslich Datenschutzfragen (Schoonmaker, 2016), werden in Sheriff (2016), Schellekens (2015), Lederman *et al.* (2016) und NHTSA (2013) diskutiert.

Gesellschaftliche Barrieren entstehen vor allem durch die Umstrukturierung des Arbeitsmarktes. Im Zuge des allgemeinen Rückgangs der Industriearbeit durch die zunehmende Automatisierung werden AVs zu einem Abbau von Arbeitsplätzen im Transport- und Logistikwesen führen (Spinoulas *et al.*, 2015; Guerra, 2016). Dies betrifft vor allem Fahrpersonal für den öffentlichen Verkehr, Taxis und den Güterverkehr. Indirekt betroffen sind Arbeitsplätze in verwandten Bereichen wie bei der Wartung der Fahrzeuge oder beim Notfallpersonal aufgrund der geringeren Anzahl von Autounfällen (Shanker *et al.*, 2013). Die betroffenen Kürzungen haben gemeinsam, dass vor allem Arbeitsplätze mit niedrigen Löhnen und begrenztem Fachwissen abgebaut werden, während nur wenige geschaffen werden, welche hochqualifiziertes technologisches Wissen erfordern. Es wird aber auch diskutiert, inwieweit Betreuungspersonal für Fahrgäste und Güter notwendig ist. Angesichts der negativen Auswirkungen von AVs könnte es ein riskanter Schritt sein, die Entwicklung einer AV-zentrierten Infrastruktur im Verkehrssystem heute politisch zu unterstützen. Während die Technologie verfügbar ist, werden aufgrund der hohen Unsicherheit über die öffentliche Wahrnehmung fast keine grossstädtischen Planungsbemühungen öffentlich bekannt gegeben (Guerra, 2016). Es wird vermutet, dass regulatorische Massnahmen ergriffen werden müssen, um mögliche negative Auswirkungen der Nutzung von AVs abzumildern (Anderson *et al.*, 2016; Lamotte *et al.*, 2016). Es wird aber auch argumentiert, dass "aggressive regulatorische Massnahmen verfrüht sind und wahrscheinlich mehr schaden als nützen können" (Anderson *et al.*, 2016).

Verhaltensbarrieren werden durch den Willen und die Motivation der Menschen definiert, mit automatisierten Fahrzeugen zu interagieren. In einem frühen Stadium könnten Menschen mit hohem Interesse an der Technologie die einzigen Anwender sein. Die fortschreitende Kostensenkung und die erhöhte Verfügbarkeit könnten die AVs letztendlich jedoch attraktiver machen als herkömmliche Transportmittel (Chen, 2015; Mosquet *et al.*, 2015). Auch wenn es an dieser Stelle die rationale Wahl sein mag AVs zu verwenden, ist es nicht klar, ob die Leute tatsächlich wechseln wollen. Schliesslich scheint es, dass die Bindung an das eigene Auto als Statussymbol eine Herausforderung für die gross angelegte Einführung automatisierter Fahrzeuge sein könnte (Krueger *et al.*, 2016). Andererseits könnte sich der Besitz eines eigenen automatisierten Autos als noch grösseres Statussymbol herausstellen, wenn AVs als Privatfahrzeuge genutzt werden. Auch hier liegt die eigentliche Herausforderung in dem Weg auf welchem die volle Automatisierung erreicht wird. Solange der konventionelle Verkehr die Mehrheit auf der Strasse ausmacht, werden Verhaltensaspekte eine hemmende Wirkung auf die Akzeptanz von AVs haben. Sobald ein grosser Teil der Automatisierung erreicht ist, wird es einfacher sein, für Infrastruktur-, Steuer- und Preisentscheidungen zu argumentieren, welche automatisierte Fahrzeuge bevorzugen.

Betrachtet man diese grossen Barrieren, wird deutlich, dass die Einführung von AVs bei weitem kein linearer Prozess sein wird. Abhängig von den zukünftigen Entwicklungen in

einer Vielzahl von Aspekten können sowohl sehr optimistische Szenarien mit schnellen Akzeptanzraten sowie auch sehr konservative Szenarien mit minimaler Diffusion als möglich betrachtet werden. Die Haupttreiber sind Technologie, Politik, persönliche Einstellungen, Wirtschaft und Umwelt laut Milakis *et al.* (2015), ebenso erwähnen Maunsell *et al.* (2014) Standards, Skepsis der Fahrer und Fahrerinnen, Kundenrechte und regulatorische Entscheidungen als wesentliche Stolpersteine. Generell sollte es viel schwieriger sein, genau vorherzusagen, wie der Adaptionsprozess aussehen wird (Fraedrich *et al.*, 2015), als wie die Gesellschaft automatisierte Fahrzeuge nutzen wird, wenn sie umfassend verfügbar sind. Daher wird sich dieser Bericht, wenn auch nicht ausschliesslich, auf ein solches Szenario der Hochverfügbarkeit konzentrieren.

Dennoch ist ein solches Szenario mit grosser Unsicherheit behaftet, da die Aussichten stark von Rebound-Effekten geprägt sind. Zum Beispiel könnte ein billiger AV-Dienst die Nutzer von konventionellen Fahrzeugen anziehen, was die Kapazität im Strassennetz durch kleinere Entfernungen zwischen den Fahrzeugen (Shi und Prevedouros, 2016) und intelligente Kreuzungen (Yang, 2016) drastisch erhöhen könnte. Wenn der Dienst jedoch für die Nutzer des öffentlichen Nahverkehrs ähnlich attraktiv ist, könnte ihre Wahl des Verkehrsmittels zu einem Anstieg der Nachfrage an AV-Fahrten und mehr Fahrzeugen auf der Strasse führen (Litman, 2014), die letzten Endes um die Kapazität konkurrieren. Daher ist es notwendig, die Nettoeffekte der Einführung von AVs mit vielen Komponenten des Verkehrssystems zu untersuchen, und AVs nicht nur als isoliertes System zu betrachten. Für die Beurteilung der Auswirkungen von automatisierten Fahrzeugen auf das Verkehrsumfeld ist das Verständnis und die Quantifizierung dieser Gleichgewichte eine entscheidende Aufgabe.

2.1.3 Methodik

Die Forschung rund um automatisierte Fahrzeuge wird mit verschiedenen Methoden durchgeführt. Durch die Kombination der verschiedenen Ergebnisse ist es möglich, Szenarien zu erstellen, die durch qualitative Argumente und Vorhersagen gestützt werden und gleichzeitig Zahlen und Messwerte liefern, die mit diesen Perspektiven übereinstimmen. Die verschiedenen verwendeten Techniken lassen sich grob wie folgt kategorisieren:

Narrative Ansätze, die vor allem auf Vorerfahrungen, Expertenmeinungen und Argumentationen beruhen, bilden die Grundlage der Forschung. Durch die Untersuchung ähnlicher technologischer Entwicklungen in der Vergangenheit, können unter der Einschätzung der Vorteile von AVs und die Ableitung von Umsetzungsmöglichkeiten Zukunftsszenarien erarbeitet werden. Einflussreiche Beispiele sind Litman (2014), Anderson *et al.* (2016) und Fagnant und Kockelman (2015).

Historische Daten können auf statistische Weise genutzt werden, um Einblicke in den Adaptionsprozess zu erhalten. Durch die Untersuchung früherer Diffusionsprozesse bestimmter Technologien kann der Einsatz von AVs vorhergesagt und wahrscheinliche Zeiträume können abgeleitet werden (Lavasani *et al.*, 2016; Nieuwenhuijsen, 2015; Silberg *et al.*, 2013). Darüber hinaus werden Aggregationstechniken von Webseiten, Blogs und Twitter eingesetzt, um öffentliche Meinungen und Bedenken zum Thema statistisch zu erfassen (Bazilinskyy *et al.*, 2015).

Fragebögen und Umfragen ermöglichen die Generierung von Daten, welche die Motivation der Menschen, einschliesslich akzeptabler Preisstrukturen von AVs, ihren Willen, ihr Privat- oder Familienauto aufzugeben, ihre erwarteten Nutzungsmuster und ihre allgemeine Einstellung zur neuen Technologie untersuchen. Als Voraussetzung für aussagekräftige Stated-Choice Experimente sind gut durchdachte Szenarien notwendig, die durch die Kombination der Erkenntnisse aus den narrativen Ansätzen entstehen. Einen Überblick über bestehende Erhebungen geben Becker und Axhausen (2016). Weitere Ergebnisse wurden durch Befragungen von Verkehrsplanern (Gruel und Stanford, 2016) und internationalen Verkehrsexperten (Alessandrini *et al.*, 2015) erzielt.

Simulationen bieten die Möglichkeit, spezifische Szenarien zu testen und somit quantitative Erkenntnisse über den Einsatz von AVs zu gewinnen. Wie bereits erwähnt, wird die Implementierung automatisierter Fahrzeuge im Verkehrssystem zu einer Vielzahl von gleichzeitigen, sich teilweise aufhebenden und konkurrierenden Effekten führen. Während die qualitative Argumentation ihre Existenz bestätigen kann, sind Simulationen in der Lage, deren Ausmass zu quantifizieren. Um jedoch zu aussagekräftigen Ergebnissen zu kommen, bedarf es realistischer Narrative über AVs sowie konkreter Daten aus Umfragen. Simulationen zu AVs sind zahlreich, angefangen von qualitativen netzwerkbasierten Ansätzen (Gruel und Stanford, 2016) über systemische Optimierungstechniken (Kang *et al.*, 2015) bis hin zur Anwendung agentenbasierter Verkehrsmodelle (Hörl, 2016; Fagnant und Kockelman, 2014; Boesch und Ciari, 2015).

Schliesslich, auch wenn sie noch in den Kinderschuhen stecken, können konkrete Experimente zum Fahrverhalten mittels physischen Simulatoren durchgeführt werden (Jamson *et al.*, 2013). Alternativ werden Experimente durchgeführt, in denen Chauffeur-gefahrene Fahrzeuge den Haushalten AV simulieren (Harb *et al.*, 2017).

2.2 Auswirkungen auf die Mobilität

Automatisierte Fahrzeuge gelten im Vergleich zu etablierten Verkehrsträgern als sehr attraktiv und als disruptive Kraft im Verkehrsmarkt (Maunsell *et al.*, 2014). Dies wird einerseits durch sehr wettbewerbsfähige Preise (Chen, 2015) und andererseits durch erhöhten Komfort und die Möglichkeit, nützliche Aktivitäten auf Reisen auszuüben (Litman, 2014), gefördert. Es wird erwartet, dass sich verschiedene Formen des automatisierten Reisens zu einem universellen Reisemittel von auf Abruf verfügbaren automatisierten Fahrzeugen annähern werden (Enoch, 2015), welcher als eine völlig neue Art der Mobilität angesehen werden kann (Skinner und Bidwell, 2016).

Aus diesen Annahmen lässt sich ein Bild der zukünftigen Verkehrssituation ableiten. Die zu erwartenden Verbesserungen der Mobilität lassen sich vor allem mit der Kapazität erklären, die entweder erhöht wird, was zu einem flüssigeren Verkehrsfluss führt, oder verringert wird, was zu Staus und niedrigeren Fahrgeschwindigkeiten führt. Die Abwägung der Nettoeffekte dieser Einflüsse ist ein integraler Bestandteil der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit und der Wohlfahrtseffekte von AV-bezogenen Massnahmen und Investitionen.

Betrachtet man die schiere Zahl der Fahrzeuge, die zur Deckung des heutigen Bedarfs benötigt werden, so lassen sich zahlreiche Studien zitieren. Sie berücksichtigen zwar meist nicht die induzierte Nachfrage (Weis und Axhausen, 2009; Weis und Axhausen, 2013; Litman, 2016), geben aber einen Einblick in die Grössenordnung der Zahl der Autos, die die Strassen von morgen in Anspruch nehmen werden. Eine Studie der OECD (OECD/ITF, 2015b) kommt zu dem Ergebnis, dass 10 % des heutigen Fuhrparks benötigt werden, um die bestehende Nachfrage in Lissabon, Portugal, zu decken. Ebenso schätzen Bischoff und Maciejewski (2016b), dass 10 Autos in Berlin durch ein Taxi-AV ersetzt werden können, und Fagnant *et al.* (2015) schätzen ein Verhältnis von 9:1 für Austin, Texas. Eine neuere Studie in der gleichen Stadt mit zusätzlichen Simulationskomponenten wie einer Ladeinfrastruktur schätzt, dass 6,8 Pkw durch ein Taxi-AV ersetzt werden können (Chen, 2015). Für Singapur kam eine Studie zu dem Ergebnis, dass 30% der verfügbaren Flottengrösse benötigt würden (Spieser *et al.*, 2014). Für die Region Zürich wurde eine mögliche Reduktion von bis zu 90% der Flottengrösse bestimmt (Boesch *et al.*, 2015).

Eine **Erhöhung der Verkehrskapazität** wird aufgrund verschiedener Faktoren erwartet (Litman, 2014):

- **Vernetzte AV** ermöglichen es den Fahrzeugen, zu kommunizieren und damit den Sicherheitsabstand zu verkürzen (Shi und Prevedouros, 2016). Auch Informationen über Absichten, Beschleunigungen und Bremsungen anderer Fahrzeuge ermöglichen es, Staus zu vermeiden und einen viel besseren Verkehrsfluss als heute zu suggerieren. Ein Beispiel ist die intelligente Steuerung von Kreuzungen (Yang, 2016).

- **Unfälle** reduzieren heute die Strassenkapazität. Angenommen, die AV sind viel sicherer und reduzieren die Anzahl der Unfälle deutlich, wird dies auch eine höhere durchschnittliche Kapazität im Verkehrsnetz ermöglichen. Bertoncello und Wee (2015) erwarten eine Reduktion der Verkehrsunfälle um 90%. Auch Fagnant und Kockelman (2015) deuten darauf hin, dass eine Penetrationsrate von 10% AV zur Hälfte der heutigen Unfälle führen würde, während eine Sättigung von 90%, 90% der Unfälle beseitigen würden.
- Eine **Infrastruktur**, die auf die Unterstützung eines hauptsächlich aus AV bestehenden Verkehrssystems abzielt, wird das Potenzial haben, durch die Nutzung mehrerer AV-Vorteile enorme Kapazitätsgewinne zu erzielen. Dazu gehört die Möglichkeit, selbstständig zu Parkplätzen zu fahren oder die Möglichkeit, Fahrzeuge entsprechend der aktuellen Nachfrage zu einer bestimmten Tageszeit optimal einzusetzen. Diese Infrastrukturänderungen werden in einem späteren Kapitel beschrieben.

Die Anzahl der Fahrten aufgrund der **induzierten Nachfrage** von AVs wird die verfügbare Kapazität verringern. Dies bedeutet, dass durch die Einführung des neuen Reisemittels mehr Fahrten mit unterschiedlichen Eigenschaften unternommen werden und somit das Netz verlangsamt wird, wenn parallel keine weiteren Kapazitätsgewinne stattfinden. Diese induzierte Nachfrage entsteht aus mehreren Gründen:

- Viele der heutigen Hindernisse für die Teilnahme am Verkehrsnetz werden mit der Einführung von AVs beseitigt. Jüngere Menschen, aber auch Personen ohne Führerschein, können individueller reisen, ohne an feste Fahrpläne gebunden zu sein. Ältere Menschen, für die der gleiche Punkt gilt, erhalten einen besseren Zugang zu Reisen, da AVs sie zu Hause abholen können. Gleiches gilt für Menschen mit körperlicher Beeinträchtigung. Daher dürfte die Zahl der Fahrten dieser neu akquirierten Nutzergruppen steigen, was zu einer höheren Nachfrage im Netz führen wird (Litman, 2014).
- Die Verkehrsverlagerung vom Sammelverkehr wie Busse und Bahnen hin zu AV, die voraussichtlich kleinere Fahrgastkapazitäten aufweisen werden, wird eine zusätzliche Nachfrage auf dem Netz erzeugen (Bierstedt *et al.*, 2014). So könnte beispielsweise ein Bus mit 50 Sitzplätzen durch 13 AV mit vier Sitzplätzen ersetzt werden. Da alle Fahrten auf dieser Strecke gleichbleiben, gäbe es 12 zusätzliche Fahrzeuge in Bezug auf die Durchflusskapazität. Unter Berücksichtigung, dass die benötigte Platzkapazität eines Busses im Netzwerk der von drei Autos gleicht, ergibt sich eine Steigerung von 400%. In einer Reihe von Szenarien wird erwartet, dass der öffentliche Verkehr, wie wir ihn heute kennen, verschwindet (Gruel und Stanford, 2016). Für die Stadt Poznan, Polen, kommen Owczarzak und Żak (2015) zu dem Schluss, dass ein nur-AV-Szenario oder AV in Kombination mit bestimmten Buslinien die effektivste Kombination der Reisemodi wäre.
- Der erhöhte Komfort von AVs wird wahrscheinlich mehr Reisen generieren, weil es bequemer zu reisen ist. Während es für manche Menschen heute einfacher sein kann, für Lebensmitteleinkäufe zu Fuss zu gehen, weil man sonst zum Parkplatz gehen müsste, dort mit dem Auto losfahren, einen anderen Parkplatz finden und das gleiche auf dem Rückweg tun müsste, könnte ein Anruf bei einem AV Taxi im Voraus den kritischen Komfort hinzufügen, der den Kunden dazu bringen würde, das Taxi zu benutzen anstatt zu gehen (Christie *et al.*, 2016). Da es sich bei solchen Anwendungsfällen um Kurzstrecken handelt, steht hier nicht der Produktivitätsgewinn im Fahrzeug im Vordergrund, sondern die Wartezeiten und die Zuverlässigkeit der Angebote (Heinrichs und Cyganski, 2015). Spinoulas *et al.* (2015) schätzen, dass eine Erhöhung der AV-Verfügbarkeit um 25% der Generierung neuer Reisen entspricht. Burmeister *et al.* (2014) erwarten einen Anstieg der Reisen um 150%.
- Abhängig vom Servicegrad der AVs werden die Phasen, in denen die AV ohne Passagiere fahren, Kapazität verbrauchen. Wenn zahlreiche leere AVs am Verkehr teilnehmen, z.B. beim Einkaufen für den Kunden oder bei der Parkplatzsuche, sind unter dem Strich effektiv mehr Fahrzeuge unterwegs als bisher.

Da die oben genannten Effekte widersprüchlich sind, ist es nicht klar, ob es im Allgemeinen zu einer Erhöhung oder Verringerung der Strassenkapazität kommen wird.

Dies ist auch unklar, weil man noch nicht weiss, wie die Fahreigenschaften von AVs sein werden. AVs können vielleicht schneller fahren als die heutigen Autos. Die Frage ist jedoch, ob dies tatsächlich gewünscht ist, wenn man bedenkt, dass die Menschen verschiedene Aktivitäten an Bord unternehmen wollen (Diels und Bos, 2016). Le Vine *et al.* (2015) berechnet die AV-Vorteile angesichts der Längs- und Querbeschleunigungsbeschränkungen heutiger Züge sowie der Abstandsregelungen (Le Vine *et al.*, 2016) auf Autobahnen, um den Schluss zu ziehen, dass auch mit diesen Einschränkungen Kapazitätsgewinne möglich sind, diese aber geringer ausfallen können als erwartet. Darüber hinaus können Argumente für eine geringere AV-Geschwindigkeit auch hinsichtlich der Sicherheit für andere Verkehrsteilnehmer vorgebracht werden.

Während Kapazitätsveränderungen positiv oder negativ sein können, wird in der Literatur zu AVs ein Anstieg der gefahrenen Fahrzeugkilometer (VKT, *vehicle kilometres travelled*) prognostiziert. Es gibt zahlreiche Simulationsstudien, die Zahlen für den zu erwartenden Anstieg liefern:

- Bierstedt *et al.* (2014) erwarten eine Erhöhung der VKT von zwischen 5% und 20% bei einem Marktanteil von 50% AV, später sogar bis 35%.
- Chen (2015) schätzt ein Anstieg in derselben Grössenordnung, zwischen 7% und 14%.
- Fagnant *et al.* (2015) schätzen einen Anstieg von 8% und Fagnant und Kockelman (2015) systemweit bis zu 37% bei 90% Marktanteil.
- Eine Erhöhung der VKT wird auch von Hörl *et al.* (2016) und Gruel und Stanford (2016) erwartet.

Automatisierte Fahrzeuge sollen in Gebieten mit hohem Verkehrsaufkommen am effizientesten sein (Bischoff und Maciejewski, 2016a), was in städtischen Gebieten der Fall ist. Daher werden ihre Auswirkungen auf die Stadtplanung im nächsten Abschnitt untersucht.

2.3 Auswirkungen auf die Stadtplanung

Heute ist klar, dass die zunehmende Automatisierung bestimmen wird, wie Städte in Zukunft geplant, verändert und gebaut werden. Zu den erwarteten Effekten gehören die Entfernung der meisten Verkehrszeichen und Ampeln und die Sanierung verlassener Parkplätze, wie eine aktuelle Fallstudie aus Grossbritannien zeigt (Skinner und Bidwell, 2016). Während AVs nur eine Komponente dieses Prozesses sind, kann eine Vielzahl der zu erwartenden Effekte auf sie zurückgeführt werden. Ebenso wird die Art und Weise, wie Städte heute strukturiert sind, vor allem Einfluss darauf haben, wie schnell und effizient AV zugelassen werden können (Fourie *et al.*, 2018). Wahrscheinlich müssen sich AVs am Anfang an die aktuelle Situation anpassen, während Planer und Entwickler dann die Stadt für den Einsatz von AVs gestalten können, sobald sie zu einem festen Bestandteil des städtischen Lebens werden. Dazu gehören Infrastrukturentscheidungen, die Umstrukturierung der Raumnutzung sowie die Nutzung positiver Auswirkungen auf die Umwelt.

2.3.1 Infrastruktur

Die städtische Infrastruktur ist ein limitierender Faktor für den Einsatz von AVs. Je verständlicher und berechenbarer eine Verkehrsumgebung für ein AV ist, desto einfacher wird es sein, in diesem Bereich zu operieren und desto schneller wird es sich durchsetzen. Die bestehende Infrastruktur und Investitionen in die Infrastruktur werden daher die zukünftige Nutzung von AVs massgeblich prägen. Andererseits wird die neue Technologie - vor allem wenn ein erheblicher Anteil an AVs eingeführt wird - Infrastrukturüberlegungen leiten und grosse gesellschaftliche Vorteile bieten.

- Gerade in stark überlasteten Gebieten werden **Parkplätze** voraussichtlich verschwinden, entweder um Platz für zusätzlichen Strassenraum zu schaffen oder um für eine ganz andere Nutzung umgerüstet zu werden. Dies ist möglich, da AVs nicht am Zielort des Nutzers bleiben müssen. Entweder kehren sie zu strategisch günstig gelegenen **Mobility Hubs** zurück oder durchstreifen die Stadt. In diesem Fall schätzen Zhang *et al.* (2015) eine Reduzierung der Parkplätze für AV-Nutzer bei geringen Gesamtanteilen im Stadtgebiet um 90%. Da diese Reduktion eine Zunahme der gefahrenen Fahrzeugkilometer pro Tag zur Folge hat, wird argumentiert, dass diese Reduktion teilweise gegen die Bereitstellung einer beträchtlichen Anzahl von Parkplätzen geopfert werden kann. In jedem Fall prognostizieren die meisten Studien einen Rückgang der Parknachfrage, z.B. durch die Möglichkeit, AVs um 15% enger zu packen, Bertoncello und Wee (2015) schätzen eine Reduktion von 5,7 m2 in den USA pro Auto, Skinner und Bidwell (2016) prognostizieren 15-20% mehr entwicklungsfähige Fläche in der Stadt, was der erwarteten Reduktion von Alessandrini *et al.* (2015) um 15% entspricht. Für einen starken Anteil an Taxi-AVs/PAVs (OECD/ITF, 2015b) wird ein Rückgang der Parknachfrage um 80 % erwartet. Darüber hinaus kommen Ambühl *et al.* (2016) zu dem Schluss, dass mit AVs 12% des Strassenraums eingespart werden können, ohne auch nur die Vorteile einer reduzierten Parknachfrage zu berücksichtigen. Tchervenkov *et al.* (2018) rechnen mit einer Reduktion von 22%.
- Im Gegensatz dazu werden **erweiterte Flächen für die Abholung und das Absetzen** von Kunden benötigt. Dies gilt insbesondere für grosse Veranstaltungsorte, wo zu bestimmten Zeiten eine hohe Anzahl von Reisenden erwartet wird.
- Die **Smart City** wird entstehen, die die Verkehrsdaten während der Fahrt verwaltet und Informationen verteilt, um den bestmöglichen Fluss zu ermöglichen. Dazu gehört auch der Einsatz von intelligenten Ampeln, die auf die aktuelle Nachfrage auf den Strassen reagieren. Ausserdem werden automatisierte Kreuzungen diskutiert (Yang, 2016), bei denen überhaupt keine Ampeln benötigt werden, da AVs in der Lage sind, selbstständig zu verhandeln, wer zuerst überquert. Dann ist es jedoch notwendig, den Fussgängern sichere Möglichkeiten der Interaktion mit solchen neuen Möglichkeiten des Verkehrsmanagements zu bieten. Dies führt zur Forderung nach einer anthropozentrischen Stadtentwicklung, die allen Beteiligten gleiche Chancen bietet (Mladenovic und Abbas, 2015; Mladenovic und McPherson, 2016).
- Die fortschreitende **Elektrifizierung** der Städte im Hinblick auf die Ladestationen wird eine entscheidende Unterstützung für den Einsatz von AVs sein. Da sie üblicherweise als elektrisch betrieben angesehen werden, ist die Ladeinfrastruktur nicht nur ein wichtiger Faktor für eine akzeptable Verfügbarkeit, sondern auch für die Art und Weise, wie und wo AVs eingesetzt werden (Maunsell *et al.*, 2014). Dennoch ist nicht klar, wie diese Ladeinfrastruktur aussehen wird. Optionen sind grosse Mobility Hubs, über die Stadt verteilte Stationen oder auch elektrifizierte Strassen, die Autos während der Fahrt aufladen können.

Alles in allem ist klar, dass eine zukünftige Stadt anders aussehen wird als heute und dass neue Entwicklungen im Verkehr, vor allem selbstfahrende Autos, einen grossen Anteil an diesen Veränderungen haben werden. Durch intelligente Infrastrukturentscheidungen können einige offene Fragen zur Mobilität, die bisher gestellt wurden, eingegrenzt werden. Beispielsweise würde durch den Wegfall von Parkplätzen Platz für zusätzliche Fahrspuren geschaffen, die die Strassenkapazität erhöhen und damit der induzierten Nachfrage durch AVs zu bedienen. Maciejewski und Bischoff (2016) stellen fest, dass eine moderate Kapazitätssteigerung von 50% durch die Infrastruktur das Potenzial hat, die Überlastung einer Flotte von AVs deutlich zu verringern. Wenn Städte bei der Kommunikation der teilnehmenden Fahrzeuge ein Mitspracherecht haben, ist es möglich, das Verkehrsnetz stadtweit zu optimieren, anstatt einzelne AVs gegeneinander antreten zu lassen, um den schnellstmöglichen Weg zu finden (Lamotte *et al.*, 2016). Da die Kunden bereit sein könnten, mehr Zeit im Fahrzeug zu verbringen, ist dies eine sinnvolle Option. Ähnliche Ergebnisse finden sich in Levin *et al.* (2016), wo argumentiert wird, dass kleinere AV-Flotten in der Lage sein könnten, die Nachfrage effizienter zu bewältigen als überdimensionierte Szenarien. Die Diskrepanz zwischen der individuellen optimalen Reiseplanung eines Reisenden und der kollektiven optimalen Steuerung ist ein weit

verbreitetes und untersuchtes Phänomen in der Verkehrstechnik (Braess, 1968). Speziell für AVs untersuchen Lamotte *et al.* (2016) die Verteilung der Strassenkapazität auf Anteile automatisierter und nicht automatisierter Verkehrsteilnehmer.

Guerra (2016) stellte jedoch fest, dass AVs nicht Teil der langfristigen Pläne für die Verkehrsinfrastruktur von 25 grossen US-Städten sind, und erklärt, dass die Gedanken über AVs aufgrund der hohen Unsicherheiten, die mit der Technologie verbunden sind, immer noch im Hintergrund diskutiert werden. Werkzeuge zur Beurteilung der qualitativen Auswirkungen einer Einführung von AVs sind in Vorbereitung (Gruel und Stanford, 2016).

2.3.2 Erreichbarkeit

Die Einführung von AVs wird einen grossen Einfluss darauf haben, was die Menschen im städtischen Umfeld und darüber hinaus tun können. Durch das Angebot von Mobilität für neue Nutzergruppen, die Entkopplung von Fahrplänen und die Erhöhung der räumlichen Verfügbarkeit durch das Angebot von Abholdiensten wird es einfacher, mehr Orte im Stadtgebiet zu erreichen bzw. zu nutzen als bisher. Ein grosser Vorteil ist zu sehen, wenn AVs als Mittel betrachtet werden, um die letzte Meile zwischen einem öffentlichen Verkehrsmittel und den Wohnungen oder Arbeitsplätzen der Menschen zurückzulegen (Litman, 2014).

Einerseits führt dies, wie bereits beschrieben, zu einer induzierten Nachfrage und könnte sich negativ auf die Reisegeschwindigkeit auswirken. Andererseits ist die erhöhte Zugänglichkeit ein grosser gesellschaftlicher Nutzen von AVs. Insofern können beide Entwicklungen als Antagonisten angesehen werden, wenn keine infrastrukturellen Veränderungen vorgenommen werden (Meyer *et al.*, 2016). Aus gesellschaftlicher Sicht wird es daher eine Herausforderung sein, erwartete Erreichbarkeitsgewinne (neben den anderen Vorteilen von AVs) mit erwarteten Geschwindigkeitsverlusten durch Staus auszugleichen.

Schliesslich muss man darüber nachdenken, wie die erhöhte Erreichbarkeit das Verhalten und die Entscheidungsfindung der Menschen verändern wird. Eine wahrscheinliche Entwicklung ist, dass AVs die Zersiedelung der Städte stark fördern und die Motivation geben, sich ausserhalb der überfüllten Stadtzentren in die benachbarten Gebiete zu bewegen (Anderson *et al.*, 2016; Litman, 2014), aber siehe Rotermund, Bodenmann und Axhausen, 2018 für weniger dramatische Ergebnisse. Dies, wenn keine massgeschneiderten politischen Entscheidungen getroffen werden, wird die Art und Weise, wie sich die städtische Umwelt verändert und was tatsächlich als "städtische Umwelt" betrachtet werden kann, drastisch verändern.

2.3.3 Umwelt und Emissionen

Betrachtet man die AVs aus ökologischer Sicht, so lassen sich einige positive und negative Effekte aufzeigen.

Wenn die AVs elektrisch angetrieben werden, kann ihre Reduzierung der **CO2-Emissionen** als ein grosser positiver Effekt auf die Umwelt mit dem richtigen Mix der Stromerzeugung gesehen werden. Dennoch stellt sich die Frage, wie diese Energie erzeugt wird, wenn der Bedarf an elektrischer Energie durch eine Vielzahl von AVs erhöht wird. Während die Netto-Emissionen wahrscheinlich sinken werden, ist nicht klar, ob diese Auswirkungen so gross sind wie gedacht. Am Ende hängt der effektive Nutzen stark von der Entwicklung nachhaltiger Formen der Energieerzeugung ab (Greenblatt und Shaheen, 2015).

Darüber hinaus ist durch den Einsatz von Elektromotoren eine Reduzierung der **Geräuschemissionen** bei niedrigeren Geschwindigkeiten möglich. Dies kann dazu führen, dass Strassen in der Nähe von Wohngebieten gebaut werden und gleichzeitig die Entfernungen, die man zurücklegen muss, verringert werden. Der Bodenwert für Gebiete, die heute in der Nähe von Autobahnen liegen, dürfte steigen.

Damit verbunden sind die Reduzierung von **Lichtemissionen** und die Einsparung von **elektrischer Energie**. Da AVs auf Sensoren angewiesen sind, die nicht unbedingt Licht auf der Strasse benötigen, wie es heute der Mensch tut, ist es möglich, dass Tunnel und ähnliche Strukturen ohne Beleuchtung und damit mit grosser Energieeinsparung betrieben werden können. Und wenn die notwendigen Vorkehrungen für die Sicherheit von Fussgängern, Radfahrern und nicht automatisierten Fahrzeugen getroffen werden können, könnte das Nachtfahren ohne Licht Realität werden.

Fasst man die Umweltauswirkungen von AVs zusammen, kann man sagen, dass sie allgemein als eine positive Entwicklung angesehen werden. Thomopoulos und Givoni (2015) geben jedoch an, dass positive Effekte nur dann sichtbar werden, wenn AVs gemeinsam genutzt werden, ähnlich wie Simulationsergebnisse von Wadud *et al.* (2016), bei denen sich die Emissionen je nach Nutzungsszenario der AVs halbieren oder verdoppeln können.

2.4 Auswirkungen auf die Automobilindustrie

Generell werden automatisierte Fahrzeuge als disruptive Kraft betrachtet, die erhebliche Auswirkungen auf Wirtschaft und Industrie haben werden. Der Hauptgrund dafür ist, dass sich einige innovative Entwicklungen und Gedankenexperimente der letzten Jahre in der Umsetzung von AVs angesammelt haben. Diese reichen von Elektrofahrzeugen, zunehmender Automatisierung, künstlicher Intelligenz, Nachhaltigkeit bis hin zur Entstehung der Sharing Economy und On-Demand-Kultur. Vor diesem Hintergrund werden in den folgenden Abschnitten Szenarien behandelt, wie AVs hergestellt und gewartet werden, wie und von wem sie betrieben werden und wie rechtliche und ethische Fragen aus Sicht der Automobilindustrie zu einem Konsens gebracht werden können.

2.4.1 Produzent, Betreiber, Eigentümer

Die Produktion und Forschung für AVs erfolgt sowohl in Start-ups als auch bei etablierten Automobilherstellern. Während Start-ups die Möglichkeit haben, neue Konzepte mit der Aussicht auf ein Scheitern auszuprobieren, müssen die Automobilhersteller konservativere Arbeit leisten, um eine stabile wirtschaftliche Situation aufrechterhalten zu können. Aufgrund des grossen technologischen Fortschritts forschen die etablierten Unternehmen jedoch zunehmend an selbstfahrenden Autos, da das öffentliche Interesse und die Machbarkeit deutlich wird. Die grosse Frage ist, ob die Automobilhersteller schliesslich die Führung übernehmen werden, weil die Kunden mehr Vertrauen in ihre Arbeit haben, oder ob die inspirierenden Konzepte kleinerer Start-Up-Unternehmen den Markt schnell besetzen und keinen Platz für etablierte Unternehmen lassen. Vorerst wurde festgestellt, dass das Vertrauen in die AV-Technologie bei neuen Start-up-Unternehmen höher ist (Silberg *et al.*, 2013).

Der Automobilhersteller in einem Zukunftsszenario mit AVs ist in verschiedenen Rollen zu sehen:

- Es wird die klassische **Herstellerrolle** beibehalten, bei der die Autos den Kunden als Ware zur Verfügung gestellt werden, die pro Einheit bezahlt wird. Mit Blick auf die voraussichtliche Entwicklung des Mitfahrmarktes ist es wahrscheinlich, dass nicht einzelne Fahrzeuge an Kunden verkauft werden, sondern ganze Flotten an Dritte ausgeliefert werden. Diese könnten in den Bereichen *Carsharing*, Mitfahrgelegenheiten oder als Zustelldienste tätig werden. Der spezifische Anwendungsfall des AVs wird vom Betreiber definiert.
- Aus diesem Grund wird der Automobilhersteller stärker als heute als erster Ansprechpartner fungieren. Bertoncello und Wee (2015) geben an, dass 60% der Kunden bereit wären, die Wartungsempfehlungen ihres automatisierten Fahrzeugs zu befolgen, welches der Autohersteller selbst sein könnte. Die in die Autos eingebaute Technik kann so kompliziert werden, dass nur der Hersteller eines bestimmten Autos weiss, wie er einen bestimmten Fehler zu beheben hat. Zudem dürften sich die Automobilhersteller stärker auf die **Software** der zur Verfügung gestellten Fahrzeuge konzentrieren. Bei stetigen Veränderungen in der

Fahrzeug-zu-Fahrzeug- und Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation können häufige Aktualisierungen notwendig sein. In gewisser Weise würde die Einführung eines neuen AVs starke Ähnlichkeiten mit der heutigen Veröffentlichung eines Smartphones aufweisen, bei dem der Kunde nicht nur das aktuelle Telefon kauft, sondern auch die Aussicht auf zukünftige Updates. Nach dieser Vision wird die Software, die in einem AV eingebaut ist, wahrscheinlich schwieriger zu handhaben sein als die Hardware, die zunehmend an Lieferanten ausgelagert werden könnte.

- Einen Schritt weitergehend könnte der Automobilhersteller vom klassischen Verkaufsmodell pro Einheit zu einem servicebasierten Modell übergehen. Als **Dienstleister** würde der Automobilhersteller kein AV verkaufen, sondern AV-Stunden. Der Automobilhersteller wäre dafür verantwortlich, das Fahrzeug mit der entsprechenden Fahrlogik einzurichten, die auf einen einzelnen Benutzer, einen Flottenbetreiber für Taxi-AVs oder noch spezifischere Szenarien zugeschnitten ist. Ein Flottenbetreiber kann "AV-Stunden" von einem Automobilhersteller mit AV-Fahrlogik kaufen, die entweder für dichte Innenstädte oder ländliche Gebiete optimiert ist. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die AVs für die Lieferung von Waren zu programmieren und die Software zur Steuerung des Lieferprozesses bereitzustellen. In diesem Szenario würde sich der Automobilhersteller weitgehend in einen "Softwareentwickler" verwandeln.
- Der letzte Schritt zum Kunden wäre getan, wenn der Automobilhersteller selbst als **Flotten- und Servicebetreiber** auftritt.

Welches Modell in Zukunft dominieren wird, hängt nicht nur von den Absichten der Automobilhersteller ab, sondern auch von den Trends in der gesamten Automobilbranche. Eine wahrscheinliche Entwicklung könnte zum Beispiel sein, dass Lieferanten mit dem Verkauf von Nutzungszeiten für die bereitgestellten Komponenten beginnen (Wallin *et al.*, 2015). Auf diese Weise würde der Hersteller der AVs Sensor-Stunden oder Kamerastunden vom Lieferanten kaufen (Baines *et al.*, 2009). Da sich Lieferanten immer mehr auf die Software und die "Intelligenz" innerhalb ihrer bereitgestellten Komponenten konzentrieren, könnte ein solches Schema wahrscheinlich werden.

Hinsichtlich der Geschwindigkeit der Flottenerneuerung, die an den Kunden weitergegeben wird, gibt es verschiedene Möglichkeiten: Längere Lebenszyklen für AVs können in dem Sinne auftreten, dass die Montage von AVs teuer ist und häufige Software-Updates und Wartungen kostengünstiger sind als der Bau eines neuen Autos. Dies gilt insbesondere angesichts der starken Abhängigkeit von Lieferanten für alle Einzelkomponenten wie LIDAR und Kameras. Andererseits könnten durch eine schnelle Weiterentwicklung der Technologie kürzere Lebenszyklen eintreten. Je nach Anzahl der Wettbewerber im Markt und neuen Entwicklungen in der Fahrzeug-zu-Fahrzeug- und Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Technologie kann der Umsatz schnell sein. Darüber hinaus könnten neue Technologien wie der 3D-Druck den Prozess weiter beschleunigen.

Auch der Verwendungsmodus der AVs muss berücksichtigt werden. Werden AVs als *Car-Sharing* oder *Ride-Sharing*-Fahrzeuge eingesetzt, wird die Nutzung pro Tag intensiviert. In diesem Fall ist eine schnellere Abnutzung des Fahrzeugs wahrscheinlich und könnte neue Anforderungen an den Hersteller stellen.

Das Design eines neuen Fahrzeugs kann auf völlig anderen Kriterien beruhen als heute. Obsoleszenzstrategien können veraltet sein, Fahrzeuge können entweder schwerer (aufgrund von Batterien und Technologie) oder leichter (aufgrund reduzierter Sicherheitsanforderungen) sein. Das eigentliche Aussehen kann an Bedeutung verlieren, da AVs Relevanz als Statussymbol verlieren werden (Krueger *et al.*, 2016).

Aus Kundensicht ist noch nicht klar, wer in der AV-Wirtschaft die unterschiedlichen Aufgaben übernehmen wird:

- Die **Wartung** der AVs kann entweder so durchgeführt werden wie heute - mit eigenen Werkstätten, an die sich die Kunden wenden können - oder sie kann durch das produzierende Unternehmen oder einen grossen Servicebetrieb durchgeführt werden. Die Technik wird wahrscheinlich so kompliziert werden, dass es die

Aufgabe des Herstellers sein wird, sich um alle Probleme im Fahrzeug zu kümmern. Ausserdem werden kleine Werkstätten wahrscheinlich verschwinden, wenn AVs in der Lage sind, Ausfälle zu erkennen und sich selbst in eine Werkstatt zu fahren. In einer stark vernetzten Umgebung, in der klar ist, wann und wo Reparaturplätze verfügbar sind, könnte die Wartung hochgradig optimiert und zentralisiert werden. Zudem werden für den eigentlichen Kunden Defekte weniger relevant, da ein On-Demand-Service in der Lage wäre, ihm schnell ein anderes Fahrzeug zur Verfügung zu stellen.

- Eine weitere Frage ist das **Eigentum**. In den vorangegangenen Kapiteln wurden bereits verschiedene Nutzungsmodelle vorgestellt, bei denen entweder Einzelpersonen, Familien, Interessengruppen oder die Öffentlichkeit eine AV Flotte gemeinsam nutzen (Silberg *et al.*, 2013). Insbesondere für Familienhaushalte wurde auf eine deutliche Überschneidung der Fahrten hingewiesen (Schoettle und Sivak, 2015), bei der die einzelnen Fahrten der Familienmitglieder ohne gegenseitige Beeinträchtigung geplant werden konnten. Diese Systeme beantworten jedoch nur indirekt die Frage des Eigentums. Selbst wenn sich eine Familie oder Gruppe für ein AV entscheidet, kann dies als Dienstleistung angeboten werden. Angesichts der Tatsache, dass AVs verwaltet werden müssen, um die Bedürfnisse aller Teilnehmer zu befriedigen, könnte diese Aufgabe einem Betreiber übertragen werden, der auch das Eigentum an dem AV haben könnte.
- In engem Zusammenhang mit dieser Frage steht die Frage, inwieweit private Unternehmen oder der öffentliche Sektor in den Betrieb des Systems einbezogen werden sollten, da AVs als allgemeine Dienstleistung für die Gesellschaft genutzt werden. Während zunächst private Betreiber auftauchen dürften (wie es heute beim Car-Sharing der Fall ist), könnte es von Vorteil sein, eine automatisierte Mobilität durch die öffentliche Hand zu betreiben (Lamotte *et al.*, 2016). Dies wird nicht nur zu einer Vereinheitlichung der Standards für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug- bzw. Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation führen, sondern könnte auch dazu führen, dass die Behörden Regelungen für die Zuweisung von Fahrzeugen, die Streckenführung für die Erhebung von Steuern und generell für ein Verkehrsumfeld schaffen, das einem sozialen Optimum nahekommt (Bonnefon *et al.*, 2016). Schliesslich stellt sich für die Infrastruktur, die für den Betrieb von AVs benötigt wird, die gleiche Frage.

Zusammenfassend kann man sagen, dass bei der Herstellung von AVs etablierte Unternehmen und innovative Start-ups im Wettbewerb um den Markt stehen. Auf jeden Fall wird die Kombination von Wissen und Erfahrung aus beiden die Entwicklung und Einführung von selbstfahrenden Fahrzeugen am ehesten beschleunigen.

Die Notwendigkeit drastischer Veränderungen in der Infrastruktur wirft die Frage auf, wer dafür bezahlen wird. Während die Behörden ein Interesse daran haben, eine stabile Verkehrsinfrastruktur bereitzustellen, muss mehr getan werden, um sie von den Vorteilen von AVs zu überzeugen. Ein Problem in diesem Zusammenhang ist derzeit die Unreife verbindlicher Standards in der Fahrzeug-ICT, die bald gelöst werden muss. So untersuchen Mersky und Samaras (2016) neue Ansätze des Fahrzyklus-Tests in einem Szenario, in dem der Nutzen für das Auto besonders berücksichtigt werden sollte.

2.4.2 Recht, Haftung und Versicherung

Wie bereits erwähnt, kann die Geschwindigkeit und Beschleunigung von AVs durch die Benutzerpräferenzen begrenzt sein (Le Rebe *et al.*, 2016). Besonders auf dem Weg zur vollen Automatisierung werden grosse Bedenken hinsichtlich der Verlagerung der Automatik auf die Steuerung geäussert, wenn die Autos nicht automatisiert ("Level 5") sind (Louw *et al.*, 2015; Aria *et al.*, 2016; Merat und Jamson, 2009). Dies wiederum wirft die Frage auf, welche Verantwortung die AV-Hersteller tragen und inwieweit sie für eventuelle Abstürze verantwortlich gemacht werden können. Da die Forschung zu Sicherheitsmassnahmen in einem automatisierten Fahrzeug erst am Anfang steht, zögern die Hersteller, aufgrund ungeklärter Haftungsfragen verbindliche Mandate zur Einführung dieser Massnahmen in ihr Fahrzeug zu akzeptieren (Anderson *et al.*, 2016).

Die Haftung für Hersteller wird zunächst auf der Grundlage der spezifischen Basistechnologie wie Navigation und Kollisionsvermeidung erwartet (Lederman *et al.*, 2016), während sie sich schrittweise über den gesamten Fahrzeugbetrieb erstreckt (Anderson *et al.*, 2016). Umfangreiche Analysen zu Versicherung und Haftung liegen bereits vor (Sheriff, 2016; Yeomans, 2014; Schellekens, 2015).

Die allgemeine Tendenz in diesen Artikeln ist, dass Unfälle mit AVs eine moralische Komponente haben werden (Goodall, 2014a; Goodall, 2014b). In diesem Zusammenhang wird nicht nur darüber nachgedacht, wer im Falle eines Unfalls zu zahlen hat, sondern auch darüber, wie man moralisch verantwortet, welche Massnahmen zu ergreifen sind, da entweder der Fahrer oder Dritte ausserhalb des Fahrzeugs stark gefährdet sind (Bonnefon *et al.*, 2016; Hevelke und Nida-Rümelin, 2015). Die Einigung über diese Probleme ist noch nicht erreicht.

2.5 Auswirkungen auf die Arbeitsorganisation

Der allgemeine Trend zu einer zunehmend vernetzten Gesellschaft ermöglicht mehr Flexibilität bei der Wahl der Arbeitszeiten. Da durch die Automatisierung grössere Teile der Arbeit online erledigt werden können, ist die Notwendigkeit der physischen Anwesenheit an einem bestimmten Arbeitsplatz nicht mehr zwingend erforderlich. Während die derzeitige Verkehrsinfrastruktur eine Verlagerung hin zu einer solchen Flexibilität durch frühere und spätere Transitmöglichkeiten erlaubt, dürften die AVs von diesen Entwicklungen profitieren (Litman, 2014). Vor allem Unternehmen, die stark von der Reisetätigkeit ihrer Mitarbeiter abhängig sind, könnten von der Einführung von AVs profitieren, da einige Arbeiten nicht in einem zentralen Büro, sondern im Fahrzeug erledigt werden können.

Durch die Möglichkeit des AVs Nutzer abzuholen, wird das Einzugsgebiet eines Arbeitsplatzes vergrössert, sowie die Anzahl der Arbeitsplatzmöglichkeiten, die ein Arbeitnehmer von zu Hause aus hat. Dadurch werden die allgemeine Erreichbarkeit erhöht (Meyer *et al.*, 2016) und längere Arbeitswege toleriert (Shanker *et al.*, 2013). Das kann einerseits zu einer Zersiedelung führen, die die Menschen weiter weg von städtischen Arbeitszentren leben lässt als heute. Andererseits ermöglicht sie auch die Verlagerung von Unternehmen in die Aussenregionen einer Stadt, da die Lage an einem zentralen, gut erreichbaren Ort im Stadtzentrum nicht so viel Wert hat wie heute.

Betrachtet man das Szenario aus der entgegengesetzten Perspektive, können AVs die Arbeitseffizienz erhöhen, indem sie dem/der Arbeitnehmer/in mehr Zeit für entspannende Freizeitaktivitäten geben. Bertoncello und Wee (2015) erwarten einen Anstieg der Freizeit um mindestens 50 Minuten pro Tag.

2.6 Auswirkungen auf Mobilitätsprofile

Aus heutiger Sicht gibt es Autos in Privatbesitz, die eine hohe Flexibilität und eine individuelle Reiseplanung ermöglichen. Allerdings muss man erst einmal ein Auto kaufen, jährliche Versicherungsprämien, Wartungskosten, Parkgebühren und Treibstoff bezahlen. All das, ohne dass die im Auto verbrachte Zeit produktiv genutzt werden kann. Öffentliche Verkehrsmittel bieten eine transparentere Preisgestaltung, da sie leichter kontrollierbare Fahrpreise pro Fahrt, Monat oder Jahr ermöglichen. Im Allgemeinen bedeutet dies, dass der Nutzer für die Reise selbst bezahlt und nicht für die blosse Möglichkeit der Mobilität. Der Hauptnachteil des öffentlichen Verkehrs ist die Beschränkung auf ein limitiertes Streckennetz, mögliche Probleme bei der Anreise und der Gestaltung der Haltestellen, die sowohl die zeitliche als auch die räumliche Verfügbarkeit der Mobilität einschränken.

In diesem Zusammenhang kann die Wahl zwischen einem Auto oder einem öffentlichen Verkehrsmittel als eine Frage der Verfügbarkeit angesehen werden. Jüngste Entwicklungen bei On-Demand-Systemen finden hier einen Kompromiss. Bei Nutzung eines Car-Sharing-Service mit ausreichender Flottengrösse können die Nutzer individuelle Fahrten mit Bezahlung pro Nutzung vornehmen. Auch wenn das Problem der zeitlichen und räumlichen Verfügbarkeit nur in einem dichten städtischen Umfeld gelöst werden kann,

ist zu erwarten, dass Car-Sharing in entlegenen Gebieten keine grosse Nachfrage hervorruft, solange es keine umfassende Abdeckung gibt (Litman, 2000).

Automatisierte Fahrzeuge hingegen lösen das Problem der räumlichen Verfügbarkeit, indem sie ermöglichen, dass ein Auto selbstständig zu seinem Nutzer fährt. Gleichzeitig wird damit das Problem der Parkplatzsuche gelöst, da das AV diese Aufgabe selbstständig erledigen kann und auch einen Platz zum Aufladen findet. Daher bauen AVs auf den Vorteilen von Mobility-on-Demand-Diensten auf, jedoch mit erhöhter Verfügbarkeit. Hinzu kommt, dass die Zeit im Fahrzeug effizient mit einer anderen Tätigkeit als dem Autofahren verbracht werden kann, wodurch die Zeit im Fahrzeug wesentlich produktiver und lohnenswerter wird (Litman, 2014).

Bei den privaten AVs muss der Aspekt der Betriebskosten jedoch noch einmal berücksichtigt werden. Während die Preise für AV-Technik voraussichtlich sinken werden, stellt sich die Frage, ob es dann noch attraktiv ist, ein Auto zu besitzen. Selbst in einem nicht automatisierten Szenario mit hochentwickelten Mobility-on-Demand-Diensten, die eine 24/7-Reisemöglichkeit bieten, die durch den Besitz eines Autos gekauft wird, ist dies vielleicht keine rationale Entscheidung mehr. Es wird daher erwartet, dass AVs geteilt genutzt werden.

Unterschiedliche Sharing-Methoden sind jedoch möglich. Eine Perspektive, besonders zu Beginn der Automatisierung der Stufe 5, sind familienbasierte AVs, die jedes Familienmitglied an seinen Schul- oder Arbeitsort fahren und am Nachmittag nacheinander wieder abholen können. Die Zeit dazwischen könnte genutzt werden, um automatisch Besorgungen wie das Abholen von Waren aus dem Lebensmittelgeschäft durchzuführen (Litman, 2014).

Das wahrscheinlichste und vielseitigste Szenario ist die Einführung einer automatisierten Fahrzeugflotten, die als Mobility-on-Demand-Service genutzt werden können. Für einen solchen Aufbau wären Wartezeiten (d.h. zeitliche Verfügbarkeit) der wichtigste Qualitätsfaktor (Heinrichs und Cyganski, 2015). Andererseits würde das Preisschema definieren, welche Nutzergruppen sich am effektivsten an dem neuen Dienst beteiligen (Chen und Kockelman, 2016). Vor allem junge Menschen ohne Führerschein, alte Menschen, die nicht mehr selbst fahren können und körperlich beeinträchtigte Menschen würden ihre Reisemöglichkeiten verbessern. Insofern sollen AVs nicht nur Vorteile für die heutigen Reisen bringen, sondern auch neue generieren. Obwohl dies negative Auswirkungen auf das Verkehrsnetz haben könnte, kann man argumentieren, dass AVs eine grosse gesellschaftliche Rolle bei der Verbesserung der Zugänglichkeit für die gesamte Bevölkerung spielen können. Dies wiederum ist mit der Frage der Haftung verbunden, da die "Handlungspflicht" zur Vermeidung eines Unfalls nicht durchgesetzt werden kann, sobald junge, ältere oder blinde Menschen AVs benutzen dürfen (Hevelke und Nida-Rümelin, 2015). Darüber hinaus kann die Frage gestellt werden, wie viele dieser Fahrten tatsächlich zu 100% automatisiert durchgeführt werden können, da ältere und körperlich beeinträchtigte Fahrgäste möglicherweise noch von einem menschlichen Assistenten unterstützt werden müssen. Selbst in einem Zwischenstadium in Richtung völliger Automatisierung haben AVs das Potenzial, die gegebene Infrastruktur des öffentlichen Nahverkehrs stark zu unterstützen, indem sie als ÖV Zubringer fungieren und den Kunden die Möglichkeit bieten, die letzte Meile von der Haltestelle aus zurückzulegen.

Eine Übersicht und Diskussion über die Literatur zu Verhaltensexperimenten potenzieller AV-Anwender wurde von Becker und Axhausen (2016) bereitgestellt. Die Hauptvorteile von AVs sind weniger Unfälle und Multitasking. Die grössten Bedenken bestehen in den Bereichen Haftung und Versicherung sowie Kontrollverlust im Zusammenhang mit mehreren Verhaltensstudien (Bansal *et al.*, 2016; Howard und Dai, 2014; Mosquet *et al.*, 2015). Akademische Bedenken zur IT-Sicherheit von AVs (King *et al.*, 2016) spiegeln sich auch in Kundenmeinungen wider (Kyriakidis *et al.*, 2015). Weitere Verhaltensexperimente wurden von Piao *et al.* (2016), Krueger *et al.* (2016), Zmud *et al.* (2016), Cyganski *et al.* (2015), Schoettle und Sivak (2014) und Payre *et al.* (2014) durchgeführt.

Spezifische Studien wurden zum Einsatz von AVs in Familien (Schoettle und Sivak, 2015) durchgeführt, die eine starke Überlappung der Fahrten mit einem Anstieg der

Fahrzeugauslastung um 75% zeigen, wenn ein AV pro Familie eingesetzt wird. Auch die Einstellungen älterer Menschen wurden speziell von Souders und Charness (2016) untersucht.

Die Hauptnutzergruppen, die von AVs angezogen werden, sind junge Menschen im städtischen Umfeld (Deloitte, 2014; Becker und Axhausen, 2016) mit einem höheren Anteil von Männern (Becker und Axhausen, 2016) und Nichtfahrern (Sivak und Schoettle, 2015). Zudem hängt die Akzeptanz stark von den sozialen Netzwerken der Kunden ab (Bansal *et al.*, 2016).

Ein allgemeiner Mangel der meisten verfügbaren Studien, wie von Becker und Axhausen (2016) und Nordhoff *et al.* (2016) hervorgehoben, ist, dass hauptsächlich heutige Autofahrer befragt wurden.

2.7 Auswirkungen auf die Logistik

Die Nachfrage im Güterverkehr wird sich bis 2050 weltweit verdreifachen (OECD/ITF, 2015a). Maunsell *et al.* (2014) erwarten, dass die Kosten um 40% gesenkt werden können, sobald vollständig automatisierte Fahrzeuge zur Verfügung stehen:

- Der Hauptbeitrag zu diesen Kürzungen wären die entfallenden Fahrerlöhne, die heute auf 30% der gesamten Transportkosten im Logistiksektor geschätzt werden (Trego und Murray, 2015).
- Das Entfernen des Fahrers aus dem Lieferprozess würde auch Pausen aufgrund von Arbeitszeitbeschränkungen überflüssig machen und somit die gesamte Sendung effizienter machen.
- Dies wiederum führt zu dem Szenario, dass Autobahnen nachts voll sein werden, weil es einfach keinen Grund gibt, die späten Stunden nicht zu nutzen, um grosse Mengen an Gütern mit automatisierten Lastwagen zu bewegen.

Es liegt auf der Hand, dass diese Entwicklungen bei den Beschäftigten in der Logistikbranche zu grossen Sorgen führen werden.

DHL Trend Research (2014) sagt, dass "selbstfahrende Fahrzeuge die Welt der Logistik verändern werden". Es werden verschiedene Anwendungsfälle abgedeckt, von der effizienten Logistik in engen Lagersituationen über Entladevorgänge in Häfen und Logistikzentren bis hin zu Langstreckentransporten mit geringerem Risiko von tödlichen Unfällen und Verspätungen. Ähnlich wie bei den Privatreisenden wird das Problem der letzten Meile aus logistischer Sicht betrachtet: Mit einem automatisierten Zustellfahrzeug konnten Pakete innerhalb kurzer Zeit bei Tag und Nacht direkt vor die Haustür geliefert werden. Mobile Paketstationen, wie sie in bereits heute stationär verfügbar sind, könnten durch die Stadt ziehen, damit die Menschen ihre Sendungen bei ihnen abholen können. Ähnliche Anwendungsfälle werden von Van Meldert und De Boeck (2016), Savelsbergh und Van Woensel (2016), Lee *et al.* (2016) und Flämig (2016) vorgestellt, zusammen mit der allgemeinen Bemerkung, dass wissenschaftliche Literatur über die Auswirkungen von AVs auf die Logistik immer noch knapp ist.

Eine generelle Reduzierung des Güterverkehrs ist durch den Transport von Gütern als Nebenaufgabe der AVs im städtischen Umfeld vorstellbar. Ähnliche Projekte zur Nutzung bestehender ÖV-Linien für die Just-in-time-Lieferung von Gütern werden bereits heute getestet (Kell, 2015). Andererseits sollte das Phänomen der induzierten Nachfrage auch auf den Frachtsektor übertragen werden: Wenn es für den Kunden günstiger und bequemer wird, Dinge zu versenden, ist mit einer Zunahme der Lieferungen zu rechnen. Betrachtet man die Just-in-time-Lieferdienste, wie sie sich mit bemannten Fahrzeugen entwickeln (Dinham, 2016), erscheint ein solches Szenario wahrscheinlich. Die Auswirkungen können zweifach sein: Nicht nur die Strassenkapazität des Verkehrsnetzes würde durch mehr Lieferungen aufgebraucht, sondern auch die Kapazität des Logistiknetzes selbst, einschliesslich der Zustellstationen und Logistikzentren. Daher müssen ähnliche Überlegungen wie bei der induzierten Nachfrage im Personentransport in den bestehenden Lieferketten angestellt werden.

Generell kann davon ausgegangen werden, dass eine Trennung zwischen Last-Mile- und Langstreckenlieferungen bestehen bleibt. Die Einführung von AVs wird nichts an der Tatsache ändern, dass grosse Lkw für lange Strecken effizient, aber schwer zu bedienen sind, während agile leichte Transportfahrzeuge weniger kosteneffizient sind als grössere Transportlösungen auf langen Strecken. Dies führt zu dem Phänomen, dass AVs zwar die Langstrecken- und Last-Mile-Zustellung selbst beschleunigen können, dass man aber bei der Bewertung des Netto-Kundennutzens noch Zeitverluste am Engpass zwischen den beiden Modi berücksichtigen muss (Merchán und Blanco, 2015).

Schliesslich stellt sich die Frage, ob andere Verkehrsmittel erfolgreicher sein werden als automatisierte Strassenfahrzeuge. Vor allem in dichten Stadtgebieten könnte die Einführung von automatisierten Drohnen für die Lieferung von Gütern eine ernsthafte Konkurrenz zu AVs darstellen (Amirtha, 2016).

2.8 Auswirkungen auf Preis und Zahlungsbereitschaften

Letztendlich hängen die zuvor beschriebenen Entwicklungen davon ab, wie viel der Einsatz eines AVs kostet. Bisher wurden zahlreiche Schätzungen vorgenommen, von denen die aktuellsten hier vorgestellt werden.

Bansal *et al.* (2016) schätzen eine durchschnittliche Zahlungsbereitschaft (WTP) für AV-Technologie von $7253 über alle Benutzergruppen hinweg, mit Werten von $5551 und $14589 für zusätzliche Level-4- und Level-5-Automatisierungstechnologie unter den zahlungswilligen Benutzern (Bansal *et al.*, 2016). Mosquet *et al.* (2015) kommen auf einen WTP-Wert von $5000 für das Hinzufügen von automatisierter Fahrtechnik zu den heutigen Fahrzeugen. Mit Blick auf die Taxi-AVs erwartet Chen (2015), dass die AVs zu einem Preis von $0,42 bis $0,49 pro gefahrener Meile, was im Vergleich zu den heutigen Car-Sharing-Diensten konkurrenzfähig ist. Auch Mosquet *et al.* (2015) erwartet, dass gemeinsame AVs mit mindestens 2 Passagieren bis 2035 mit dem öffentlichen Nahverkehr konkurrenzfähig sein werden.

Gemeinsam ist diesen Studien, dass AVs irgendwann billiger werden dürften als herkömmliche Transportmittel (Mosquet *et al.*, 2015). Dies führt zu einer Umstellung der Reisen auf das neue Verkehrsmittel. Dann profitieren die Kunden von einer Reihe von Faktoren, die auch ihr Reiseverhalten prägen.

Das Kostenbewusstsein wird steigen, da sich einfache Preisstrukturen wie z.B. pro Entfernung oder pro Dauer entwickeln werden. Dies bedeutet, dass die Kunden ein viel direkteres Verständnis der Reisekosten haben werden als heute (Chen, 2015). Während bei der unmittelbaren Verkehrsmittelwahl die wahrgenommenen Kosten der tatsächlichen Fahrt am wichtigsten sind, werden die Investitionskosten wie bei einem PKW oft ignoriert oder unterschätzt. Auf der anderen Seite ist es wahrscheinlich, dass Abonnement-Programme erscheinen werden, ähnlich wie die heutigen monatlichen oder jährlichen Angeboten. Dennoch wird die Schätzung und Bewertung der persönlichen Reisekosten im Vergleich zu einem PKW vereinfacht.

Aus Wohlfahrtssicht ist es wichtig, monetäre Anstrengungen gegen Nutzen und Verluste auf gesellschaftlicher Ebene abzuwägen. Dort ist es interessant zu untersuchen, wie wertvoll die in einem AV verbrachte Zeit für den Kunden ist. Dies hängt stark mit dem gebotenen Komfort zusammen und dürfte z.B. mit der Anzahl der Fahrgäste in einem Auto korrelieren. Mit dieser Bewertung wird es möglich sein zu beurteilen, wie viel mehr und/oder längere Fahrten die Kunden im Vergleich zu heute unternehmen werden, was eine Abschätzung der negativen Auswirkungen auf das Verkehrsumfeld ermöglicht. Mit einem konservativen $0,85 pro Meile und einer Bewertung der Verluste aufgrund der Reisezeit auf 30% des heutigen Wertes kommen Chen und Kockelman (2016) auf einen bereits starken Taxi-AV-Anteil von 27%.

3 Spezifische Literaturanalyse

Neben der breit angelegten Literaturanalyse aus dem vorhergehenden Kapitel wurden weitere spezielle Recherchen durchgeführt um einzelne Arbeitsschritte im Projektablauf zu informieren. Zunächst wurde dabei die Literatur zu Befragungen rund um automatisierte Fahrzeuge gesichtet und strukturiert, darauf folgte eine Recherche zu den erwarteten Kapazitätsgewinnen durch automatisierte Fahrzeuge und den aktuellen Simulationsansätzen.

3.1 Verhaltensexperimente

In einer ersten Teilstudie des Projekts wurde eine Literurrecherche zu den bestehenden Befragungen zu den Einstellungen potentieller Kunden zum Automatisierten Fahren durchgeführt. Das folgende Kapitel basiert auf dieser veröffentlichten Studie:

> Becker, F., K.W. Axhausen (2017) Literature review on surveys investigating the acceptance of automated vehicles, *Transportation*, **44** (6), 1293-1306.

3.1.1 Einleitung

Die Einführung selbstfahrender Autos verspricht viele Probleme für heutige Reisende zu lösen, die ihre Fahrzeuge in oft unangenehmen und ermüdenden Verkehrssituationen nutzen. Die grössten Vorteile ergeben sich jedoch für diejenigen, die derzeit keinen Führerschein haben, sei es aus gesundheitlichen Gründen oder aufgrund des Alters. Diese Gruppe von Menschen, von denen viele auf öffentliche Verkehrsmittel auch in abgelegenen Gebieten angewiesen sind, könnten unabhängige und individuelle Transportlösungen angeboten werden. Unter Berücksichtigung zahlreicher Vorteile für Reisende und unter der Annahme, dass der Preis für die Benützung oder den Kauf eines selbstfahrenden Autos die Technologie nicht auf einen kleinen Teil der Bevölkerung beschränkt (Urmson 2016), stellt das aus Kundensicht bestehende grösste Hindernis das Vertrauen in die Technologie dar. Eine Reihe von Studien, die in diesem Kapitel untersucht werden, haben die Teilnehmer daher gefragt, wie wahrscheinlich es wäre, die Technologie zu nutzen, und haben versucht, die Antworten mit den Einstellungen, der Soziodemographie und dem aktuellen Verhalten der Befragten zu verknüpfen. In einer Teilmenge der Studien wurde zwischen verschiedenen Nutzungsarten unterschieden, sei es ein privates automatisiertes Fahrzeug, ein Taxi-AV oder ein PAV. Während ein privates AV unter den Haushaltsmitgliedern geteilt wird, können die beiden anderen Optionen als *on-demand*-Dienste auf variierbaren Strecken betrachtet werden. Im Gegensatz zu Taxi-AVs nehmen *gepoolte* automatisierte Fahrzeuge während der Fahrt andere Fahrgäste auf, was zu Umwegen führen kann (*ridesharing*). Es ist zudem wichtig, die Zahlungsbereitschaft für neue Dienste zu evaluieren, zu welchem Zweck diese genutzt werden, und wann die Befragten sich für einen Wechsel von bestehenden Alternativen entscheiden. Die vorliegende Arbeit zielt darauf ab, einen Überblick über die verschiedenen Dimensionen der Kundennachfrage zu geben, die derzeit untersucht werden, sowie über die angewandten Erhebungsmethoden. Zweitens werden die Ergebnisse, die durch den Einfluss der erklärenden Variablen beeinflusst werden, verglichen, um Ähnlichkeiten und Unterschiede zu erkennen. Nach bestem Wissen der Autoren ist dies der erste Literaturüberblick über Studien, die sich mit der Akzeptanz automatisierter Fahrzeugen beschäftigen.

Nach der Vorstellung der Auswahlkriterien und des Überprüfungsprozesses in Abschnitt 3.1.2 werden Umfang und Methoden der betrachteten Experimente in Abschnitt 3.1.3 verglichen. Der Vergleich der untersuchten Literatur erfolgt in Abschnitt 3.1.4. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse und der identifizierten Forschungslücken finden Sie in Abschnitt 3.1.5.

3.1.2 Methodologie

Da die frühesten Erhebungen zu automatisierten Fahrzeugen aus dem Jahr 2012 stammen, wurden die Studien nicht nach einem bestimmten Zeitrahmen ausgewählt und es wurden alle Publikationstypen einbezogen, um einen breiten Überblick zu schaffen. Aufgrund der erheblichen Auswirkungen von SAE-Level 4 und 5 automatisierten Fahrzeugen (SAE International 2014), die Leerfahrten ermöglichen und keinen Führerschein erfordern, sind Studien, die sich auf Fahrzeuge mit niedrigerem Automatisierungsgrad konzentrieren, ausgeschlossen. Des Weiteren ist die Untersuchung auf englischsprachige Studien beschränkt.

Heterogene Publikationstypen, die in einer breiten Literaturübersicht enthalten sind, erfordern eine Kombination von Datenbankabfragen in *Web of Science* (Thomson Reuters 2016) und *ScienceDirect* (Elsevier 2016) sowie der Anwendung einer rückwärts- und vorwärts Schneeballauswahl. Für verschiedene Abfragen wurden die Wörter *autonomous/automated* und *self-driving*, sowie *car* und *vehicle* als Synonyme in Kombination mit den Begriffen *survey*, *acceptance*, *willingness to pay*, *travel behaviour*, *interview*, *behavioural experiment*, *mode choice* und *stated preferences* genutzt. Entsprechend der Schneeballauswahl wurde rekursiv untersucht, ob die Referenzen der resultierenden Artikel weitere Experimente enthielten. Darüber hinaus wurden weitere Artikel auf Verweise auf die gewonnene Literatur untersucht (vorwärts Schneeballauswahl). Dieses Verfahren ermöglichte die Aufnahme von privaten und wissenschaftlichen Berichten, obwohl die Recherche aus wissenschaftlichen Datenbanken stammt. Nach der Synthetisierung der Metadaten wurden die Studien nach der Art des Experiments kategorisiert, einschliesslich Antwort- und Erklärungsvariablen. Als Hauptantwortvariablen wurden die Akzeptanz, der Modal Split, die Zahlungsbereitschaft und die Wahl zwischen dem Besitz eines AV oder der Nutzung eines Taxidienstes identifiziert. Die Literatur zum induzierten Reise- und Umzugsverhalten ist noch in einem frühen Stadium und sehr heterogen. Ebenso wurden die verwendeten erklärenden Variablen nach der Demographie, dem aktuellen Verhalten, den Einstellungen und den Reiseeigenschaften der Gruppen kategorisiert. Anschliessend wurden die Ergebnisse der Studien verglichen, wie sie sich auf den Einfluss der Variablen bezogen. Das Signifikanzniveau wurde für alle Studien auf 5% festgelegt.

3.1.3 Vergleich von Umfang und Methodik

Wie aus ***Tab. 1*** hervorgeht, wurden die meisten Experimente als Online-Befragungen durchgeführt. Im Gegensatz zu anderen Studien haben Krueger *et al.* (2016) eine *stated preference* Auswahlstudie gewählt, die es ihnen ermöglicht, neue Alternativen mit dem aktuell gewählten Reisemodus in bestimmten Situationen zu vergleichen. Obwohl Payre *et al.* (2014) auch eine Online-Befragung (Stichprobengrösse 421) nutzten, führten sie vor diesem Schritt Interviews mit fünf Probanden und papierbasierte Befragungen mit 45 Probanden durch, um unterschiedliche öffentliche Motivationen und Bedenken zu erörtern. Im Gegensatz dazu haben Zmud *et al.* (2016) durch eine Online-Befragung (Stichprobengrösse 556) allgemeine Informationen gesammelt und anschliessend Interviews mit Befragten durchgeführt, die für die Neuentwicklung offen sind (Stichprobengrösse 44). Dies wurde durch den Wunsch motiviert das Reiseverhalten der Befragten zu analysieren, was bei einer Online-Umfrage schwierig wäre. Mit dem Ziel, Einstellungen, Motivationen und Ängste breit zu erforschen, befragten Silberg *et al.* (2013) 32 Teilnehmer innerhalb von Fokusgruppen nach ihren Meinungen.

Tab. 1 *Metainformationen der berücksichtigten Umfragen*

Referenz	Jahr der Publikation	Art	Methode	Ort	Anzahl Befragte
(Bansal *et al.* 2016)	2016	PRJ	Online-Befragung	Austin, TX	347
(Krueger *et al.* 2016)	2016	PRJ	Online-Befragung – Modus Wahl (Stated Preference)	Australien	435
(Kyriakidis *et al.* 2015)	2015	PRJ	Online-Befragung	109 Länder	4886
(Payre *et al.* 2014)	2014	PRJ	Interview / Papierbasierte Befragung / Online-Befragung	Frankreich	5/45/421
(Bansal und Kockelman 2016a)	2016	Tagungsbericht	Online-Befragung	USA	2167
(Howard und Dai 2014)	2014	Tagungsbericht	Papierbasierte Befragung	Berkeley, CA	107
(Rödel *et al.* 2014)	2014	Tagungsband	Online-Befragung	Salzburg, AT	336
(Brown *et al.* 2014) – Deloitte	2014	Bericht	Keine Angaben	19 Länder	23000
(Continental 2013, 2014)	2013	Bericht	Keine Angaben	Deutschland / USA / Japan / China	Keine Angaben
(Ipsos MORI 2014)	2014	Bericht	Interviews	Vereinigtes Königreich	1001
(J. D. Power 2012)	2012	Bericht	Keine Angaben	USA	17400
(Schoettle und Sivak 2015)	2015	Bericht	Online-Befragung	USA	505
(Schoettle und Sivak 2014)	2014	Bericht	Online-Befragung	USA / Vereinigtes Königreich / Australien	1533
(Seapine Software 2014)	2014	Bericht	Online-Befragung	USA	2039
(Silberg *et al.* 2013)	2013	Bericht	Fokusgruppe	Städte der USA	32
(Zmud Sener und Wagner 2016)	2016	Bericht	Online-Befragung / Interviews	Austin, TX	556

Mit Blick auf die Ziele der einzelnen Studien wird betont, dass die Akzeptanz der neuen Technologie aus sehr unterschiedlichen Richtungen interpretiert und befragt wurde. Dies entspricht der weit gefassten Definition von Adell (2009):

> Der Grad, in dem eine Person beabsichtigt, ein System zu nutzen und, falls vorhanden, das System in ihre Fahrten zu integrieren.

Während Ipsos MORI (2014) die Befragten fragte, ob sie die Technologie für wichtig halten und Continental (2014) fragte, ob die Befragten die Technologie begrüssen würden, stellte jede andere in ***Tab. 1*** aufgeführte Studie eine Frage, die mit der obigen Definition verknüpft werden kann. Bansal *et al.* (2016) differenziert nach der Häufigkeit der Nutzung der Technologie, unter der Annahme, dass Taxi-AVs gemeint sind. Krueger *et al.* (2016) haben eine Modus-Wahl Umfrage durchgeführt, bei der die aktuelle Alternative, Taxi-AVs und PAVs verfügbar waren. Andere hingegen lassen die Befragten die Akzeptanz der Technologie auf einer Skala bewerten (Kyriakidis *et al.* 2015; Payre *et al.* 2014; Zmud *et al.* 2016; Rödel *et al.* 2014). Darüber hinaus kann es Einfluss darauf haben, ob den Befragten die Möglichkeit gegeben wird, zwischen bestehenden Alternativen und der neuen Technologie zu wählen (Schoettle und Sivak 2015; Rödel *et al.* 2014; Kyriakidis *et al.* 2015; Bansal und Kockelman 2016a; Krueger *et al.* 2016) oder nicht.

Geht man davon aus, dass ein Teil der Bevölkerung bereit ist automatisierte Fahrzeuge zu nutzen, stellt sich die Frage: Wie viel sind die Verbraucher bereit, dafür zu zahlen? Während Krueger *et al.* (2016) ein *Mixed-Logit*-Modell im *willingness to pay*-space schätzten, welches alternativenspezifische Zeitwertschätzungen erlaubt, fragten Bansal *et al.* (2016) nach der Häufigkeit der Nutzung in Abhängigkeit vom Preis pro Meile eines Taxi-AV. In den übrigen Experimenten wurde die Zahlungsbereitschaft für ein Premium-Feature, das volle Automatisierung ermöglicht, entweder direkt oder innerhalb von Bandbreiten bewertet (Bansal *et al.* 2016; Kyriakidis *et al.* 2015; Bansal und Kockelman 2016a; J. D. Power 2012; Schoettle und Sivak 2014; Silberg *et al.* 2013). In zwei Studien wurde auch die Wahl zwischen dem Besitz eines selbstfahrenden Fahrzeugs oder der Nutzung eines Fahrzeugs im Rahmen von Taxi-AV- und PAV-Diensten getroffen. In beiden Studien wurden die Befragten direkt befragt, entweder in Fokusgruppen (Silberg *et al.* 2013) oder in *face-to-face*-Interviews (Zmud Sener und Wagner 2016).

Der Umfang, der in ***Tab. 1*** dargestellten Experimente bestand jedoch nicht nur darin, die allgemeine Akzeptanz oder Zahlungsbereitschaft zu ermitteln, sondern auch erklärende Variablen mit den Meinungen der Befragten zu verknüpfen. Jede Studie hat soziodemographische Variablen in den Fragebögen oder als Teil des Interviews aufgenommen. Interessanterweise wurden die Studien von Kyriakidis *et al.* (2015), Brown *et al.* (2014), Continental (2013) und Schoettle und Sivak (2014) in mehreren Ländern durchgeführt und ermöglichen daher die Analyse länderübergreifender Unterschiede, wobei jedoch nur Continental und Schoettle und Sivak (2014) angeben, repräsentative Stichproben zu verwenden. Für die übrigen Studien wurden keine Angaben zu den Gewichtungsverfahren gefunden.

Dennoch fassen Zmud *et al.* (2016) zusammen, dass in früheren Studien die Einstellungsmuster oft mehr Einfluss auf die Technologieübernahme haben als soziodemografische Variablen. Kyriakidis *et al.* (2015) enthielten daher eine zusätzliche Version des *Big Five Inventory* Persönlichkeitstests (Rammstedt und John 2007). Der Schwerpunkt der Studien von Payre *et al.* (2014) und Rödel *et al.* (2014) lag dagegen auf der Verknüpfung von Einstellungen mit der Absicht, automatisierte Fahrzeuge einzusetzen. Payre *et al.* (2014) benutzten beispielsweise den *Locus of Control* (LOC), definiert als das Ausmass, in dem eine Person glaubt, Ereignisse kontrollieren zu können, die sie betreffen (Rotter 1966), und die *driving-related-sensation-seeking* Skala (DRSS) (Delhomme & France 2002; Taubman *et al.* (1996), wie in Payre *et al.* (2014) zitiert. Weiterhin ist zu beachten, dass sowohl Zmud *et al.* (2016) als auch Rödel *et al.* (2014) das *Car Technology Acceptance Model* (Osswald *et al.* 2012) verwenden, welches das *Unified Theory of Acceptance and Use of Technology* (UTAUT) Modell (Venkatesh *et al.* 2003) auf die Technologieakzeptanz von fahrzeugbezogenen Informationssystemen erweitert. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Absicht, automatisierte Fahrzeuge mit dem aktuellen Verhalten der Befragten, insbesondere ihrem aktuellen Fahrzeugtyp, zu verknüpfen, unter Berücksichtigung der Unterscheidung zwischen den enthaltenen Fahrerassistenzsystemen (Silberg *et al.* 2013; Rödel *et al.* 2014; Kyriakidis *et al.* 2015; Schoettle und Sivak 2014; Zmud Sener und Wagner 2016; Krueger *et al.* 2016), oder ob das Fahrzeug als Premiumfahrzeug gilt oder nicht (J.D. Power 2012). Darüber hinaus haben Krueger *et al.* (2016) nach der Nutzungshäufigkeit verschiedener Verkehrsträger unterschieden, während Bansal *et al.* (2016) untersuchten, ob der Fahrer überwiegend selbst fährt.

Weiterhin wurde angedeutet, dass das Fahrverhalten eine wichtige Rolle bei der Akzeptanz von automatisierten Fahrzeugen spielt (Continental 2013; Silberg *et al.* 2013; Bansal *et al.* 2016; Bansal and Kockelman 2016a; Krueger *et al.* 2016), welche bei monotonen Fahrbedingungen, z.B. auf Autobahnen und im Stau, als besonders attraktiv gelten.

3.1.4 Vergleich der Ergebnisse

Der Ergebnisabschnitt ist in zwei Teile gegliedert. Erstens werden die Ergebnisse der allgemeinen Antwortvariablen verglichen und zweitens werden die Schlussfolgerungen der Studien zu den Auswirkungen der erklärenden Variablen gegenübergestellt.

Zusammenfassende Statistiken über die Verteilung der Antwortvariablen sind in ***Tab. 2*** aufgeführt, aus der hervorgeht, dass die allgemeine Meinung oder die Absicht, die Technologie zu nutzen in den einzelnen Studien sehr unterschiedlich ist. In einer britischen Studie hielten nur 18% der 1001 Befragten die Entwicklung für wichtig (Ipsos MORI 2014). Interessanterweise sind die Ergebnisse für US-Studien jedoch ähnlich. In der frühesten betrachteten Studie (2012) würden 37% der Befragten in den USA die Technologie "definitiv" oder "wahrscheinlich" kaufen (J. D. Power 2012). In der Stichprobe von Bansal und Kockelman (2016a, b) wollten 40% der Befragten ein privates automatisiertes Fahrzeug für den täglichen Gebrauch nutzen, während in der Austin-Stichprobe von Zmud *et al.* (2016) diese Zahl auf 50% stieg. Darüber hinaus würden 41% der Austin-Stichprobe von Bansal *et al.* (2016) wöchentlich einen Taxi-AV zu einem wettbewerbsfähigen Preis von 1 USD pro Meile verwenden. Brown *et al.* (2014) berichten, dass 36% der Befragten in den USA die Technologie für wünschenswert erachten. Im einzigen Verkehrsmittelwahlexperiment, welches in Australien durchgeführt wurde, fielen 28,46% der Entscheidungen auf die neuen Alternativen Taxi-AV/PAV (Krueger *et al.* 2016).

Tab. 2 *Ergebnisse: Antwort-Verhalten*

Autor(en), Referenz	Jahr der Publikation	Allgemeine Meinung / Verwendungsabsicht	Verkehrsmittelwahl	Zahlungsbereitschaft	Eigentum gegenüber Taxi-AV/PAV
(Bansal *et al.* 2016)	2016	41% würden einmal in der Woche Taxi-AV verwenden bei einem Preis von 1 USD pro Meile.		Durchschnitt: 7253 USD	Beides untersucht, keine direkte Gegenüberstellung
(Krueger *et al.* 2016)	2016		28.46% der Fahrten mit Taxi-AV/PAV gegenüber aktuellen Modus		
(Kyriakidis *et al.* 2015)	2015	Erfreulich Durchschnitt 3.49/5		Median zwischen 3001 und 5000 USD	
(Payre *et al.* 2014)	2014	68.1% über 4 (7 Lickert) auf der Skala der Benutzerakzeptanz			
(Bansal und Kockelman 2016a)	2016	54.4% als nützlich; 58.4% eingeschüchtert; 40% für tägliche Fahrten		Durchschnitt: 5857 USD	
(Howard und Dai 2014)	2014	40% kaufen oder ausrüsten; 45% würden keine Taxi-AVs auf monatlicher Basis benutzen			Beides untersucht, keine direkte Gegenüberstellung
(Rödel *et al.* 2014)	2014	3.04/6 Verhaltensabsicht um das System zu benutzen			
(Brown *et al.* 2014)	2014	Als wünschenswert angesehen (ca.): DE: 29%, JP: 35%, IN: 48%, CN: 58%, BR: 67%			
(Continental 2013, 2014)	2013	Begrüssung der Technologie: 79% China, 61% Japan, 53% Deutschland, 41% USA		Durchschnitt: 2900 EUR Autobahn Fahrt (Deutschland)	
(Ipsos MORI 2014)	2014	18% sehen die Technologie als wichtig an			
(J. D. Power 2012)	2012	37% würden sie gerne kaufen		20% würden bei einem Preis von 3000 USD kaufen	

Autor(en), Referenz	Jahr der Publikation	Allgemeine Meinung / Verwendungsabsicht	Verkehrsmittelwahl	Zahlungsbereitschaft	Eigentum gegenüber Taxi-AV/PAV
(Schoettle und Sivak 2015)	2015	15.6% bevorzugen Vollautomatisierung			
(Schoettle und Sivak 2014)	2014	Positiver Eindruck: 61.9% Australien, 56.3% USA, 52.2% U.K.		Median 0 USD, 75. Perzentil 1880 USD	
(Seapine Software 2014)	2014	88% besorgt			
(Silberg *et al.* 2013)	2013			Median 4500 USD	50% würden das zweite Auto aufgeben
(Zmud Sener und Wagner 2016)	2016	50% beabsichtigen täglichen Gebrauch			59% bevorzugen privates AV oder Taxi-AV; 23% wollen das Eigentum reduzieren

Bezüglich der Zahlungsbereitschaft der Technologie wurde entweder der Mittelwert, der Median oder die Verteilung (Kyriakidis *et al.* 2015) angegeben. Der Median liegt zwischen 0 USD (Schoettle und Sivak 2014) und 3001-5000 USD (Kyriakidis *et al.* 2015). Zu beachten ist jedoch, dass Kyriakidis *et al.* (2015) mehrere Länder ohne Berücksichtigung der ökonomischen Kaufkraft befragt haben. In zwei US-Studien wurde ein Mittelwert von 5857 USD (Bansal und Kockelman 2016b) und 7253 USD (Bansal *et al.* 2016) angegeben. Es kann festgestellt werden, dass Schoettle und Sivak (2014) sowie Kyriakidis *et al.* (2015) die Einführungssegmente für automatisierte Fahrzeuge kurz gehalten haben. Die Umfrage von Bansal *et al.* (2016) hingegen machte die Befragten auf verschiedene Arten von Dienstleistungen und vielfältige Vorteile aufmerksam und führte die Überlegung ein, dass sich die Befragten langfristig für einen Umzug entscheiden könnten.

Die Ergebnisse von Studien, die die Entscheidung, ein automatisiertes Fahrzeug zu kaufen oder als Taxidienst zu nutzen (siehe auch Becker, Ciari und Axhausen 2016), zeigen, dass dieser Aspekt auf Haushaltsebene analysiert werden sollte. Während sich nur wenige der 32 Befragten vollständig auf Taxidienste verlassen würden, würden 50% der Befragten in der Studie von Silberg *et al.* (2013) auf das zweite Auto des Haushalts verzichten. 23% würden den Fahrzeugbesitz in der Stichprobe von Zmud *et al.* (2016) reduzieren.

In ***Tab. 3*** sind die Auswirkungen soziodemographischer Variablen auf die Meinung über automatisierte Fahrzeuge für die Studien zusammengefasst. In Bezug auf das Geschlecht zeigt die Zusammenfassung in ***Tab. 3***, dass Männer offener für die Technologie sind als Frauen. Die einzige Studie, die diesem Trend widerspricht, ist die von Silberg *et al.* (2013), deren Ergebnisse auf den Meinungen von 32 Teilnehmern beruhen. Zu beachten ist auch, dass die Akzeptanz des Selbstfahrens auf einer Skala von 1 bis 10 gemessen wurde und dass die Mediane zwischen den Geschlechtern am Ende des Experiments nur um 0,75 differieren.

Tab. 3 *Effekt der soziodemographischen Variablen*

Variable	Effekt auf die Einstellung	Abhängige Variable	Quelle	Kommentare
Geschlecht	Positiv – Mann	Verwendungsabsicht; Bedenken	(Schoettle und Sivak 2015)	Männer weniger Bedenken
		Bedenken	(Schoettle und Sivak 2014)	Männer weniger Bedenken
		Zahlungsbereitschaft für Eigentum	(Kyriakidis *et al.* 2015)	Signifikanter Zusammenhang
		Zahlungsbereitschaft für Eigentum, Adoptionszeit	(Bansal *et al.* 2016)	
		Akzeptanz, Verwendungsabsicht	(Payre *et al.* 2014: Rödel *et al.* 2014))	
		Verwendungsabsicht	(Zmud, Sener, und Wagner 2016)	
		Als wichtig erachtet	(Ipsos MORI 2014)	
	Positiv – Frau	Verwendungsabsicht	(Silberg *et al.* 2013)	
	Nicht Sign.	Bedenken	(Seapine Software 2014)	
		Zahlungsbereitschaft für Eigentum	(Bansal *et al.* 2016)	
		Verkehrsmittelwahl	(Krueger *et al.* 2016)	
Alter	Positiv	Verwendungsabsicht	(Rödel *et al.* 2014)	
	Negativ	Zahlungsbereitschaft für Eigentum	(Bansal *et al.* 2016)	
		Bedenken	(Schoettle und Sivak 2015)	Junge Befragte haben weniger Bedenken
		Als wichtig erachtet	(Ipsos MORI 2014)	
		Besorgniss	(Seapine Software 2014)	Junge Befragte sind weniger besorgt: Chi Quadrat-Test durchgeführt anhand der Information im Bericht
		Verwendungsabsicht	(J. D. Power 2012)	Kein Kommentar zur Signifikanz
		Verwendungsabsicht; Bedenken	(Schoettle und Sivak 2014)	Junge Befragte haben weniger Bedenken
	Nicht Sign.	Verwendungsabsicht	(Payre *et al.* 2014; Zmud *et al.* 2016)	
		Adoptionszeit	(Bansal *et al.* 2016)	
		Verkehrsmittelwahl	(Krueger *et al.* 2016)	Ausgenommen 24-29 gegenüber 30-49 Jährig für PAV

(Fortsetzung nächste Seite)

Variable	Effekt auf die Einstellung	Abhängige Variable	Quelle	Kommentare
Einkommen	Positiv	Zahlungsbereitschaft für Eigentum; Adoptionszeit	(Bansal *et al.* 2016)	
		Zahlungsbereitschaft für Eigentum	(Kyriakidis *et al.* 2015)	Signifikanter Zusammenhang
	Nicht Sign.	Verwendungsabsicht	(Schoettle und Sivak 2015)	Befragt, aber nicht berichtet
		Verwendungsabsicht	(Zmud *et al.* 2016)	
Bildung	Nicht Sign.	Verwendungsabsicht	(Zmud *et al.* 2016)	
Kinder	Negativ	Verwendungsabsicht	(Zmud *et al.* 2016)	BIN im Haushalt
	Nicht Sign.	Zahlungsbereitschaft für Eigentum	(Bansal *et al.* 2016)	Anzahl Kinder
		Verkehrsmittelwahl	(Krueger *et al.* 2016)	BIN im Haushalt

Nur Rödel *et al.* (2014) beobachteten eine stärkere Absicht, automatisierte Fahrzeuge mit steigendem Alter einzusetzen (Stichprobengrösse 336). Die Autoren begründeten dies mit den körperlichen Einschränkungen, die älteren Menschen das Fahren verunmöglichen. Sechs weitere Studien kommen zu dem Schluss, dass jüngere Menschen offener für die Einführung automatisierter Fahrzeuge sind. Interessanterweise beobachteten Bansal *et al.* (2016) einen signifikanten negativen Effekt, als die Befragten nach ihrer Zahlungsbereitschaft gefragt wurden, sahen aber keinen signifikanten Effekt, wenn die Adoptionszeit im Vergleich zu derjenigen der Freunde zurückging. Dies führt zu der Frage, ob ältere Menschen einfach nicht geneigt sind, innovativ zu sein, aber die Technologie nach einem kritischen Diffusionspunkt nutzen würden.

Bansal *et al.* (2016), sowie Kyriakidis *et al.* (2015) beobachteten einen signifikant positiven Zusammenhang zwischen Zahlungsbereitschaft und Einkommen der Befragten, wie zu erwarten ist. Da Menschen mit höheren Einkommen mehr Geld zum Experimentieren zur Verfügung haben, ist auch die Vorstellung plausibel, dass diese Menschen die Technologie zu einem früheren Zeitpunkt erwerben (Bansal *et al.* 2016). Befragte mit niedrigeren Einkommen könnten auch daran gewöhnt sein, darauf zu warten, dass sich neue Technologien verbreiten und billiger werden. Keine der Studien zeigte jedoch, dass die Einnahmen einen signifikanten Einfluss auf die Nutzungsabsichten der neuen Technologie hatten.

Die Auswirkungen von Einstellungsvariablen auf die Meinungen über automatisierte Fahrzeuge sind in ***Tab. 4*** dargestellt. Studien, die Informationen und das Bewusstsein für die neue Technologie einbeziehen, kommen eindeutig zu dem Schluss, dass sie sich positiv auf die Meinung auswirkt. Wenn sich die Forscher gegen eine gründliche Einführung in das Thema entschieden haben, lohnt es sich, das aktuelle Wissen über die Technologie zu überprüfen. Payre *et al.* (2014) stellten fest, dass Fahrer, die "Sensation oder Abenteuer" suchen, eher dazu neigen, automatisierte Fahrzeuge zu benutzen. Die Autoren sind jedoch nicht in der Lage, zwischen Abenteuer und blosser Neuheit zu unterscheiden. Sie schlagen auch vor, dass Fahrer, die in erster Linie Neuheit suchen, sich nach einer Adoptionszeit langweilen könnten, da die Fahraufgabe obsolet wird.

Tab. 4 *Effekt der Einstellungsvariablen*

Variable	Effekt	Abhängige Variable	Quelle	Kommentare
Technologisches Bewusstsein	Positiv	Adoptionszeit	(Bansal *et al.* 2016)	Haben von Google-Car gehört
		Verwendungsabsicht	(Silberg *et al.* 2013)	Kein Kommentar zur Signifikanz
		Verwendungsabsicht	(Schoettle und Sivak 2014)	Haben von automatisierten Fahrzeugen gehört
Kontrollüberzeugung	Nicht Sign.	Verwendungsabsicht	(Payre *et al.* 2014)	
Sensationssuche	Positiv	Verwendungsabsicht	(Payre *et al.* 2014)	Driving-related-sensation-seeking scale (DRSS)
Persönlichkeitstest (Big Five – 10 Items)	Nicht Sign.	Fahren in AVs macht Spass, Fahren in AVs ist einfacher als manuelles Fahren, Sorgen um die Datenübertragung, Sorgen um Software-Hacking	(Kyriakidis *et al.* 2015)	«Nicht Substantiell vorhersagend» - Spearman Korrelation zwischen -0.1 und 0.1
Leidenschaft für das Fahren	Negativ	Verwendungsabsicht	(Silberg *et al.* 2013)	Kein Kommentar zur Signifikanz
		Als wichtig erachtet	(Ipsos MORI 2014)	
Akzeptanz fortschrittlicher Fahrsysteme	Positiv	Akzeptanz	(Continental 2013)	Keine Zahlen angegeben

Variablen, die sich auf das aktuelle Mobilitätsverhalten der Befragten beziehen, sind in ***Tab. 4*** dargestellt. Während das Bild für den aktuellen Kilometerstand und die *Carsharing*-Erfahrung nicht eindeutig ist, hat jede Studie, die den Grad der Automatisierung des aktuellen Fahrzeugs untersucht hat, einen positiven Zusammenhang mit der Meinung über selbstfahrende Fahrzeuge festgestellt. Diese Befragten sind nicht nur offen für neue technologische Entwicklungen, sondern haben auch bereits Erfahrungen im Umgang mit Systemen gesammelt, die eine Teilverantwortung für das Fahren übernehmen. Krueger *et al.* (2016) gruppierten die Befragten nach ihrem aktuellen Modal Split und konnten zeigen, dass diejenigen, die mehrere Modi verwenden, eher die neuen Alternativen Taxi-AV und PAV wählen. Es sollte auch darauf hingewiesen werden, dass ein signifikanter positiver Effekt für die Anzahl der Unfälle, an denen eine Person beteiligt war, beobachtet wurde (Bansal *et al.* 2016).

Tab. 5 *Effekt des aktuellen Verhaltens*

Variable	Effekt	Abhängige Variable	Quelle	Kommentare
	Nicht Sign.	Verwendungsabsicht	(Rödel *et al.* 2014)	Fahrhäufigkeit
		Zahlungsbereitschaft für Eigentum; Adoptionszeit	(Bansal *et al.* 2016)	Jährlich gefahrene Fahrzeugmeilen
Car Sharing	Nicht Sign.	Zahlungsbereitschaft für Eigentum	(Bansal *et al.* 2016)	Erfahrungen mit Car Sharing
	Positiv	Verkehrsmittelwahl; PAV	(Krueger *et al.* 2016)	Nutzen derzeit Car Sharing
Derzeitiges Fahrzeug: Level der Automatisierung	Positiv	Verwendungsabsicht	(Silberg *et al.* 2013)	Kein Kommentar zur Signifikanz
		Verwendungsabsicht	(Rödel *et al.* 2014)	Erfahrungen mit fortgeschrittenen Fahrassistenzsystemen
		Verwendungsabsicht	(Schoettle und Sivak 2014)	
		Verwendungsabsicht	(Zmud *et al.* 2016)	
		Zahlungsbereitschaft für Eigentum	(Kyriakidis *et al.* 2015)	Nutzen derzeit ein Auto mit Abstandsregeltempomat
Derzeitiges Fahrzeug: Premium	Positiv	Verwendungsabsicht	(J. D. Power 2012)	Bei einem Preis von 3000 USD
Fahrzeug Verfügbarkeit	Nicht Sign.	Verkehrsmittelwahl	(Krueger *et al.* 2016)	
Verwendung meherer Modi	Positiv	Verkehrsmittelwahl	(Krueger *et al.* 2016)	
Anzahl vergangener Autounfall Erfahrungen	Positiv	Zahlungsbereitschaft für Eigentum, Adoptionszeit	(Bansal *et al.* 2016)	

Zwei Studien kamen zu dem Schluss, dass die Bewohner städtischer Gebiete eher dazu neigen, selbstfahrende Autos zu benutzen. Während sich J. D. Power (2012) auf die Bereitschaft zum Kauf eines AV konzentrierte, untersuchten Bansal *et al.* (2016) den Zeitpunkt der Einführung von Taxi-AVs. Da die Bewohner ländlicher Gebiete lange Wartezeiten und hohe Reisekosten für Fernreisen erwarten, ist es plausibel, dass ein Taxi-Service für die Stadtbewohner attraktiver ist. Continental (2013) und Bansal *et al.* (2016) stellten zudem fest, dass die Befragten die Technologie bevorzugt in monotonen Fahrsituationen wie auf Autobahnen und im Stau einsetzen (***Tab. 6***).

Tab. 6 *Effekt auf die Reisecharakteristiken*

Variable	Effekt	Abhängige Variable	Quelle	Kommentare
Bevölkerungsdichte	Positiv	Verwendungsabsicht	(J.D. Power 2012)	Urbanes Gebiet; Kein Kommentar zur Signifikanz; Preis von 3000 USD
		Adoptionszeit	(Bansal *et al.* 2016)	Urbanes Gebiet
Fahrzweck	Meist nicht Sign.	Verkehrsmittelwahl	(Krueger *et al.* 2016)	
Fahrdistanz	Kein Effekt	Verwendungsabsicht	(Bansal und Kockelman 2016a)	Ungefähr der gleiche Anteil der Befragten würde keine AVs für Kurzstrecken- (<=50 Meilen) und Fernreisen verwenden.
Auf Autobahnen und im überlasteten Verkehr	Positiv	Verwendungsabsicht	(Continental 2013 ; Bansal *et al.* 2016)	
Spezielle Fahrbahnen für AV	Positiv	Verwendungsabsicht	(Silberg *et al.* 2013)	Kein Kommentar zur Signifikanz

3.1.5 Fazit und Ausblick

Trotz der Tatsache, dass diese Technologie der Öffentlichkeit derzeit nicht zugänglich ist und ihr konkreter Einführungstermin noch unklar ist, lassen sich einige Trends durch die Überprüfung von Untersuchungen erkennen, die bereits veröffentlicht wurden. Sie ist offenbar bei jungen Menschen und in der Stadt am beliebtesten; sowohl Männer als auch diejenigen, die derzeit ein Fahrzeug mit fortschrittlichen Fahrerassistenzsystemen besitzen, sind von der Nutzung der Technologie am meisten überzeugt. Ein ähnlicher Effekt wurde bei potenziellen Nutzern beobachtet, die bereits mit Nachrichten über die Technologie in Berührung gekommen sind, die, was nicht überraschend ist, vorzugsweise in monotonen Fahrsituationen eingesetzt werden.

Da viele Studien eine Reihe von verschiedenen Reaktionsvariablen und Prädiktoren gleichzeitig untersuchen, könnten sich zukünftige Experimente auf spezielle Dimensionen der Nachfrage oder Klassen von Prädiktoren konzentrieren. Als Beispiel sei hervorgehoben, dass in den Experimenten von Zmud, Sener und Wagner (2016) einige Befragte Bedenken über Sicherheitsaspekte äusserten, während andere die Erhöhung der Sicherheit als einen der Vorteile von automatisierten Fahrzeugen nannten. Obwohl es schwierig zu quantifizieren ist, wäre es daher interessant, den Zusammenhang zwischen dem Sicherheitsniveau und dem Bevölkerungssegment, das AVs einsetzen will, zu untersuchen. Da die Fahrer nicht mehr die Kontrolle über das Fahrzeug hätten, wird angenommen, dass die Crash-Raten oder Meilen pro Unfall wesentlich niedriger sein sollten als bei den heutigen Autos.

Obwohl in zwei Experimenten (Silberg *et al.* 2013; Zmud *et al.* 2016) die Entscheidung zwischen Eigentum und Taxi-Service angesprochen wurde, sind weitere Einblicke in diese Entscheidung auf Haushaltsebene notwendig. Neben der Wahl der geeigneten Entscheidungseinheit ist es auch wichtig, genau zu prüfen, welche Faktoren im (familiären) Entscheidungsprozess eine Rolle spielen. Die Aussagen der Befragten in der Studie (Silberg *et al.* 2013) führten zu dem Schluss, dass detaillierte Reisepläne und Kosten zu einer Verzerrung rationaler Entscheidungen führen könnten. Wenn man sich mit der Zahlungsbereitschaft für das Hinzufügen der Technologie zu einem Privatfahrzeug befasst, ist es interessant festzustellen, dass die gemeldeten Mittel unter den für 2025 erwarteten Kosten liegen (zwischen 7000 USD und 10.000 USD), aber über den für 2035 prognostizierten Kosten, die voraussichtlich etwa 3000 USD betragen werden (IHS Markit 2014). Angesichts dieser Zahlen ist es offensichtlich, dass Experimente, die Kostenvorhersagen mit der Diffusionstheorie für private AVs kombinieren, das Potenzial

haben, weitere Einblicke in die Adoptionskurve privater automatisierter Fahrzeuge zu liefern.

Obwohl die Leidenschaft für das Fahren (Silberg *et al.* 2013; Ipsos MORI 2014) und die Verkehrsbedingungen (Continental 2013; Bansal *et al.* 2016; Silberg *et al.* 2013) bereits in einigen Experimenten berücksichtigt wurden, kann es sinnvoll sein, in zukünftigen Experimenten beide zu kombinieren. Da auch leidenschaftliche Autofahrer gerne in einem automatisierten Fahrzeug auf ihrer täglichen Fahrt durch Staus gelenkt werden, kann die Leidenschaft für das Fahren auf bestimmte Strassen- und Verkehrsbedingungen beschränkt sein.

Die Studien von Zmud *et al.* (2016) und Bansal *et al.* (2016) zeigten keine wesentlichen Änderungen des Fahrverhaltens durch die Einführung des automatisierten Fahrzeugs. Zmud, Sener und Wagner (2016) beobachteten einen Anstieg nur bei Langstreckenfahrten, aber keine Änderungen im Tagesablauf, den Routen und den Aktivitäten. In der Stichprobe von Bansal *et al.* (2016) haben 74% nicht daran gedacht, auf Grund der neuen Technologie umzuziehen. Dennoch könnten ein erhöhter Komfort und die Möglichkeit, andere Aufgaben als das Fahren zu erledigen, langfristig erhebliche Auswirkungen haben. Es ist möglich, dass Untersuchungen, die sich ausschliesslich auf dieses Thema konzentrieren, in Übereinstimmung mit detaillierten Szenarien zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können.

3.2 Kapazitätsgewinne

Zu Beginn des Projektes wurde eine weitere, fokussierte Literaturrecherche zu den erwarteten Kapazitätseffekten automatisierter Fahrzeuge durchgeführt. Im Folgenden werden die bis dato veröffentlichen Studien in chronologischer Reihenfolge kurz zusammengefasst.

Van der Werf *et al.* (2002) nutzen Monte Carlo Simulationen um die quantitativen Effekte variierender Anteile bestimmter Technologien zu vergleichen. Die Analyse bezieht sich dabei ausschliesslich auf Autobahnen. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass mit einer 100%igen Ausstattung der Fahrzeuge mit V2V (Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation) die Autobahnkapazität verdoppelt werden könnte. Den Effekt der Automatisierung schätzen die Autoren allerdings als relativ gering ein, mit einem Anstieg der Kapazität um nur 10%.

Ni *et al.* (2010) analysieren den Effekt von "*IntelliDrive*" (Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation, V2I) in einem Gipps Modell (*car-following*) durch Anpassung der Reaktionszeiten der Fahrzeuge. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass sich die daraus resultierenden Kapazitäten auf den Autobahnen um ca. 20% - 50% höher sein könnten als im heutigen Zustand.

Tientrakool *et al.* (2011) untersuchen den Effekt von Sensoren zu Detektionskollision, mit und ohne Verfügbarkeit von V2V. Mit Hilfe analytischer Berechnungen der benötigten Sicherheitsabstände zwischen den Fahrzeugen kommen die Autoren zu dem Schluss, dass bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von ca. 100km/h die Kapazität der Autobahnen maximal das 3.7-fache des heutigen Zustands betragen könnte, wenn alle Fahrzeuge mit Detektoren und V2V ausgestattet sind. Ohne V2V schätzt die Studie die zukünftige Kapazität auf das ca. 1.4-fache.

Shladover *et al.* (2012) führen eine Mikrosimulation für Autobahnen durch, in welcher Fahrzeuge entweder mit ACC (*Adaptive Cruise Control*) oder CACC (*Cooperative Adaptive Cruise Control*) ausgestattet sind, es geht also wiederum um eine schlichte Ausstattung mit Sensoren und optionaler Ausstattung mit Technologie zur Fahrzeugkommunikation. Unter der Annahme von 100% CACC im Autobahnverkehr, errechnen die Autoren eine Verdopplung der Strassenkapazität.

Im Gegenteil zu den oben aufgeführten Studien, die sich hauptsächlich mit den Technologieeffekten der Fahrzeugkommunikation beschäftigen, untersucht Friedrich

(2015) erstmals explizit die Kapazitätseffekte automatisierter Fahrzeuge. Basierend auf makroskopischen Untersuchungen zur *traffic flow theory* schätzt die Studie die zu erwartenden Kapazitätssteigerungen für Autobahnen, bzw. im ausserstädtischen Kontext auf ca. 80%. Erstmals wird in der Studie auch explizit auf die Effekte in der Stadt eingegangen, wo, bedingt durch die komplexere Dynamik von Kreuzungen, nur ein Anstieg von ca. 40% angenommen wird.

Aufgrund der konservativen Schätzung von Friedrich (2015), dem Einbezug der bis dato aktuellsten Erkenntnisse und für die Vergleichbarkeit mit bisherigen Studien am IVT (z.B. Meyer *et al.*, 2017) wurden die Zahlen aus letztgenannter Studie als Basis für die vorliegende Arbeit genutzt.

Ein Bericht, der die Kapazitätseffekte automatisierter Fahrzeuge auf das deutsche Autobahnnetz untersucht (Krause *et al.*, 2017a; Krause *et al.*, 2017b) kommt allerdings zu noch konservativeren Schätzungen mit einem Anstieg von lediglich 30% der aktuellen Strassenkapazität.

3.3 Simulationsansätze

Zum Vergleich mit der im Projekt angedachten Methodik wurde eine Recherche zu bestehenden Ansätzen zu Simulationsszenarien automatisierter Fahrzeuge durchgeführt. Die Studien werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

Berrada und Leurent (2017) geben zunächst einen vollständigen Überblick zu Simulationsmodellen und -ansätzen automatisierter Fahrzeuge. Neben einer Untersuchung der Vorteile und Nachteile der Versuche (inklusive makroskopischen Ansätzen und ökonometrischer Modellierung) wird die Wichtigkeit agenten-basierter Modelle zur detaillierten Simulation der Nachfrage betont.

Als eine der ersten Simulationsstudien zu automatisierten Fahrzeugen zeigen Spieser *et al.* (2014) dass für ein Szenario mit automatisierten Taxis in Singapur die Fahrzeugflotte auf 25% der heutigen Grösse mit Wartezeiten von rund 15 Minuten reduziert werden könnte.

Zachariah *et al.* (2014) präsentieren ein Szenario in New Jersey, bei dem vor allem die Verbindung der *ride-sharing* Möglichkeiten einer automatisierten Taxiflotte mit dem lokalen ÖV untersucht werden. In Zhu und Kornhauser (2017) wird eine detaillierte Flottenanalyse in diesem Szenario durchgeführt.

Bischoff und Maciejewski (2016a) präsentieren eine erste agent-basierte Simulation zu automatisierten Fahrzeugen für Berlin, in welcher 11% der heutigen Fahrzeugflotte ausreicht um den täglichen Bedarf an Reisen mit dem Privatfahrzeug durch eine automatisierte Taxiflotte zu decken. Auf der anderen Seite wird festgestellt, dass die Gesamtfahrtzeit der Fahrzeuge durch Leerfahrten um 17% steigt. In einer Folgestudie erweitern Bischoff und Maciejewski (2016b) das Szenario so, dass nur der innerstädtische Verkehr durch die Taxis bedient wird, während Reisende von aussen in diese an vier strategisch gut platzierten “Mobility Hubs” umsteigen können. Dabei wird gezeigt, dass ein solcher Aufbau die Reisezeiten in der Stadt dramatisch verbessern kann. Weiterhin zeigen Maciejewski und Bischoff (2017) dass es stark von den zukünftigen Kapazitätsgewinnen durch die Automatisierung abhängen wird, ob die Effekte auf die Staubildung tatsächlich positiv oder negativ sein werden.

Eine Reihe von Simulationsstudien für Austin, Texas kommen zu dem Ergebnis, das eine Flotte automatisierter Taxis rund 10% der existierenden Fahrzeugflotte ersetzen könnte, aber dies einen Anstieg von 10% der gefahrenen Kilometer bedeuten würde (Fagnant und Kockelman, 2018). Die Simulation wird von Chen und Kockelman (2016) und Loeb *et al.* (2018) erweitert für die Simulation elektrischer automatisierter Taxis. Verschiedene Preisstrategien werden angewendet um die Attraktivität dieser Mobilitätsform zu untersuchen. Es wird unter anderem festgestellt, dass die Bepreisung von herkömmlichen, parkenden Fahrzeugen einen starken Effekt auf die Adaption der Taxis hat.

Martinez und Viegas (2017) führen eine Simulationsstudie in einer massgeschneiderten Software für Lissabon durch. Mit der Anwesenheit von automatisierten Taxis wird wiederum festgestellt, dass 10% der Fahrzeugflotte durch den Service ersetzt werden können, wobei ein Zuwachs der Fahrtdistanz um 11% zu verzeichnen ist.

Dandl *et al.* (2017) nutzen ein Simulationstool basierend auf Aimsum um eine Zukunft automatisierter Fahrzeuge für München zu untersuchen. Werden in dieser Studie 10% der Privatfahrzeuge durch automatisierte Taxis im Stadtkern ersetzt, so ändern sich die Reisezeiten kaum, lediglich ein leichter Anstieg von 1% ist zu beobachten.

Kürzlich schlugen Vazifeh et al. (2018) ein Lösungsverfahren vor, mit dem sie die New Yorker Taxiflotte bei gleichem Service Level um 30% reduzieren konnten.

Zwei Studien zum Thema wurden bereits am Institut für Transportplanung und Systeme der ETH Zürich verfasst. Zum einen kommen Boesch *et al.* (2016) zu dem Ergebnis, dass eine Reduktion der Fahrzeugflotte in der Schweiz um 90% möglich sein könnte, wenn alle restlichen Fahrzeuge als geteilte automatisierte Fahrzeuge genutzt würden. Dabei werden durchschnittliche Wartezeiten für ein Fahrzeug von ca. 10min vorausgesetzt. Meyer *et al.* (2017) untersuchen daraufhin den Einfluss der Automatisierung auf die Erreichbarkeiten in der Schweiz. Dabei wird mit der Methodik von Claude Weis (Siehe Weis und Axhausen, 2009; Weis und Axhausen, 2013) auch auf den induzierten Verkehr eingegangen. Die Studie kommt zu dem Resultat, dass eine unkontrollierte “Überschwemmung” des Marktes mit automatisierten Fahrzeugen und ein starker Rückbau des klassischen öffentlichen Verkehrs vor allem in den urbanen Zentren der Schweiz zu einer deutlichen Verschlechterung der Verkehrslage führen könnte, welche auf die in fast allen bisher präsentierten Studien vernachlässigten Rebound-Effekte zurückzuführen ist.

4 Kostenrechner

Um sinnvolle Preisstrukturen für die automatisierten Mobilitätsangebote annehmen zu können - sowohl für die Befragungen als auch für die Simulationen - war es nötig eine konsistente Kostenschätzung vorzunehmen. Dieser Projektschritt war ursprünglich nicht geplant, stellt aber nun einen wichtigen Teil der Gesamtarbeit dar, da ohne ihn die weiteren Schritte mit der bestehenden Literatur nur ungenau hätten bearbeitet werden können. Die vorliegende Kostenstudie geht methodisch nach Kenntnis der Autoren über alle bisher veröffentlichten Arbeiten zu diesem Thema hinaus und bietet vor allem einen gezielten Blick auf den Schweizer Kontext.

Die folgenden Kapitel basieren weitgehend auf dem Hauptartikel zum Kostenrechner, der bereits veröffentlicht wurde:

Bösch, P.M., F. Becker, H. Becker, K.W. Axhausen (2018) Cost-based analysis of autonomous mobility services, *Transport Policy*, **64**, 76-01.

Momentan ist eine Erweiterung dieser Veröffentlichung in Planung, bei der die Preisstrukturen automatisierter Mobilität für mehr als 20 Städte weltweit mit Hilfe der internationalen Forschergemeinschaft analysiert werden, siehe Becker *et al.* (2018).

4.1 Einleitung

Automatisierte Fahrzeuge werden die Mobilität revolutionieren, indem sie Autos in Mobilitätsroboter verwandeln und dynamischere und intelligentere Formen des öffentlichen Verkehrs ermöglichen. Eine Vielzahl von Transportdiensten ist mit AVs denkbar, doch ist weitgehend unklar, welche sich durchsetzen werden. Neben Reisezeit, Zuverlässigkeit und Komfort ist der Preis die wichtigste Eigenschaft eines Mobilitätsangebots. Die Vorhersage der Akzeptanz und damit der Wettbewerbsfähigkeit zukünftiger AV-Betriebsmodelle erfordert daher Kenntnisse über deren Kostenstrukturen. Die Gültigkeit von Szenarien, Simulationen und Schlussfolgerungen solcher Studien hängt stark von der Genauigkeit der Annahmen über die absolute und relative Wettbewerbsfähigkeit neuer Verkehrsdienste im Vergleich zu aktuellen Angeboten ab. Bessere Schätzungen der absoluten Konkurrenzfähigkeit erlauben somit bessere Schätzungen der Verkehrsmittelwahl, der induzierten Nachfrage und der räumlichen Verteilung des Reisebedarfs - kurz: des zukünftigen Reiseverhaltens.

Erste Kostenschätzungen für zukünftige Mobilitätsangebote mit AVs wurden von Burns *et al.* erstellt (2013). Für drei verschiedene Fälle (Klein- bis Mittelstadt, Vorstadt und Urban) berechneten sie die Kosten pro Fahrt eines zentral organisierten Systems von Taxi-AVs (Mittelgrosse Limousinen mit AV-Technologie), das die bestehenden Verkehrsdienste ersetzen würde. Ihre Schätzungen basieren auf verschiedenen Kostenkategorien, die fixe und variable Kosten erfassen. Sie kamen zu dem Schluss, dass solche Systeme "bessere Mobilitätserlebnisse zu radikal (bis zu zehnmal) niedrigeren Kosten" bieten könnten. Bei einem Taxi-AV-System für eine kleine bis mittlere Stadt lagen die Kosten für fahrerlose, speziell gebaute Fahrzeuge bei 0,15 USD pro Fahrtmeilen.

In einem zweiten Ansatz betrachteten Fagnant und Kockelman (2014) die externen Kosten (z.B. Crash- oder Staukosten) des heutigen privaten Verkehrssystems, um das Potenzial von AVs zu berechnen, welches sie als unterdurchschnittlich erachteten. Fagnant und Kockelman (2015) konzentrierten sich in einem folgenden Beitrag auf mögliche Preise für Nutzer eines zentral organisierten, Taxi-AV-Systems. Bei Investitionskosten in Höhe von 70.000 USD und Betriebskosten in Höhe von 0,50 USD pro Meile für AVs stellte man fest, dass ein Fahrpreis von 1,00 USD pro Fahrtmeilen für ein Taxi-AV noch einen Profit für den Betreiber produzieren könnte. Dies ist ein höheres Preisniveau als in Burns *et al.* (2013), aber immer noch sehr wettbewerbsfähig im Vergleich zu heutigen Verkehrsmitteln.

Litman (2015) führte zusätzliche Faktoren in die Diskussion ein, wie z.B. die Reinigungskosten. Er schätzt die Kosten auf der Grundlage verschiedener Kategorien. Für einige der Werte bietet der Artikel jedoch keine Quellen bzw. verwendet Schätzungen. Beispielsweise wird davon ausgegangen, dass Taxi-AVs teurer sind als Car-Sharing (0,60 USD - 1,00 USD pro Meile), aber weniger als fahrergeführte Taxis (2,00 USD - 3,00 USD pro Meile).

Aufbauend auf den oben genannten Arbeiten schätzte Johnson *et al.* (2015) den Preis für Taxi-AVs auf 0,44 USD pro Weg-Meile (Betriebskosten plus 30% Profitmarge). Für speziell gebaute PAVs, die als Sammeltaxis genutzt werden, schätzen sie den Preis pro Fahrtmeilen auf nur 0,16 USD. Sie verwenden detaillierte Kostenkategorien, um die Gesamtkosten zu schätzen, geben aber die Quellen der Zahlen nicht vollständig an. Es ist daher schwierig, ihre Schätzungen zu reproduzieren. Im Gegensatz zu früheren Studien vergleichen und bewerten sie jedoch ihre Berechnungen gegenüber den heutigen Privatwagen.

Weniger strenge und detaillierte, aber transparentere Schätzungen werden von Stephens *et al.* (2016) und Friedrich und Hartl (2016) vorgeschlagen. Stephens *et al.* (2016) gehen davon aus, dass die Kosten für PAVs zwischen 0.20 USD 0.30 USD pro Passagiermeile liegen werden. Dies liegt in einer ähnlichen Grössenordnung wie die Schätzungen von Friedrich und Hartl (2016), die für eine Fahrgemeinschaft in einem Stadtgebiet in Deutschland von 0,15 EUR pro Personenkilometer ausgehen. Stephens *et al.* (2016) unterscheiden jedoch nicht zwischen privaten und kommerziellen Fahrzeugen und Friedrich und Hartl (2016) fokussieren ihre Kostenanalyse ausschliesslich auf den Mitfahrdienst. Die Kosten von 0,30 USD pro Passagiermeile werden von Johnson und Walker (2016) in einem weniger strengen, aber detaillierteren Ansatz geschätzt. Mit einem weniger detaillierten Ansatz für die Niederlande schätzen Hazan *et al.* (2016), dass vollautomatisierte Fahrzeuge in einem Fahrgemeinschaftssystem zu Kosten von bis zu 0,09 EUR pro Personenkilometer - also günstiger als der Schienenverkehr führen[2].

Wie bereits erwähnt, waren frühere Ansätze zur Ermittlung der Kostenstrukturen von Betriebsmodellen für AVs sowohl bei den möglichen Betriebsmodellen als auch bei den Kostenkomponenten unvollständig. Diese Lücke wird durch eine umfassende *Bottom-up*-Berechnung der jeweiligen Kostenstrukturen von vollautomatisierten (Level 5 (SAE International, 2014)) Fahrzeugen für verschiedene Betriebsmodelle, wie z.B. Dynamic Ride-Sharing, Taxi, Gemeinschaftsfahrzeug Flotten oder linienbasierte Massenverkehrsmittel, geschlossen. Die gewählte Methodik ermöglicht die Bestimmung der Bedeutung verschiedener Kostenkomponenten und die Differenzierung der Auswirkungen der Fahrzeugautomatisierung auf die einzelnen Kostenkomponenten. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf den Personenverkehr. Der Güterverkehr, bei dem AVs zweifellos auch zu erheblichen Änderungen führen werden, ist nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

Der weitere Verlauf dieses Kapitels ist wie folgt strukturiert: In Abschnitt 4.2 wird eine Bottom-up-Ermittlung der Betriebskosten für eine Vielzahl von Fahrzeugsystemen in verschiedenen Situationen durchgeführt, während in Abschnitt 4.3 deren jeweilige Nutzung für verschiedene Anwendungsfälle untersucht wird. Darauf aufbauend werden die Kostenstrukturen verschiedener Betriebsmodelle berechnet. Die Ergebnisse, einschliesslich einer Robustheitsanalyse gegenüber verschiedenen Annahmen von Schlüsselvariablen, sowie die Auswirkungen der automatisierten Fahrzeugtechnologie auf zukünftige Verkehrssysteme werden in Abschnitt 4.5 dargestellt. Abschnitt 4.6 geht dann einen Schritt weiter, indem hier eine Zukunft mit automatisierten Elektrofahrzeugen angenommen wird und die Perspektiven verschiedener Verkehrsträger unter diesen Umständen untersucht werden. Schliesslich werden in den Abschnitten 4.7 und 4.8 die

[2] 2016 Wechselkurse (ER) (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD), 2017a) und Kaufkraftparitäten (PPP) (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD), 2017b): CHF/USD: ER 1.0, PPP 1.2; €/USD: ER 0,9, PPP 0,7.

Erkenntnisse aus dieser Forschung diskutiert und Vorschläge für die weitere Forschungsvorhaben gemacht.

4.2 Kostenstrukturen

Dieses Kapitel umfasst drei generische Betriebsmodelle:

- Liniengebundener Nahverkehr (öffentlicher Verkehr),
- Taxi (Sammeltaxi (*gepoolt*) oder individuell),
- Privatwagen

In diesem Zusammenhang werden im Linienverkehr Busse oder Züge in voller Grösse eingesetzt, die nach einem Fahrplan verkehren. Privatfahrzeuge sind Eigentum von Privatpersonen und werden ausschliesslich von ihnen selbst oder ihrer Familie und ihren Freunden genutzt. Wie unten beschrieben, wurden für die generischen Betriebsmodelle Taxi und Pkw verschiedene Fahrzeugtypen berücksichtigt. Obwohl viele weitere Varianten von Betriebsmodellen entwickelt werden können, wird davon ausgegangen, dass ihre Kostenstrukturen in der Nähe eines dieser drei generischen Modelle liegen.

Zur Darstellung der Wettbewerbsfähigkeit einer Dienstleistung können verschiedene Indikatoren verwendet werden. Die wichtigsten Dimensionen sind:

- Produktionskosten gegenüber Preisen,
- Fahrzeugkilometer gegenüber Passagierkilometern,
- Vollkosten einer Reise gegenüber direkten Kosten

Während die Produktionskosten für die Betreiber von Flotten relevant sind, um die Nachfrage zu befriedigen, kann davon ausgegangen werden, dass die Preise ein Schlüsselmerkmal der Wahl der Kunden sind. Die beiden Indikatoren können unter Berücksichtigung von Steuern, Zahlungsgebühren und Profitmarge ineinander umgerechnet werden. Ebenso können Fahrzeugkilometer vom Betreiber geplant werden, während Passagierkilometer die Nachfragereaktion auf den Service (z.B. Belegung, Leerfahrten etc.) berücksichtigen. Schliesslich sind die direkten Kosten einer Reise die Betriebskosten für eine Fahrt von Punkt B nach Punkt C, während die vollen Kosten einer Reise auch eine mögliche Leerfahrt von Punkt A nach B beinhalten. Nach einem *Bottom-up*-Ansatz werden in diesem Kapitel erst einzelne Kostenbestandteile für verschiedene Fahrzeugtypen ermittelt, dann die Betriebskosten aus Sicht des Betreibers ermittelt und anschliessend die Auswirkungen des Reiseverhaltens anhand von Preisen abgeschätzt.

Die jeweiligen Kostenbestandteile (Übersicht in Anhang I.2) werden in zwei Schritten ermittelt: Zunächst werden auf Basis von Herstellerangaben und zusätzlichen Quellen fixe und variable Fahrzeugkosten für den Fall des Privateigentums und der Nutzung des Fahrzeugs ermittelt. In einem zweiten Schritt werden Variationen in die Berechnung aufgenommen, um den Fall der kommerziellen Eigentümerschaft und der Mitbenutzung von Fahrzeugen abzudecken. Anschliessend werden die Kostenbestandteile des heutigen Linienverkehrs in einem separaten Ansatz ermittelt. Schliesslich werden die Auswirkungen von Fahrzeugelektrifizierung und -automatisierung für einzelne Kostenkomponenten abgeschätzt, so dass die Gesamtbetriebskosten und die erforderlichen Mindestkosten berechnet werden können.

4.2.1 Personenwagen

Fixkosten

Die fixen Fahrzeugkosten hängen wesentlich vom Fahrzeugtyp ab. In dieser Untersuchung werden vier allgemeine Fahrzeugkategorien betrachtet:

- Solo: Urbaner Einsitzer (Beispiel: Renault Twizy[3]),
- Midsize (Mittelklassewagen): Standard 4-Sitz Allzweckfahrzeug (Beispiel: VW Golf[4]),
- Van (Kleintransporter): Grosses 8-Sitziges Allzweckfahrzeug (Beispiel: VW Multivan[5]),
- Minibus (Kleinbus): Kleinbus mit 20 Sitzen und einem kleinen Kofferraum (Beispiel: Mercedes-Benz Sprinter[6])

Für jede dieser Kategorien wurden auf der Website des Automobilherstellers Beispielkosten für ein Modell mit mittlerer Ausstattung ermittelt. Zu beachten ist, dass die in diesem und im nächsten Abschnitt genannten Kosten die Schweizer Mehrwertsteuer von 8% beinhalten. Die Abschreibungen werden in einen fixen Teil aufgeteilt, der auf die Alterung des Fahrzeugs und einen variablen Teil aus dessen Nutzung zurückzuführen ist. Für den fixen Teil wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug jedes Jahr ein Zehntel seiner Anschaffungskosten, unabhängig vom Kilometerstand, verliert. Der variable Teil wird am Anfang des nächsten Abschnitts erläutert. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Berechnungen nicht die Kosten für private Eigentümer reflektieren, die es vorziehen, relativ neue Autos zu fahren. Da es der Zweck des Kapitels ist, eine interne Kostenkalkulation abzuleiten, werden die Berechnungen des *cash flow*, wie z.B. die Rückzahlungen der notwendigen Kredite, nicht explizit berücksichtigt.

Der Zinsen werden auf Basis eines Annuitätendarlehens mit einem Zinssatz in Höhe von 7,9% und einer Laufzeit von 6 Jahren ermittelt (Migrosbank, 2017). Bearbeitungsgebühren für den Darlehensnehmer werden nicht berücksichtigt. Die Versicherungstarife wurden mit der günstigsten Vollkaskoversicherung mit Hilfe des Internet-Vergleichsdiensts Comparis (Comparis AG, 2016) für im Kanton Zürich zugelassene Fahrzeuge ermittelt. Die Tarife reflektieren das günstigste Angebot für Nicht-Geschäftskunden mit 25 Jahren Fahrpraxis ohne Unfälle und 30000 gefahrenen Kilometern pro Jahr. Zu beachten ist, dass die Police für 15000 km pro Jahr nur 10 CHF günstiger ist. Die Steuern wurden mit einem Web-Tool des Kantons Zürich (Strassenverkehrsamt Kanton Zürich, 2017) ermittelt. Für die Parkkosten wurde der Durchschnitt für PKW in der Schweiz verwendet (TCS, 2016). Für Mautgebühren wurde der Preis der Schweizer Autobahnvignette für Solo-, Midsize- und Van verwendet (Eidgenössische Zollverwaltung, 2017b). Kleinbusse unterliegen der Schwerverkehrsabgabe (Eidgenössische Zollverwaltung, 2017a). Die sich daraus ergebenden monetären Werte sind in ***Tab. 7*** dargestellt.

Variable Kosten

Für die vier Fahrzeugtypen wurden die variablen Kosten als Privatfahrzeuge geschätzt. Für Abschreibungen und Wartungskosten wurde der Durchschnitt für die Schweizer Auto Flotte verwendet und nach dem Preis des Autos gestaffelt (TCS, 2016). Für einen Mittelklassewagen ergibt sich daraus eine Abschreibung von 3500 CHF pro Jahr und zusätzlich 11.67 CHF pro 100 km. Es ist klar, dass dieses Verfahren die Wertverluste in den ersten Jahren unterschätzt und in späteren Jahren überschätzt. Da dieses Kapitel die durchschnittlichen Kosten vergleicht, wird dieser nichtlineare Charakter von Wertverlusten

[3] Webseite: http://www.renault.ch/, letzter Zugriff 01.02.2017.

[4] Webseite: http://www.volkswagen.ch/, letzter Zugriff 01.02.2017.

[5] Webseite: http://www.volkswagen-nutzfahrzeuge.ch/, letzter Zugriff 01.02.2017.

[6] Webseite: http://www.mercedes-benz.ch/, letzter Zugriff 01.02.2017.

ignoriert. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass ein Pkw acht Mal pro Jahr gereinigt wird, basierend auf deutschen Werten, welche zwischen 6 und 10 liegen (abh Market Research, 2007). Die Kosten wurden anhand der Preisliste einer SB-Waschanlage in Zürich geschätzt (Autop, 2016). Bei den Reifen wurde angenommen, dass zwei Reifensätze (je 300 CHF) und zwei jährliche Reifenwechsel (je 100 CHF) eine Fahrleistung von 50000 km ermöglichen würden. Die Treibstoffkosten wurden durch den vom Hersteller gemeldeten städtischen Treibstoffverbrauch bei einem Treibstoffpreis von 1.40 CHF pro Liter (Shell, 2016). Da es in der Schweiz derzeit keine entfernungsabhängige Pkw-Maut gibt, werden hier keine Kosten in Rechnung gestellt. Die sich daraus ergebenden monetären Werte zeigt ***Tab. 8***.

Flotteneffekte

Kommerzielle Flottenbetreiber profitieren von verschiedenen Rabatten auf fixe und variable Fahrzeugkosten aufgrund von Skaleneffekten. Blens (2015) bewertete bei der Überprüfung ihrer Plattformgeschäfte den durchschnittlichen Rabatt, der kommerziellen Kunden für dreissig beliebte Firmenwagen gewährt wurde. Die Rabatte liegen zwischen 8,5% und 30,5%, mit einem Median von 21%. Da die Anzahl der von den Betreibern von Flotten gekauften Fahrzeuge wesentlich grösser sein sollte als bei einem durchschnittlichen Unternehmen, wird ein allgemeiner Rabatt auf den Fahrzeugpreis von 30% angenommen. Aufgrund der intensiveren Nutzung wird weiterhin davon ausgegangen, dass kommerziell genutzte Fahrzeuge über 300.000 km (Klose, 2012) statt über zehn Jahre abgeschrieben werden. Zudem wird davon ausgegangen, dass die Versicherungstarife für die Betreiber von Flotten um 20% niedriger sind, da für Gruppenversicherungen typischerweise Rabatte gewährt werden (Helvetia, 2016). Da die deutsche Autovermietung Sixt SE Anleihen zu 1,125% jährlich mit einer Laufzeit von sechs Jahren emittiert (Sixt SE, 2016), wird der Unternehmenszinssatz auf 1,5% festgelegt; für die Kreditlaufzeit werden drei Jahre angenommen. Darüber hinaus werden die Wartungs- und Reifenkosten aufgrund besserer Konditionen für Grossabnehmer um 25 % gesenkt. Für die Treibstoffkosten wird eine Reduktion von 5% basierend auf den typischen Gruppenrabatten (Migrol, 2016) angenommen. Basierend auf Schlesiger (2014) werden die Parkkosten für die Betreiber von Flotten um 133% höher eingeschätzt als für Privatfahrer. Darüber hinaus wird die Mehrwertsteuer gegebenenfalls abgezogen, da die Kosten im vorherigen Abschnitt auf den Bruttopreisen der Produkte und Dienstleistungen basieren.

Tab. 7 *Fixkosten der Fahrzeuge*

	Solo	**Midsize**	**Van**	**Minibus**
Kapazität	1	4	8	20
Anschaffung [CHF]	13’000	35‘000	66‘000	70‘000
Zins [CHF/a]	260	700	1‘320	1‘400
Versicherung [CHF/a]	500	1‘000	1‘200	1‘400
Steuern [CHF/a]	120	250	700	1‘100
Parkplatz [CHF/a]	1‘500	1‘500	1‘500	1‘500
Maut [CHF/a]	40	40	40	2‘200

Tab. 8 *Variable Kosten der Fahrzeuge*

	Solo	**Midsize**	**Van**	**Minibus**
Kapazität	1	4	8	20
Wertverlust [CHF/100 km]	2.60	7.00	13.20	14.00
Wartung [CHF/100 km]	2.38	6.40	12.07	12.80
Reinigung [CHF/100 km]	2.00	3.00	4.00	5.00
Reifen [CHF/100 km]	2.00	2.00	2.00	2.00
Treibstoff [CHF/100 km]	5.60	7.98	12.88	20.30
Maut [CHF/100 km]	0.00	0.00	0.00	0.00

Es wird davon ausgegangen, dass die Kunden weniger auf das Eigentum Dritter achten (*tragic of the commons*), was zu deutlich höheren Reinigungskosten führt. Aufgrund der Erfahrungen eines *Car-Sharing*-Betreibers[7] wurde angenommen, dass die Fahrzeuge nach jeder 40sten Fahrt gereinigt werden müssen. Wenn ein Auto nicht automatisiert ist, werden die Kosten pro Fahrerstunde auf 35 CHF geschätzt, basierend auf dem durchschnittlichen Jahresgehalt der Schweizer Taxifahrer (Lohnanalyse, 2016) und dem Kalkulationstool von Braendle (2013), das die Arbeitskosten für ein Unternehmen anhand des Bruttoeinkommens ermittelt.

Weitere Kostenbestandteile sind Overheadkosten (bestehend aus Management, Personal, Flottenkoordination, Werbung etc.) und Fahrzeugbetriebskosten pro Fahrzeug und Tag für kommerziell betriebene On-Demand-Dienste. Diese Zahlen werden in Abhängigkeit von der Grösse und Zusammensetzung von Flotten angenommen. Eine Analyse auf der Grundlage von US-Daten (Federal Transit Administration, 2016) ist in Anhang I.1 dargestellt. Für die Schweiz kann von ca. 14 CHF Overheadkosten pro Fahrzeugtag und 10 CHF Betriebskosten pro Fahrzeugtag ausgegangen werden.

Die Nutzerpreise berücksichtigen neben den Betriebskosten eine Marge von 3%, die Schweizer Mehrwertsteuer von 8% und eine Zahlungsverkehrsgebühr von 0,44% (Wettbewerbskommission WEKO, 2014). Die Profitmargenschätzung basiert auf der Studie von SCI Verkehr (2016), nach der die Median Profitmarge für deutsche Logistikunternehmen zwischen 2% und 4% liegt.

4.2.2 Öffentliche Verkehrsmittel

Für einen fairen Vergleich der verschiedenen Verkehrsträger wurden die vollen Produktionskosten der heutigen öffentlichen Verkehrsmittel vor den direkten Subventionen geschätzt. Aufgrund der Flottengrösse der meisten öffentlichen Verkehrsbetriebe wurde davon ausgegangen, dass der Overheadkostenanteil an den Vollkosten unabhängig von der Grösse der Flotte ist. Daher wird davon ausgegangen, dass die Overheadkosten bereits in den vollen Produktionskosten pro Kilometer enthalten sind und nicht gesondert behandelt werden müssen.

Die Betriebskosten für den Personenverkehr basieren auf dem Jahresbericht der SBB für das Jahr 2015 (SBB AG, 2016). Die Kosten pro Zugkilometer werden mit 31.40 CHF/km angegeben. Diese Zahl sollte als Schätzung dienen, da sie nur den Durchschnitt über verschiedene Zugtypen und Strecken darstellt. Obwohl die Zahl die Streckengebühren beinhaltet, ist hervorzuheben, dass die Streckengebühren in der Schweiz subventioniert werden.

Unter den Anbietern des öffentlichen Personennahverkehrs reduziert der starke Wettbewerb die Transparenz der gemeldeten Geschäftsergebnisse. Um eine möglichst

[7] Private Kommunikation

genaue Schätzung vornehmen zu können, wurde der von Frank *et al.* (2008) eingeführte Rahmen mit Schweizer Gehältern (Verkehrsbetriebe Zürich, 2016) angepasst und auf einen städtischen und einen regionalen Verkehrsbetrieb übertragen. Die Ergebnisse wurden mit Daten zu den durchschnittlichen Kilometerkosten von 98 städtischen und 787 regionalen ÖV-Linien in der Schweiz ab 2012 verglichen (Bundesamt für Verkehr, 2011). Es sei darauf hingewiesen, dass Strassenbahnen nicht Teil der aktuellen Analyse sind.

Für den Bus- und Schienenverkehr werden keine Skaleneffekte angenommen, da diese Effekte bereits in den Kostenstrukturen der ÖV-Anbieter enthalten sind.

4.2.3 Kosteneffekte und Technologie

Wir erwarten zwei technologische Entwicklungen, die einen wesentlichen Einfluss auf die Kostenstrukturen von Fahrzeugen und Transportdienstleistungen haben werden: die elektrische Antriebstechnik und die Fahrzeugautomation.

Elektroantrieb

Die Batterie ist einer der Hauptkostentreiber der Elektrofahrzeuge. Da unter Umständen mehrere Batterien während der Lebensdauer eines Fahrzeugs benötigt werden, wurde die Abschreibung der Batterie zu den Wartungskosten hinzugerechnet. Es wird davon ausgegangen, dass der Kaufpreis eines Elektrofahrzeugs mit dem eines herkömmlichen Fahrzeugs vergleichbar ist. Saxton (2013) analysierte die Batteriekapazität der Tesla Roadster in Abhängigkeit von Alter, Kilometerstand und Klimabedingungen. Er fand heraus, dass nur die Kilometerleistung eine signifikante Korrelation hatte und dass die meisten Tesla Roadster nach 160000 km noch eine Batteriekapazität von 80-85% haben. Da Flottenfahrzeuge über 300000 km abgeschrieben werden, wird davon ausgegangen, dass alle 150000 km eine Batterie ausgetauscht werden muss. Eine Analyse von McKinsey (2017) kommt zudem zu dem Schluss, dass die durchschnittlichen Produktionskosten einer Elektroautobatterie 227 USD (227 CHF) pro kWh betragen. Inklusive einer Marge von 3% und unter Berücksichtigung der Schweizer Mehrwertsteuer von 8% beträgt dies 252 CHF/kwh pro Kunde. Nimmt man den Volkswagen E-Golf[8] mit einer Batterie von 24,2 kWh als Referenz, werden zusätzliche Wartungskosten von 0,04 CHF/km berechnet. Diez (2016) berichtet jedoch, dass die verbleibenden Wartungskosten für Elektrofahrzeuge um 35% niedriger sind als für konventionelle Fahrzeuge. Insgesamt steigen damit die Instandhaltungskosten um 28%. Da die Wartungskosten auf die verschiedenen Fahrzeugtypen abgestimmt sind, wird davon ausgegangen, dass diese Erhöhung die unterschiedlichen Batteriekapazitäten abdeckt. Dennoch muss betont werden, dass die Preise für Batterien in Zukunft wahrscheinlich sinken werden. Nykvist und Nilsson (2015) heben sogar hervor, dass die bisherigen Prognosen über die Kostenentwicklung von Batterien zu pessimistisch waren.

Zudem sind laut einem Internet-Vergleichsdienst (Comparis AG, 2016) die Versicherungsgebühren für den e-Golf um 35% niedriger als für einen vergleichbaren Benzin-Golf. Dieses Verhältnis wurde für alle Fahrzeugklassen angenommen. Zudem sind Elektrofahrzeuge im Kanton Zürich von der Strassensteuer befreit (100% Ermässigung). Die Treibstoffkosten sind 50% niedriger, wenn man den Energieverbrauch von Golf und e-Golf zu den aktuellen Treibstoff- und Strompreisen vergleicht.

Fahrzeugautomatisierung

Die Auswirkungen der AV-Technologie sind weniger deutlich. Es wurde angenommen, dass die notwendige Technologie den Fahrzeugpreis um durchschnittlich 20% erhöhen würde (IHS, 2014), was zu höheren Anschaffungskosten, Zinskosten und Abschreibungen führen würde. Aufgrund der ausgewogeneren Fahrweise wird weiterhin davon ausgegangen, dass die Automation die Treibstoffkosten um 10% senkt (Stephens *et al.*, 2016). Aufgrund des schonenderen automatischen Fahrens wird erwartet, dass

[8] http://www.volkswagen.ch/, letzter Zugriff 14.08.2017

automatisierte Fahrzeuge weniger Wartung für herkömmliche Fahrzeugkomponenten benötigen. Da jedoch zu erwarten ist, dass die neuen Sensoren selbst regelmässig gewartet werden müssen, gehen wir nicht von unterschiedlichen Kosten für die gesamten Wartungskosten aus. Basierend auf früheren Untersuchungen wurde angenommen, dass ein sicheres Fahren die Versicherungsprämien um 50% senken würde. Dies ist eine konservative Schätzung, da der heutige Tesla-Autopilot die Unfallrate bereits um 40% gesenkt haben soll (NHTSA, 2017). Es ist klar, dass diese Einschätzung angesichts der tiefgreifenden Veränderungen, die für die Versicherungswirtschaft (Morgan Stanley und Boston Consulting Group, 2016) bevorstehen und die den Rahmen dieser Untersuchung übersteigen, sehr unsicher ist.

Automatisierung und Elektrifizierung des Öffentlichen Verkehrs

Zur Abschätzung der Auswirkungen der Fahrzeugautomation auf die Züge wurde die Anzahl der Vollzeitäquivalente der aktiven Lokführer im Personenverkehr (2485 (SBB AG, 2016)) mit den durchschnittlichen Personalkosten der Lokführer (87'946 CHF, inklusiver Durchschnittslohn (Lohnanalyse, 2017) und Arbeitgeberaufwand (Braendle, 2013)) multipliziert. Die daraus resultierende Gesamtlohnsumme wurde dann durch die gesamten jährlichen Betriebskosten der SBB Personenbahn im Jahr 2015 dividiert (SBB AG, 2016). Unter der Annahme, dass keine Lokführer mehr benötigt werden, entspricht dies einem Rückgang der Kosten pro Kilometer um 4,7 %. Da in der Schweiz die Bahnlinien bereits auf den elektrifizierten Gleisen verkehren, wird keine weitere Kostenveränderung durch elektrischen Antrieb angenommen.

Zur Abschätzung der Auswirkungen elektrischer Antriebe und automatisierten Fahrzeugsystemen auf den Busbetrieb wurde das Rahmenkonzept von Frank *et al.* (2008) verwendet. Nach den Annahmen über den Privat- und Taxibetrieb wurde davon ausgegangen, dass der Elektroantrieb die Treibstoffkosten halbiert (5,5% Rückgang der Gesamtkilometerkosten). Nach Angaben des Bundesamtes für Verkehr macht das Gehalt eines Busfahrers 55% der Gesamtkosten aus. Wie bei Zügen wird davon ausgegangen, dass die Kosten durch Automatisierung um diesen Anteil sinken.

Die Automatisierungstechnik und der elektrische Antrieb werden voraussichtlich keine wesentlichen Auswirkungen auf die festen und die variablen Kosten des öffentlichen Bus- und Bahnverkehrs haben, da die Automatisierungstechnik bereits vorinstalliert ist (in Zügen) oder den Anschaffungspreis eines Fahrzeugs (für Busse) nicht wesentlich erhöhen würde. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass die Systeme weiterhin so betrieben werden wie bisher, so dass die Auswirkungen auf die Verwaltungskosten minimal sind.

4.2.4 Kosten- und Preiskalkulation

Auf Basis der oben genannten Kostenelemente werden vergleichbare Kosten und Preise für Fahrzeuge und Transportleistungen berechnet. Die primären Ergebnisse sind Kosten pro Fahrzeugkilometer, Kosten pro Sitzkilometer, Kosten pro Passagierkilometer und Preis pro Passagierkilometer. Die Kosten sind die Produktionskosten für den Betreiber der Flotte, während der Preis auch eine Profitmarge für den Anbieter, die Mehrwertsteuer und eine Gebühr für den Zahlungsverkehr beinhaltet.

Das Rahmenkonzept für die Kostenberechnung ermöglicht die Spezifizierung der Nutzung der Fahrzeugflotte, die erwartete Nutzung dieser Flotte und das Betriebsmodell, einschliesslich der erwarteten Einnahmen.

- **Fahrzeugflotte**: Die Fahrzeugflotte ist spezifiziert nach Fahrzeugtyp, Anzahl der Fahrzeuge und deren Ausstattung (elektrifiziert, automatisiert).
- **Erwartete Nutzung**: Man unterscheidet zwischen Peak-, Off-Peak- und Nachtnutzung. Für alle drei Fälle sind die durchschnittliche Anzahl der Betriebsstunden, die Aktivzeit (Anteil der Betriebsstunden, in denen sich die Fahrgäste an Bord befinden), die durchschnittliche Belegung, die durchschnittliche Geschwindigkeit, die durchschnittliche Fahrtdauer, der relative Leerfahrtenanteil,

der relative Wartungsfahrtenanteil und die Wartungszeiten erforderlich. Die erwartete Nutzung wird in Abschnitt 4.3 definiert.

- **Betriebsmodell**: Neben dem privaten Fahrzeugbesitz werden hier zwei Formen des öffentlichen Verkehrs unterschieden: der dynamische Betrieb von Flotten und der linienbasierte ÖV.

Erwartete Nutzungsparameter (Abschnitt 4.3) ergeben eine durchschnittliche Anzahl von gefahrenen Kilometern pro Tag, zuzüglich der Anzahl der Passagiere, einschliesslich Passagierkilometer und Passagierstunden pro Tag.

- Der **Preis pro Personenkilometer** P_{pkm} entspricht den Produktionskosten pro Personenkilometer C_{pkm}, zuzüglich erwarteter Marge r, Zahlungsverkehrsgebühr p und MwSt:

$$P_{pkm} = \frac{C_{pkm}}{(1-r)(1-p)} \cdot (1 + MwSt)$$

- Die **Kosten pro Personenkilometer** C_{pkm} errechnen sich aus den durchschnittlichen Gesamtkosten pro Fahrzeug und Tag C_{vd} dividiert durch durchschnittliche Personenkilometer pro Fahrzeug und Tag.

- Ebenso werden die **Kosten pro Fahrzeugkilometer** C_{vkm} berechnet als die durchschnittlichen Gesamtkosten pro Fahrzeug und Tag C_{vd} dividiert durch die durchschnittlichen Gesamtkilometer pro Fahrzeug und Tag $vkm_{tot/d}$.

- Die **durchschnittlichen Gesamtkilometer pro Fahrzeug und Tag** $vkm_{tot/d}$ sind die Summe aus durchschnittlichen Dienstkilometern skm und durchschnittlichen gefahrenen leeren Kilometern ekm.

- Die **durchschnittlichen Gesamtkosten pro Fahrzeug und Tag** C_{vd} sind die Summe aus fixen Kosten pro Fahrzeug und Tag (fixe Kosten für das Fahrzeug FC_{vd}, plus Dienstleister Overheadkosten OHC_{vd}, plus variable Gesamtkosten pro Fahrzeug und Tag (variable Kosten des Fahrzeugs pro Kilometer VC_{vkm}, plus variable Servicekosten pro Stunde VSC_{vh} (z.B. der Fahrer)):

$$C_{vd} = (FC_{vd} + OHC_{vd}) + \left(\left(VC_{vkm} \cdot vkm_{\frac{tot}{d}}\right) + \left(VSC_{vh} \cdot DT_{h/d}\right)\right)$$

  $DT_{h/d}$ ist die Gesamtdienstzeit des Fahrzeugs pro Tag und die Fahrzeugkosten, FC_{vd} und VC_{vd} sind Summen der jeweiligen Kostenfaktoren, die durch Skalierungsfaktoren, die die Technologien und die anwendbaren Rabatte auf Flotten darstellen, umgerechnet werden.

- Die **Kosten pro Sitzkilometer** C_{skm} werden berechnet, indem die Kosten pro Fahrzeugkilometer C_{vkm} durch die Anzahl der Sitze pro Fahrzeug s_v geteilt werden.

Das Tool zur Kostenkalkulation ist in der Programmiersprache R mit einer Eingabeschnittstelle in Microsoft Excel implementiert[9]. Es ist bei den Autoren auf Anfrage erhältlich.

4.3 Nutzungsparameter

Die durchschnittlichen Kosten pro Nutzer hängen nicht nur von den Fahrzeugeigenschaften ab, sondern auch von der Service-Effizienz, d.h.

[9] Die detaillierten Eingabewerte sowie die daraus resultierenden Kostenstrukturen und Preise der verschiedenen Dienstleistungen sind im Anhang dieser Publikation dargestellt.

Fahrzeugauslastung, Leerfahrten und Overheadkosten. Um diese Werte zu approximieren, stellt dieser Abschnitt die in diesem Kapitel differenzierten Anwendungsfälle dar und beschreibt dann deren durchschnittliche Nutzung wie sie sich für die Region Zürich ergibt. Eine Zusammenfassung des kompletten Parametersatzes findet sich in Anhang I.3.

In diesem Kapitel wurden beispielhaft drei räumliche und drei tageszeitliche Fälle für private und gemeinsame Dienstleistungen einschliesslich Taxis unterschieden. Die drei räumlichen Fälle sind:

- Urban: Fahrten, die in einem Stadtgebiet beginnen und enden und kürzer als 10 km sind.
- Regional: Fahrten, die ausserhalb eines Stadtgebietes beginnen und enden und kürzer als 50 km sind.
- Allgemein: Alle Fahrten unter 200 km, unabhängig vom Gebiet

Für jeden dieser räumlichen Fälle waren die folgenden drei Zeitabschnitte definiert:

- Spitzenstunden: Fahrten, die zwischen 7.00 und 8.00 Uhr oder 17.00 und 18.00 Uhr beginnen oder enden.
- Nebenzeiten: Fahrten, die zwischen 8.00 und 17.00 Uhr beginnen oder enden.
- Nacht: Weder Spitzenstunden, noch Nebenzeiten.

Für jeden der oben genannten Anwendungsfälle wurden die folgenden Parameter für die Region Zürich angenommen:

- *Durchschnittliche Betriebsstunden*: Die Zeit, die ein Taxi oder eine Dienstleistung zur Verfügung steht.

Für Privatfahrzeuge in der Schweiz wurde die durchschnittliche Nutzungsdauer für jeden der oben genannten Fälle anhand des Schweizerischen Mikrozensus Verkehr (Bundesamt für Statistik (BFS) und Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), 2012) ermittelt. Dies bedeutet 0,32 h in den Spitzenstunden, 0,7 h in den Nebenstunden und 0,3 h in der Nacht.

Es wurde davon ausgegangen, dass herkömmliche Mobilitätsdienste 20 Stunden pro Tag im Einsatz sind (ohne Wartung). Dies umfasst die Spitzenstunden, die Nebenstunden und einen Teil der Nacht. Zur Berücksichtigung der Wartung wurden 5% der in den Spitzen- und Nebenstunden und 20% in der Nacht abgezogen. Im Gegensatz dazu würden professionelle AV-Dienste den ganzen Tag über betrieben, mit Ausnahme der Wartung (wie oben).

- *Anteil Aktivzeit*: Der Anteil der Betriebsstunden, in denen das Fahrzeug Kunden bedient.

Bei Privatfahrzeugen ist dies 100% der Betriebszeit. Für kommerzielle Dienstleistungen wurden diese Zahlen aus Bösch *et al.* berechnet (2016). Dies ist ein Anteil Aktivitätszeit, wenn ein erheblicher Teil der Bevölkerung den Dienst für alle ihre Reisen nutzt. Nach ihren Ergebnissen beträgt dieser Anteil für Taxis und geteilte Services 57% in der Spitze, 59% in den Nebenzeiten und 30% in der Nacht. Der geringere Anteil in den Spitzenzeiten als in den Nebenzeiten ist auf die unidirektionalere Nachfrage in den Spitzenzeiten (Pendler) zurückzuführen. Eine räumliche Differenzierung wurde hier nicht vorgenommen.

- *Durchschnittliche Belegung*: Durchschnittliche Anzahl der Fahrgäste im Fahrzeug, welche im Einsatz sind.

Für Personenwagen in der Schweiz wurde die durchschnittliche Auslastung aus dem Schweizer Mikrozensus Verkehr (Bundesamt für Statistik (BFS) und Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), 2012) berechnet. Es wurde ein Wert von 1,34 für die Spitzenstunden, 1,46 für die Nebenzeiten und 1,43 für Nacht ermittelt. Bei den kommerziellen Diensten wurde zwischen Taxi- und Fahrgemeinschaften (*pooled*)

unterschieden. Für Taxidienste wurden die gleichen Belegungswerte wie für Pkw angenommen. Für Mitfahrgelegenheiten wurden die Belegungswerte des Internationalen Verkehrsforums (2015) verwendet; 2,6 für die Spitzenzeiten, 2,4 für die Nebenzeiten und 2,3 für die Nacht. Es wurden die gleichen Werte für urbane und regionale Umgebungen verwendet.

- *Durchschnittsgeschwindigkeit*: Die Gesamtdurchschnittsgeschwindigkeit des Fahrzeugs (Passagier- und Wartungsfahrten).

Die Durchschnittsgeschwindigkeit der Autos in der Schweiz wurde für jeden räumlich-zeitlichen Fall berechnet (Mikrozensus Verkehr (Bundesamt für Statistik (BFS) und Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), 2012)); Allgemein Spitzenstunden 32,4 km/h, Allgemein Nebenzeiten 34,0 km/h, Allgemein Nachtgeschwindigkeit 36,2 km/h, urbane Spitzenstunden 20,6 km/h, urbane Nebenzeiten 21,9 km/h, urbane Nacht 23,7, regionale Spitze 31,3 km/h, regionale Nebenzeiten 32,2 km/h und regionale Nacht 34,0 km/h.

- *Durchschnittliche Länge der Passagierfahrt*: Die durchschnittliche Fahrtweite der Fahrgäste, die den Dienst in Anspruch nehmen

Die durchschnittliche Länge der Schweizer Autofahrt wurde auf der Grundlage des Schweizer Mikrozensus Verkehr (Bundesamt für Statistik (BFS) und Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), 2012) für jeden räumlich-zeitlichen Fall berechnet; Allgemein Spitze 15,0 km, Allgemein Nebenzeiten 10,5 km, Allgemein Nacht 12,6 km, urbane Spitze 3,4 km, urbane Nebenzeiten 3,0 km, urbane Nacht 3,4 km, regionale Spitze 8,0 km, regionale Nebenzeiten 5,9 km und regionale Nacht 7,1 km.

- *Anteil Leerfahrten*: Prozentualer Anteil der Leerfahrten durch z.B. Umsetzen, Abhol-Wege oder Rückkehr zur Basis

Da Leerkilometer für Privatfahrzeuge das Ergebnis eines wesentlich anderen Nutzerverhaltens als heute wären (z.B. mehrere Personen, die sich privat für ein Fahrzeug koordinieren), wären hier viele weitreichende Annahmen über das Nutzerverhalten implizieren. Da dies über den Rahmen dieses Kapitels hinausgeht, sind Leerfahrten für Privatfahrzeuge hier ausgeschlossen. Für kommerzielle Dienstleistungen, basierend auf (Fagnant *et al.*, 2015), wurde angenommen, dass die Anzahl der Leerfahrten 8% für städtische Umgebungen beträgt, und basierend auf (Bösch *et al.*, 2016), 15% für regionale Umgebungen.

- *Anteil Wartungsfahrten*: Anteil der Fahrten durch Wartung, Reinigung und Reparatur.

Für Privatfahrzeuge wurden keine Wartungsfahrten angenommen (aufgrund des dichten Tankstellennetzes im Raum Zürich ist der zusätzliche Abstand durch Nachfüllen und/oder Reinigen vernachlässigbar). Für kommerzielle Dienstleistungen wurden 5% angenommen, basierend auf den Erfahrungen mit traditionellen *Carsharing*-Diensten.

Aufgrund der begrenzten Informationen über die öffentlichen Verkehrsmittel wurden durchschnittliche Tageswerte ohne zeitliche Differenzierung ermittelt. Im Durchschnitt wurden für den Bus- und Bahnbetrieb 19 Stunden angenommen, um die Nachtpause von 00:30 bis 05:30 Uhr in der Region Zürich, Schweiz, zu berücksichtigen. Dies überschätzt wahrscheinlich die Betriebsstunden der Fahrzeuge, da jedes einzelne Fahrzeug nicht für die vollen 19 Stunden betrieben wird. Die relative Aktivzeit wurde auf 85% geschätzt, basierend auf dem Fahrplan (Zürcher Verkehrsverbund, 2017). Die durchschnittliche Belegung und Geschwindigkeit der öffentlichen Verkehrsmittel wurde (Bundesamt für Verkehr, 2011) entnommen; für Stadtbusse wurde eine durchschnittliche Belegung von 22,42% und eine Geschwindigkeit von 21,31 km/h gemeldet, für Regionalbusse 12,6% und 20,89 km/h und für Regionalzüge eine Geschwindigkeit von 37,82 km/h. Die durchschnittliche Auslastung der Regionalzüge lag laut Geschäftsbericht der SBB (SBB AG, 2016) bei 22,7%. Leerfahrten und Wartungsfahrten wurden bereits in den durchschnittlichen Belegungen berücksichtigt und damit auf 0% gesetzt (SBB AG, 2016).

Eine vollständige Tabelle mit den verschiedenen Fällen und den entsprechenden Werten ist in Anhang I.3 enthalten. Die hier dargestellten aktuellen Nutzungswerte sind Durchschnittswerte auf Basis der aktuellen Marktsituation und Preisstruktur. Würden niedrigere Kosten angenommen, wären diese Werte wahrscheinlich zu hoch für die Belegung und zu niedrig für die Fahrtdauer.

4.4 Validierung mit aktuellen Daten

Die Kombination der Kostenstrukturen (Abschnitt 4.2) mit Nutzungsparametern (Abschnitt 4.3) ermöglicht die Berechnung von Durchschnittskostenwerten für jeden Anwendungsfall (Abschnitt 4.4). In einem ersten Schritt wurden die Ergebnisse mit den Daten der aktuellen Transportleistungen verglichen.

4.4.1 Privatfahrzeug

Ein durchschnittlicher PKW in der Schweiz kostet 0.71 CHF pro Kilometer (TCS, 2016). Die Kostenberechnungen hier ergaben Kosten von 0.69 CHF pro Kilometer für einen konventionellen privaten Mittelklassewagen mit durchschnittlicher Nutzung wie in (TCS, 2016). Auch in Anbetracht der Tatsache, dass die Anteile der verschiedenen Kostenkomponenten nur geringe Unterschiede aufweisen, wird unser Ansatz für die weitere Berechnung der Kostenstrukturen für Privatfahrzeuge herangezogen.

4.4.2 Taxi

In Zürich sind die Taxipreise mit einem Grundpreis von 8.00 CHF plus 5.00 CHF pro Kilometer geregelt. (Stadt Zürich, 2014). UberPop-Tarife bestehen aus einem Grundpreis von 3.00 CHF plus 0.30 CHF pro Minute und 1.35 CHF pro Kilometer (Uber, 2017). Für einen konventionellen Mittelklassewagen, der als Taxi in einer städtischen Umgebung eingesetzt wird (Nutzung wie definiert in Abschnitt 4.3), fallen Kosten von 3.38 CHF pro Kilometer an, die bei den oben genannten Taxi- und UberPop-Gebühren als stimmig angesehen werden können.

4.4.3 Öffentlicher Verkehr

Die Berechnung der Kostenwerte für Stadt- und Regionalbusse wurde auf die vollen Kosten pro Fahrzeugkilometer nach (Bundesamt für Verkehr, 2011) kalibriert. Die ursprünglichen Referenzwerte betragen 7.14 CHF pro Kilometer für die Stadt und 6,70 CHF pro Kilometer für Regionalbusse (Bundesamt für Verkehr, 2011). Die Kosten von 31.40 CHF pro Kilometer für Züge der Bahnleistungen wurden (SBB AG, 2016) entnommen.

In beiden Fällen ist mangels zusätzlicher, unabhängiger Informationsquellen keine eigentliche Validierung möglich.

4.5 Ergebnisse

Nach der Validierung in Abschnitt 4.4 wurde der oben dargestellte Ansatz zur Abschätzung der Kosten künftiger Transportleistungen herangezogen. Aufgrund der Vielzahl von Betriebsmodellkombinationen, Fahrzeugtypen und räumlichen Gegebenheiten wird im Folgenden nur eine Auswahl der wichtigsten Anwendungsfälle vorgestellt. Eine vollständige Liste mit weiteren Kombinationen findet sich in Anhang I.4.

In einem ersten Schritt wurde der Ansatz genutzt, um die Auswirkungen der Fahrzeugautomation auf die Kostenstrukturen verschiedener Mobilitätsdienste zu analysieren.

Tab. 9 *Kostenstrukturvergleich mit (Automatisiert) und ohne (Konv) Fahrzeugautomation für Privatfahrzeuge (Privatwagen) und Taxi Flotten ohne Pooling (Ind. Taxi)*

	Privatwagen Konv		**Privatwagen Automatisiert**		**Ind. Taxi Konv**		**Ind. Taxi Automatisiert**	
	KPKM [CHF]	*Anteil KPKM*	*KPKM [CHF]*	*Anteil KPKM*	*KPKM [CHF]*	*Anteil KPKM*	*KPKM [CHF]*	*Anteil KPKM*
Overheadkosten und Fahrzeugbetrieb					0.083	3.0%	0.08	19.6%
Gehälter					2.409	88.3%		
Treibstoff	0.056	11.6%	0.051	10.0%	0.057	2.1%	0.051	12.5%
Reinigung	0.005	1.1%	0.005	1.0%	0.026	0.9%	0.117	28.8%
Parken und Mautgebühren	0.068	13.9%	0.068	13.4%	0.033	1.2%	0.032	7.9%
Steuer	0.011	2.3%	0.011	2.2%	0.002	0.1%	0.002	0.6%
Versicherung	0.044	9.1%	0.022	4.4%	0.008	0.3%	0.004	0.9%
Abschreibungen	0.203	41.9%	0.243	48.3%	0.061	2.2%	0.073	18.0%
Zins	0.039	8.0%	0.046	9.2%	0.002	0.1%	0.002	0.5%
Wartung und Verschleiss	0.059	12.2%	0.058	11.4%	0.047	1.7%	0.046	11.3%
Summe	**0.485**	**100%**	**0.504**	**100%**	**2.728**	**100%**	**0.407**	**100%**

KPKM: Kosten pro Personenkilometer

4.5.1 Kostenstrukturen

Um die Auswirkungen der automatisierten Fahrzeugtechnik besser zu verstehen, wurden die Kostenstrukturen verschiedener Betriebsmodelle verglichen. Zunächst wurden konventionelle Privatfahrzeuge und konventionelle Taxis (Flotten) ohne *Pooling* untersucht.

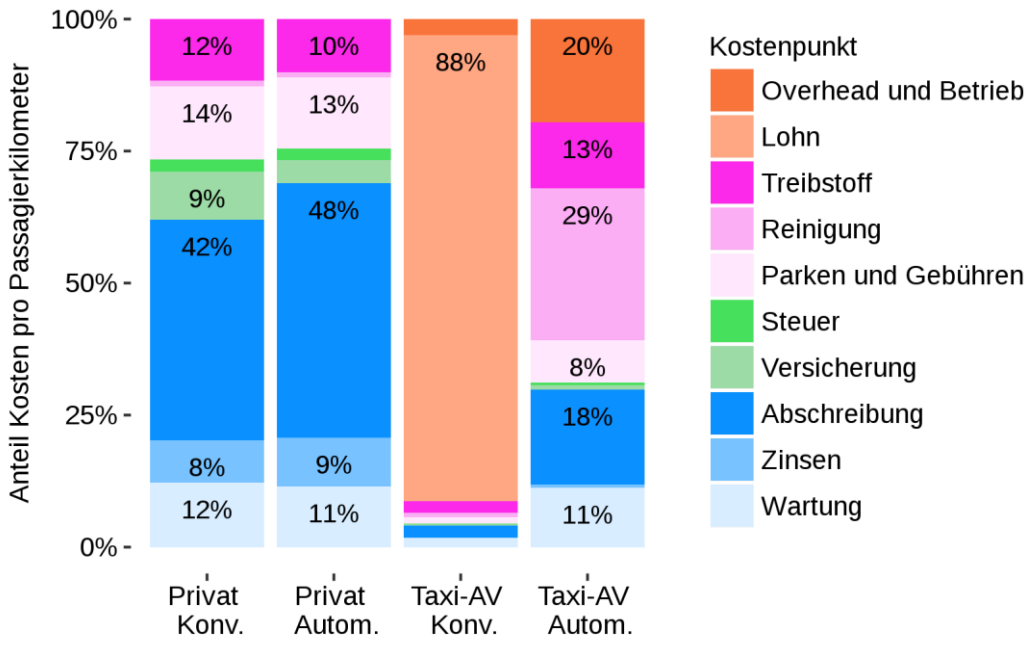


Abb. 1 *Kostenstrukturvergleich mit (Autom.) und ohne (Konv.) Fahrzeugautomation für Privatfahrzeuge und Taxis ohne Pooling*

Abb. 1 zeigt die Kostenkomponenten für konventionelle Mittelklassefahrzeuge im urbanen Umfeld mit und ohne Fahrzeugautomation (Siehe ***Tab. 9*** für die vollständige Liste). Wie dargestellt, gibt es einen generellen Unterschied zwischen den beiden Betriebsmodellen. Während die Betriebskosten eines Privatfahrzeugs meist durch die mit dem Auto verbundenen Kosten (wie z.B. Abschreibungen, Versicherungen oder Zinsen) bestimmt werden, werden die Betriebskosten der aktuellen Taxiflotten meist durch das Gehalt des Fahrers bestimmt. Die Verwaltungskosten sowie die Kosten im Zusammenhang mit dem Auto spielen eine untergeordnete Rolle.

Die Fahrzeugautomation verändert die Kostenstrukturen der verschiedenen Dienste drastisch. Generell wirken sich drei Effekte aus: Einerseits erhöhen automatisierte Fahrzeugtechnologien den Fahrzeugkaufpreis, andererseits senken sie die Betriebskosten durch geringere Versicherungs-, Wartungs- und Kraftstoffkosten. Darüber hinaus ermöglichen sie den Betrieb der Taxi Flotten ohne Fahrer und reduzieren damit den Hauptkostenanteil.

Bemerkenswert ist, dass sich bei privaten Wagen die beiden Effekte ausgleichen, so dass die Betriebskosten weitgehend unverändert bleiben (rund 0.49 CHF/km, siehe ***Tab. 9***). Der dritte Effekt gilt nicht für private Fahrzeuge, da durch deren Automatisierung kein direkter monetärer Gewinn entsteht.

Aufgrund der deutlich höheren Auslastung überwiegen die Einsparungen bei den variablen und den Arbeitskosten die Steigerungen bei den fixen Kosten für *Ride-Hailing* und Taxi Fahrzeuge. Insbesondere die fahrerlose Technologie ist der Schlüsselfaktor für deutlich niedrigere Produktionskosten bei solchen Flotten. Es wird davon ausgegangen, dass die

Betriebskosten eines Mitfahr- oder Taxifahrzeugs von 2,73 CHF/km auf 0,41 CHF/km sinken würden (siehe ***Tab. 9***). Aufgrund der Abwesenheit von Fahrer und Mitfahrern wird jedoch von den Kunden solcher Taxidienste erwartet, dass sie sich im Fahrzeug unverantwortlicher verhalten (z.B. durch Essen), was zu einer schnelleren Verschmutzung des Fahrzeugs führt. Um diesen Effekt abzuschätzen, wurde der minimale Reinigungsaufwand der aktuellen Car-Sharing-Programme genutzt. Wie in ***Abb. 1*** dargestellt, führen schon diese konservativen Annahmen zu einem erheblichen Reinigungsaufwand, der schnell fast ein Drittel der Betriebskosten eines selbstfahrenden Taxis ausmachen würde. Zusammen mit einem geschätzten Anteil von 20% für Overheadkosten bedeutet dies, dass mehr als die Hälfte der Betriebskosten der automatisierten Fahrzeugflotten Service- und Verwaltungskosten sind. So können Anbieter durch die Optimierung ihrer Betriebsprozesse erhebliche Gewinne erzielen und so ihren jeweiligen Marktanteil erhöhen. Aber auch ohne solche zusätzlichen Massnahmen würden automatisierte Fahrzeugtechnologien es Flotten ermöglichen, mit etwas geringeren Kosten zu arbeiten als Privatfahrzeuge.

4.5.2 Auswirkungen der Fahrzeugautomation

Wie bereits erwähnt, ist der Einfluss der Fahrzeugautomatisierung auf die Kostenstruktur zukünftiger Transportdienstleistungen erheblich. ***Abb. 2*** zeigt die Auswirkungen der Automatisierung auf die heutigen Hauptbetriebsarten für den städtischen und den regionalen (Vorstadt und Ausserorts) Fall. In Anbetracht der dominierenden Rolle der Mittelklassewagen im heutigen Verkehrssystem, werden die Privat- und Taxibetrieb Modelle mit mittelgrossen Fahrzeugen durchgeführt. Bis zu diesem Zeitpunkt wird die Elektrifizierung der Fahrzeuge nicht berücksichtigt (mit Ausnahme von Zügen, die heute schon elektrifiziert sind), um den Effekt der Automatisierung zu isolieren.

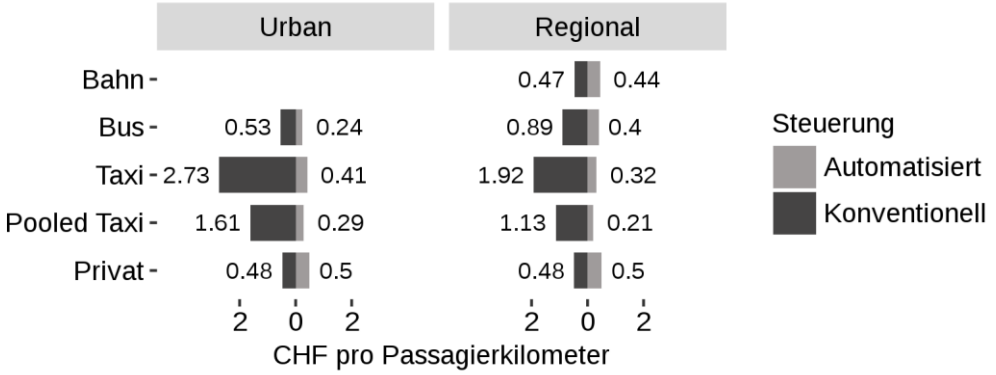


Abb. 2 *Kostenvergleich verschiedener Modi mit und ohne automatisierte Fahrzeugtechnik*

Abb. 2 zeigt, dass der Privatwagen ohne Automatisierung die niedrigsten Betriebskosten pro Personenkilometer hat (ausgenommen Regionalverkehr). Wegen des bezahlten Fahrers sind Taxidienste wesentlich teurer. Im derzeitigen Transportsystem werden sie aus Gründen der Bequemlichkeit oder in Situationen ohne Alternativen eingesetzt, nicht wegen ihrer Kostenwettbewerbsfähigkeit. Nicht automatisierte Stadtbusse und Regionalbahnen fahren zu ähnlichen Kosten pro Personenkilometer wie Pkw.

Mit der Automatisierung von Fahrzeugen ändert sich das Bild erheblich. Während sich die Kosten für PKW und Bahn nur geringfügig ändern, ermöglicht die automatisierte Fahrtechnik den Betrieb von Taxidiensten und Bussen zu deutlich geringeren Kosten, noch günstiger als PKW.

In einer städtischen Umgebung werden Taxis billiger als herkömmliche Busse, aber sie bleiben teurer als automatisierte Busse. Die absolute Kostendifferenz zwischen Bussen und Taxis wird jedoch durch die Automatisierung von 2.20 CHF/pkm auf 0.17 CHF/pkm für einzeln genutzte Taxis deutlich reduziert. Selbst relativ gesehen werden automatisierte

Taxis nur 71% teurer für Einzelpersonen und 21% teurer für die gebündelte Nutzung als automatisierte Busse (gegenüber 415% und 204% vor der Automatisierung).

Im regionalen Umfeld, definiert als Vorort- und Ausserortsfahrten, sind automatisierte Taxis und Busse billiger als Privatfahrzeuge und Schienenverkehr. Hier sind PAVs der günstigste Modus (0.21 CHF/pkm), gefolgt von TAVs (0.32 CHF/pkm). In einem regionalen Umfeld, basierend auf den Betriebskosten, scheinen automatisierte Busse und Bahnen nicht mehr wettbewerbsfähig zu sein (0.40 und 0.44 CHF/pkm).

4.5.3 Robustheit der Schätzungen

Die Berechnung der dargestellten Kostenstrukturen beruht auf einer Reihe von Annahmen, die nach heutigem Kenntnisstand unterschiedliche Sicherheitsgrade aufweisen. Um zu analysieren, wie robust die Ergebnisse gegenüber Veränderungen der angenommenen Kostenkomponenten sind, wurden drei der Variablen mit der höchsten Unsicherheit in der Berechnung variiert. Die ausgewählten Variablen sind: Vignettenpreis, Overheadkosten für Flottenbetreiber und Anteil Aktivzeit der Fahrzeuge.

Um die Komplexität des Problems zu reduzieren, wurden Änderungen in jeder der drei Variablen nur eindimensional analysiert. Die resultierenden Elastizitäten für eine 10%ige Erhöhung der drei Variablen sind in ***Tab. 10*** dargestellt. Sie entsprechen ***Abb. 1***, da die Gehälter der wichtigste Kostentreiber für konventionelle Dienstleistungen sind, während für automatisierte Fahrzeuge auch die Hardware wichtig ist (da der relative Effekt des Fahrzeugpreises wesentlich höher ist). Wie aus der Tabelle ersichtlich, wirken sich Änderungen des Vignettenpreises eines Fahrzeugs nur bei privat genutzten Fahrzeugen erheblich aus. Bei den Flottenfahrzeugen zeigen dagegen weder der Fahrzeugpreis noch die Veränderungen der Overheadkosten einen wesentlichen Einfluss. Erhöhungen des Anteils Aktivzeit eines Fahrzeugs haben einen erheblichen Einfluss auf die Betriebskosten. Obwohl die tatsächlichen Auswirkungen von Änderungen des Anteils Aktivzeit nichtlinear sind, weil die Fix-Kosten über die relative Aktivzeit verteilt sind (also eine inverse Relation), kann die lineare Approximation zwischen 30% und 90% Aktivzeit angenommen werden. Für diesen Bereich können kombinierte Veränderungen der drei Variablen durch Addition der einzelnen Effekte angenähert werden.

Beim Vergleich der verschiedenen Modi zeigen die Ergebnisse, dass automatisierte Busse und Solo-Fahrzeuge am meisten von erhöhten aktiven Zeiten und reduzierten Overheadkosten profitieren. Im Vergleich zu ***Abb. 2*** wären jedoch erhebliche Veränderungen in den drei Variablen erforderlich, um die Kostenverhältnisse der verschiedenen Fahrzeugtypen tatsächlich zu verändern. Es ist daher davon auszugehen, dass die oben dargestellten Kostenstrukturen auch die relative Reihenfolge der verschiedenen Fahrzeugtypen widerspiegeln.

Tab. 10 *Robustheit der geschätzten Kostenstrukturen (Kosten pro Passagierkilometer) bis zu einem Anstieg von 10% für ausgewählte Variablen*

		Privat	**Urban**			**Regional**				
			Sammeltaxi			*Linienbasiert*	*Sammeltaxi*			*Linienbasiert*
		Midsize	*Solo*	*Midsize*	*Van*	*Bus*	*Solo*	*Midsize*	*Van*	*Bus*
Fahrzeugrpreis	*Konvetionell*	**0.024**	**0.003**	**0.004**	**0.007**	**0.010**	**0.004**	**0.004**	**0.008**	**0.018**
		5.0%	**0.1%**	**0.2%**	**0.4%**	**1.9%**	**0.3%**	**0.8%**	**0.8%**	**2.0%**
	Automatisiert	**0.029**	**0.004**	**0.004**	**0.008**	**0.010**	**0.004**	**0.005**	**0.009**	**0.018**
		5.8%	**1.0%**	**1.5%**	**2.3%**	**4.2%**	**2.3%**	**3.6%**	**4.2%**	**4.4%**
Overheadkosten	*Konvetionell*	**-**	**0.006**	**0.003**	**0.003**	**0.004**	**0.002**	**0.001**	**0.001**	**0.005**
		-	**0.2%**	**0.2%**	**0.2%**	**0.7%**	**0.2%**	**0.1%**	**0.1%**	**0.6%**
	Automatisiert	**-**	**0.007**	**0.003**	**0.003**	**0.004**	**0.002**	**0.001**	**0.001**	**0.005**
		-	**1.6%**	**1.0%**	**0.7%**	**1.7%**	**0.9%**	**0.5%**	**0.3%**	**1.3%**
Aktivzeit	*Konvetionell*	**-**	**-0.331**	**-0.137**	**-0.137**	**-0.038**	**-0.088**	**-0.036**	**-0.036**	**-0.065**
		-	**-8.8%**	**-8.5%**	**-8.2%**	**-7.2%**	**-7.9%**	**-7.2%**	**-6.2%**	**-7.3%**
	Automatisiert	**-**	**-0.015**	**-0.006**	**-0.007**	**-0.012**	**-0.004**	**-0.002**	**-0.002**	**-0.017**
		-	**-3.6%**	**-2.2%**	**-1.8%**	**-4.9%**	**-2.1%**	**-2.0%**	**-1.3%**	**-4.3%**

Die obere Zeile zeigt die absolute Veränderung der Kosten[CHF] pro Personenkilometer, die untere Zeile die relative Veränderung.

4.6 Die neue Wettbewerbssituation

Basierend auf den oben beschriebenen Kostenstrukturen werden geeignete Marktnischen für verschiedene Betriebsmodelle mit automatisierten Fahrzeugen untersucht. Neben dem privaten Fahrzeugbesitz (Mittelklasse, privates AVs), Mittelklasse Taxis (TAVs) und linienbasierten öffentlichen Verkehrsmitteln (aCityBus im städtischen Bereich und aRegBus für den regionalen Bereich) wird auch eine Flotte von gemeinsam genutzten Solofahrzeugen (aSolo) betrachtet. Unter Berücksichtigung der laufenden Entwicklungen wird davon ausgegangen, dass bis zur Einführung der automatisierten Fahrtechnik alle Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb ausgestattet sein werden.

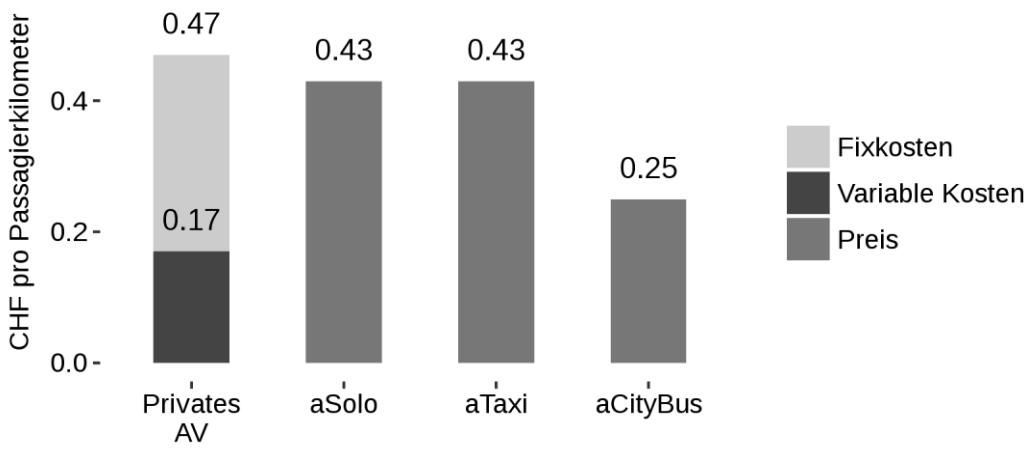
Im Gegensatz zu den beiden vorhergehenden Abschnitten wechselt hier die Perspektive vom Anbieter zum Anwender, dargestellt durch einen Wechsel von der Kostenanalyse zur Preisanalyse. Der Preis setzt sich zusammen aus den Kosten des Betreibers zuzüglich der erwarteten Profitmarge, Mehrwertsteuer und Gebühren (siehe Abschnitt 4.2.4). Dies gilt selbstverständlich nicht für Privatfahrzeuge, da dort der Nutzer auch der Betreiber ist.

4.6.1 Die Gesamtansicht

Abb. 3 fasst die Preise pro Personenkilometer für die oben genannten Verkehrsträger in einer städtischen und einer regionalen Umgebung (Vorstadt und Ausserorts) mit durchschnittlichen Nutzungen wie in Abschnitt 4.3 beschrieben zusammen. Sie zeigt die zukünftige Wettbewerbssituation. Die Kosten für Privatfahrzeuge werden zwischen fixen und variablen Kosten unterschieden, da private Nutzer bei ihrer kurzfristigen Wahl oft nur die unmittelbaren out-of-pocket-Kosten berücksichtigen.

In beiden Ortstypen ist zu beobachten, dass ein Service mit aSolo-Fahrzeugen nicht wesentlich günstiger ist als TAVs, denn in der Schweiz liegt die durchschnittliche Belegung eines Mittelklassefahrzeugs heute zwischen 1,34 und 1,46 Personen pro Fahrt (siehe Abschnitt 4.3). Das reicht aus, um TAVs pro Passagierkilometer mit den gemeinsamen aSolos konkurrenzfähig zu machen. Es ist auch zu beobachten, dass Stadtbusse zwar wesentlich günstiger sind als TAVs (siehe ***Abb. 3a***), dass TAVs aber für rund 80% des regionalen Buspreises Leistungen erbringen kann (siehe ***Abb. 3b***). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass TAVs sehr wettbewerbsfähig sind, insbesondere bei regionalen Gegebenheiten, wenn man die vollen Kosten für Privatfahrzeuge berücksichtigt. Zusammen mit aSolos sind sie das günstigste Verkehrsmittel im regionalen Umfeld und zählen zu den günstigsten individuellen Serviceoptionen im urbanen Umfeld.

(a) Zukünftige Wettbewerbssituation – Städtisches Szenario



(b) Zukünftige Wettbewerbssituation – Regionales Szenario

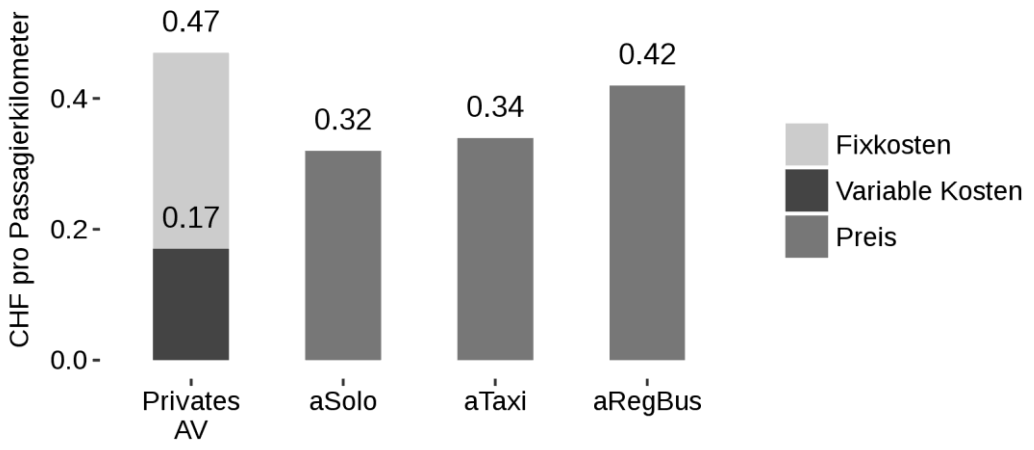


Abb. 3 *Die zukünftige Wettbewerbssituation*

4.6.2 Bedarfsorientierte Sicht

Nachdem gezeigt werden konnte, dass Flottenfahrzeuge zu wettbewerbsfähigen Preisen angeboten werden können, werden in einem nächsten Schritt verschiedene Fahrzeuggrössen verglichen. Zu diesem Zweck wurden für verschiedene Fahrzeugtypen und Leistungsniveaus Mindestpreise pro Personenkilometer berechnet. Es wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeuge als Teil einer grösseren Flotte betrieben werden. Daher ergeben sich keine zusätzlichen Skaleneffekte beim Hinzufügen weiterer Fahrzeuge zu einer spezifischen Route und es wird das obige Betriebsmodell verwendet (siehe Abschnitt 4.3).

Die Ergebnisse sind in ***Abb. 4*** dargestellt. Es wird sofort deutlich, dass elektrische Antriebs- und Selbstfahrtechnologien eine deutliche Senkung der Preise für alle Verkehrsträger ermöglichen. Dieser Rückgang betrifft jedoch nicht alle Modi in gleicher Weise wie in Abschnitt 4.5 dargestellt. Tatsächlich werden die substantiellsten Zugewinne bei geteilten Mittelklassefahrzeugen erzielt, bei denen der Preis pro Personenkilometer bei Volllast um 78% auf 0,24 CHF/ pkm fällt. So verringert sich der Preisunterschied zwischen einem Stadtbus und einem mittelgrossen Taxi bei Volllast von 0.95 CHF/pkm auf 0.18 CHF/pkm. Automatisierte Elektro-Vans (0,21 CHF/pkm) und Kleinbusse (0,17 CHF/pkm) sind im

Volllastbetrieb nicht wesentlich günstiger als Mittelklassefahrzeuge. Die detaillierten Kostenwerte können die Realisierbarkeit verschiedener automatisierter Fahrzeugbetriebsmodelle auf verschiedenen Nachfragestufen vorhersagen. Beispielsweise zeigen die Daten, dass automatisierte Solofahrzeuge nur für nachfragearme Quelle-Ziel-Beziehungen das günstigste Verkehrsmittel sind. Bei einer durchschnittlichen Belegung von zwei Personen auf dieser Strecke wäre ein Mittelklassewagen bereits effizienter. Auf der stark nachgefragten Seite des Spektrums ist ein Stadtbus bei einem Bedarf von mehr als 15 gleichzeitigen Fahrgästen pro Richtung wirtschaftlicher als Mittelklassewagen. Die Schwelle zwischen einem Kleinbus und einem Stadtbus liegt bei 21 Fahrgästen. Die durchschnittliche Auslastung eines Stadtbusses beträgt heute 22,42 Fahrgäste (Bundesamt für Verkehr (2011)).

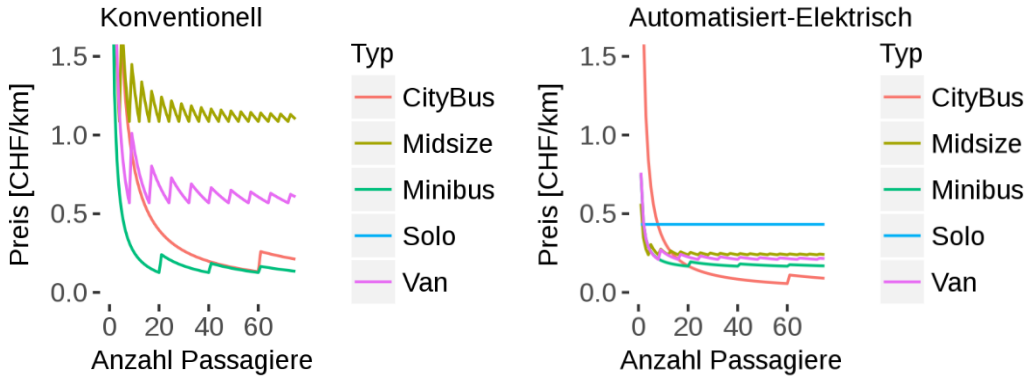


Abb. 4 *Preis pro Personenkilometer im Verhältnis zur Anzahl der Passagiere*

4.7 Diskussion

4.7.1 Eine neue Welt?

Diese Ergebnisse helfen zu verstehen, welche Rolle die verschiedenen Verkehrsträger in einem zukünftigen Verkehrssystem spielen können. Des Weiteren erleichtern sie künftige Forschungsvorhaben und die Vorbereitungen einer möglichen Implementierung.

Insbesondere zeigt sich, dass Privatfahrzeuge auch im Zeitalter der automatisierten Fahrzeuge eine attraktive Option darstellen, da die Kosten für den Nutzer (0,17 CHF/km, vgl. ***Abb. 3***) geringer sind als bei den meisten anderen Verkehrsträgern (und noch geringer sein könnten, wenn der Nutzer z.B. selbst Strom produziert). Verglichen mit der Annahme von Fagnant und Kockelman (2015) eines Preises von $1.00 pro Meile für ein gemeinsames AVs, könnten sogar die vollen Kosten des privaten Fahrzeugbesitzes wettbewerbsfähig sein.

Tatsächlich könnte der Kauf eines automatisierten Fahrzeugs als eine Investition in einen privaten Mobilitätsroboter angesehen werden, der sowohl für Chauffeurdienste als auch für Besorgungen genutzt werden kann; diese Option wird daher noch attraktiver sein als ein herkömmliches Fahrzeug. Es ist daher zu erwarten, dass eine beträchtliche Anzahl von Menschen die private Nutzung eines Mobilitätsroboters schätzen und sich bereit erklären wird, die damit verbundene Prämie zu zahlen. Darüber hinaus sind die traditionellen Automobilhersteller stark motiviert, die aktuelle emotionale Bindung vieler Menschen an ihr Auto aufrechtzuerhalten. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass selbst die von Burns *et al.* (2013) und Johnson (2015) geschätzten niedrigen Kosten für PAVs nicht ausreichen könnten, um die Zeit des Privatwagens zu beenden.

Im Gegensatz zum privaten Fahrzeugbesitz deuten die Ergebnisse dieser Untersuchung darauf hin, dass der derzeitige linienbasierte öffentliche Verkehr über seine Automatisierung hinaus wahrscheinlich Anpassungen erfahren wird. Obwohl sein Betrieb billiger wird, werden sich Taxisysteme und andere neue Formen des öffentlichen Verkehrs

als neue und ernsthafte Konkurrenz herausstellen. Die Ergebnisse dieses Kapitels (siehe ***Abb. 3*** und ***Abb. 4***) deuten jedoch darauf hin, dass die Situation nicht so klar ist, wie z.B. von Hazan *et al.* (2016) angenommen. Berücksichtigt man die Vollkosten der Fahrzeuge in Verbindung mit der geringen durchschnittlichen Auslastung, die auch im städtischen Umfeld durch *Pooling* nicht deutlich erhöht werden kann (Internationales Verkehrsforum, 2015), ist der ÖV nach wie vor wettbewerbsfähig - vor allem im städtischen Umfeld und bei stark nachgefragten Verbindungen - und noch mehr, wenn unrentable wenig nachgefragte Verbindungen mit flexibleren Services bedient werden können und damit die durchschnittliche Auslastung steigt. Man sollte zudem bedenken, dass die heutige Form des öffentlichen Verkehrs in der Schweiz mit rund 50% der Betriebskosten gefördert wird (Laesser und Reinhold, 2013). Im Prinzip könnten die Betreiber automatisierter Flotten bei konstanter Subventionierung und Nachfrage den öffentlichen Personennahverkehr kostenlos anbieten. Allerdings würden öffentliche Gelder - sofern vorhanden - viel sinnvoller für neue Formen des öffentlichen Verkehrs ausgegeben, die nicht nur niedrigere Betriebskosten, sondern auch einen höheren Kundennutzen durch mehr Komfort, schnellere Reisezeiten und weniger Transfers versprechen. Daher ist es wahrscheinlich, dass besonders ländliche oder tangentiale Beziehungen durch neue Formen des automatisierten öffentlichen Verkehrs bedient werden.

Solofahrzeuge werden von einigen Forschern als ideale Ergänzung des öffentlichen Nahverkehrs gesehen. Sie bieten direkten Punkt-zu-Punkt-Service für Einzelreisende und versprechen kurze Anfahrts- und Reisezeiten. Sie sind jedoch nicht für den Transport von Gepäck ausgelegt und im Betrieb nicht viel günstiger als Mittelklassefahrzeuge (siehe ***Abb. 3***). Abgesehen von den Richtlinien ist es daher wahrscheinlicher, dass sich die Betreiber von Flotten für eine homogene Midsize oder Van-Flotte entscheiden, um sowohl Einzelreisende als auch kleinere Gruppen zu bedienen.

Flotten bestehend aus PAVs und SAVs sind ein weiterer Verkehrsträger, der oft als der neue "Alleskönner" im Verkehr vorgeschlagen wird: Er sei zu so niedrigen Preisen anbietbar, dass er alle bekannten Verkehrsträger ersetzen wird. Wie dieses Kapitel zeigt, ändert sich dieses Bild jedoch, wenn man die Vollkosten, einschliesslich Overheadkosten, Parken, Wartung und Reinigung, berücksichtigt. Gerade diese Faktoren, die in den meisten Studien zum Thema bisher vernachlässigt wurden (siehe Abschnitt 4.1), tragen zwei Drittel zu den Gesamtkosten der aTaxis bei (siehe Abschnitt 4.5). Es überrascht daher nicht, dass die hier ermittelten Kosten für entsprechende Services wesentlich höher sind als in früheren Arbeiten (z.B. Burns *et al.* (2013); Johnson (2015); Stephens *et al.* (2016); Hazan *et al.* (2016)). Da TAVs und PAVs immer noch sehr wirtschaftlich zu betreiben sind und OEMs auch ein Interesse an geteilten Diensten haben könnten (Abhishek *et al.*, 2016), könnten diese Geschäftsmodelle eine gute Zukunft haben. Der Flottenbetrieb von AVs hat auch den Vorteil, dass die Nutzung kontrolliert und (geografisch) eingeschränkt werden kann - insbesondere im Vergleich zu Privatfahrzeugen. Dies minimiert das Haftungsrisiko für OEMs und Mobilitätsanbieter, solange AVs noch keine etablierte und bewährte Technologie sind.

Car-Pooling könnte die Preise senken, wenn eine hohe durchschnittliche Belegung erreicht werden kann. Hohe Belegungen haben jedoch mehr Umwege, längere individuelle Reisezeiten und mehr Fremde in der gleichen intimen Umgebung eines Autos zur Folge. Vor allem letzteres könnte ein Hindernis für den Erfolg des *gepoolten* Mid-Size oder Van Flotten sein. Obwohl die Menschen normalerweise die Privatsphäre ihres eigenen Fahrzeugs der Anonymität einer Busfahrt vorziehen, teilen sich viele ein Fahrzeug mit Fremden (Schmid *et al.*, 2016). In dieser Hinsicht ist mehr Forschung erforderlich, um die Kundenpräferenzen besser zu verstehen und gemeinsam genutzt Fahrzeuge entsprechend zu gestalten, denn im Erfolgsfall wird die Fahrgemeinschaften mit AVs definitiv eine Reihe von Vorteilen haben (Friedrich und Hartl, 2016; International Transport Forum, 2015).

Eine weitere Herausforderung für geteilte Services wird eine Lösung zur Aufrechterhaltung der Fahrzeugsauberkeit sein. Die obige Analyse ergab, dass die Reinigung selbst bei niedrigen Reinigungsfrequenzen und -kosten den grössten Beitrag zu den Betriebskosten automatisierter (individueller) Taxisysteme verursacht. Ein höherer Verschmutzungsgrad

kann sogar die Wettbewerbsfähigkeit durch hohe Kosten oder niedrige Servicestandards gefährden.

4.7.2 Einschränkungen

Die in diesem Kapitel vorgestellte Analyse ist - bis heute - der umfassendste Ansatz zur Abschätzung der Betriebskosten künftiger automatisierter Verkehrsdienste. Es umfasst mehrere Aspekte, die in früheren Studien übersehen oder vernachlässigt wurden (z.B. Overheadkosten oder Reinigung) und zeichnet ein klareres und/oder anderes Bild des zukünftigen Transportsystems als frühere Arbeiten (Burns, 2013; Fagnant und Kockelman, 2015; Litman, 2015; Johnson, 2015; Stephens *et al.*, 2016; Hazan *et al.*, 2016). Dieser detaillierte Ansatz offenbart zwar neue Erkenntnisse, ist aber auch mit verschiedenen Einschränkungen verbunden.

Erstens ist es wahrscheinlich, dass die Fahrzeugautomation die Nachfrage nach bestimmten Arten von Infrastruktur, wie Parkplätzen, verändern wird, was sich auch auf die angenommenen Preise auswirken könnte. Es ist auch möglich, dass automatisierte Fahrzeuge Veränderungen im gesamten Mobilitätsverhalten hervorrufen, die von der Regierung Massnahmen zum Ausgleich negativer Effekte erfordern. Die Auswirkungen staatlicher Massnahmen (z.B. Strassenbenutzungsgebühren), externer Subventionen, firmeninterner Quersubventionen und spezieller Preisstrategien wurden hier jedoch ignoriert; die Aufmerksamkeit wurde auf die heute bereits umgesetzten Massnahmen beschränkt. Auch erweiterte Dienstleistungen, wie z.B. nicht fahrendes Personal in den Fahrzeugen oder Premiumfahrzeuge, wurden ignoriert. Solche Extras können Teil eines verbesserten Kundenerlebnisses sein (mit einer entsprechenden Preisanpassung) oder aufgrund gesetzlicher Vorgaben (z.B. Personal, das Nutzer mit Einschränkungen unterstützt).

Während solche Massnahmen und Zusatzleistungen eine erhebliche Auswirkung auf die Preisstruktur und damit auf die Wettbewerbssituation haben werden, werden deren Kosten wahrscheinlich an die Nutzer weitergegeben. Daraus folgt, dass sie nicht wesentlich die Kostenstruktur der verschiedenen Dienste für den Anbieter beeinflussen. Aufgrund ihrer Unvorhersehbarkeit und der Tatsache, dass sie oft auf der Grundlage von Analysen wie den hier vorgestellten entworfen wurden, wurde beschlossen, diese Fragen für die zukünftige Forschung offen zu lassen. Szenariobasierte Analysen möglicher Massnahmen, z.B. zur Erzielung sozial optimaler Preise oder zur Einbeziehung von Externalitäten in die Preise sowie zur Untersuchung unterschiedlicher Preis-/Leistungskombinationen, könnten ein weiteres Themenfeld für zukünftige Arbeiten sein.

Zu erwähnen ist, dass die Bus- und Zugkapazitäten nach der Automatisierung voraussichtlich angepasst werden. Während in Abschnitt 4.6.2 der Einfluss der unterschiedlichen Auslastungsraten analysiert wurde, berücksichtigt diese Studie nicht die unterschiedlichen Fahrzeugkaufpreise und die gestiegenen Kosten des Fahrzeugmanagements für das Flottenwachstum. Es wird erwartet, dass eine erhöhte Flexibilität der Ressourcenplanung in einem System ohne Fahrer zu finanziellen Einsparungen führen wird. Da zur Quantifizierung dieser Einsparungen eine umfassende Analyse erforderlich wäre, würden diese Effekte den Rahmen dieses Kapitels sprengen.

Während die Kostenstrukturen von Fahrzeugen, ob privat oder als geteilte Fahrzeuge, mit hohem Detaillierungsgrad analysiert werden konnten, sind die Overheadkosten der geteilten Mobilitätsdienste in den jeweiligen Unternehmen gut gehütete Geheimnisse. Darüber hinaus (Federal Transit Administration, 2016) variieren diese Zahlen bei Unternehmen ähnlicher Grösse sehr stark, was darauf hindeutet, dass weitere Faktoren wie interne Organisation und detaillierter Geschäftsprozess eine wichtige Rolle spielen. Dementsprechend sind Schätzungen der Overheadkosten der geteilten Dienste und der Gesamtkosten öffentlicher Verkehrsdienste mit Vorsicht zu geniessen.

Gleiches gilt für die Kosteneffekte neuer Technologien. Elektroautos sind bereits auf dem Markt und somit sind Schätzungen der Kosteneffekte zuverlässig und fundiert. Die Auswirkungen der Automatisierung sind jedoch ungewiss. In diesem Zusammenhang

werden in diesem Kapitel verschiedene Faktoren vorgestellt, die zu den beobachteten Gesamtkosten führen. Anschliessend wird der Effekt der Automatisierung für jeden Kostenfaktor separat geschätzt, was zu genaueren und zuverlässigeren Schätzungen führt. Soweit verfügbar, basieren diese Schätzungen auf den in der Literatur angegebenen Werten. Wir sind uns jedoch bewusst, dass selbst solche detaillierten Schätzungen fragwürdig sein können. So basieren die Auslastungswerte in dieser Studie auf den aktuellen Marktgegebenheiten und Preisstrukturen. Werden radikal niedrigere Kosten angenommen, dürften sich diese Werte erheblich ändern (z.B. geringere Belegung oder längere Fahrten). Sobald die Auswirkungen des Reiseverhaltens und die Nutzungsmuster solcher Systeme klarer werden, kann der in dieser Studie vorgestellte Ansatz für eine szenariobasierte Analyse ihrer Kostenstrukturen genutzt werden und wird wahrscheinlich zu genaueren Ergebnissen führen.

4.8 Fazit

Dieses Kapitel stellt eine detaillierte Kostenschätzung für aktuelle und zukünftige Verkehrsträger unter besonderer Berücksichtigung von automatisierten Fahrzeugen dar. Sie basiert auf einer detaillierten Kostenstrukturrekonstruktion verschiedener Verkehrsleistungen, soweit vorhanden. Diese Analyse geht über frühere Abschätzungen der Kostenstrukturen zukünftiger Verkehrsträger hinaus, sowohl was den Detaillierungsgrad als auch die Rigorosität betrifft.

Der Ansatz wurde validiert und liefert neue Erkenntnisse über die Auswirkungen der Automation auf verschiedene Verkehrsdienste und Fahrzeugkategorien. Zum Beispiel ist es klar, dass Flotten von gemeinsam genutzten automatisierten Fahrzeugen relativ gesehen billiger werden können als andere Verkehrsmittel, aber in absoluten Zahlen wird der Unterschied gering sein. So wird es auch weiterhin Konkurrenz durch andere Verkehrsträger und sogar durch den privaten Pkw-Besitz geben, der über die Anfänge automatisierter Fahrzeugtechnologien hinausgehen kann, indem er den Luxus und den Komfort eines persönlichen Mobilitätsroboters bietet. Andererseits konnte diese Untersuchung die Erwartungen (z.B. Meyer *et al.* (2017)) erfüllen, dass konventionelle öffentliche Verkehrsmittel in der neuen Ära dem Wettbewerb ausgesetzt sein könnten.

Wichtig ist auch, dass der Erfolg von AV Flotten von einem Faktor abhängt, der bisher ignoriert wurde - dem Reinigungsaufwand. Die Entwicklung tragfähiger Geschäftsmodelle für AV Flotten beinhaltet laut unseren Berechnungen Lösungen, die von den Kunden verlangen, dass sie sich an Bord angemessen verhalten (z.B. Videobeobachtung von Passagieren, oder eine Überprüfung durch den nächsten Nutzer auf den Zustand des Fahrzeugs, um unverantwortliche Passagiere zu identifizieren) und/oder Fahrzeuge zu reinigen und zu reparieren, was zu geringeren Kosten führt.

Basierend auf einem ausschliesslich kostenbasierten Ansatz konnten mit dieser Untersuchung Anwendungsfälle zukünftiger Verkehrsträger geklärt werden, obwohl noch viele offene Fragen offen sind und weiterer Forschung bedürfen. Beispielsweise wird die tatsächliche Wahl des Verkehrsmittels nicht nur von den Kosten bestimmt, sondern im Wesentlichen auch von der Reisezeit und dem Komfort (Zeitwert) sowie anderen Faktoren wie der Wahrnehmung von Transfers, Wartezeiten etc. - die alle in diesem Kapitel nicht untersucht wurden. Um die Grösse der jeweiligen Marktsegmente in einem realistischen Umfeld besser verstehen zu können, müssen die vorgeschlagenen Systeme in einem Versuchs- oder Simulationsansatz im Feld umgesetzt werden. Aufgrund seiner Komplexität konnte der Fernverkehr in dieser Studie nicht berücksichtigt werden, aber es ist bekannt, dass er eine wichtige Rolle bei der Auswahl der gekauften Mobilitätswerkzeuge spielt (Canzler und Knie, 1994).

Ein weiteres zukünftiges Forschungsgebiet ist die Untersuchung eines neu dimensionierten, linienbasierten ÖV, der aus der Automatisierung von Bussen resultiert. Wenn der Fahrerlohn nicht mehr Teil der Kostenstruktur ist, könnte es sich lohnen, Busse mit kleineren Kapazitäten und höheren Frequenzen zu betreiben. Nicht nur, dass die Bündelung der Nachfrage, wenn möglich, wirtschaftlicher ist als ein Punkt-zu-Punkt-Service (siehe Abschnitt 4.5), es gibt auch eine Vorliebe der Nutzer für hochfrequente,

leitungsbasierte Dienste gegenüber dynamischen Diensten (für eine aktuelle Überprüfung siehe (White, 2016)). Aktuelle Fahrgaststatistiken der Verkehrsbetriebe Zürich, 2014, ermöglichen eine Annäherung der Auslastung. Nichtsdestotrotz müssen die gesetzlichen Anforderungen sowie die für den öffentlichen Personennahverkehr notwendige Infrastruktur weiter überdacht werden, was den Rahmen dieses Beitrags übersteigen würde.

5 Umfrage

Das vorliegende Kapitel gliedert sich in die Abschnitte der Beschreibung des Szenarios (5.1) und der darauf fussenden Studien (5.2) sowie Informationen zur Durchführung der Studie (5.3). Im Anschluss werden die Eigenschaften der Stichprobe beschrieben (5.4).

Es folgen die Ergebnisse zum Mobilitätswerkzeugbesitz (5.5) und zur Verkehrsmittelwahl (5.6). Des Weiteren wird der Einfluss der selbstfahrenden Fahrzeuge und deren Preisen auf den Modal Split diskutiert (5.7).

5.1 Beschreibung des Szenarios

Es wurde spezifisch darauf geachtet, kohärente Szenarien zu schaffen, welche die Interessen und Prognosen der Marktakteure im Bereich der automatisierten Fahrzeuge berücksichtigen.

In Übereinstimmung mit der Einschätzung Trent Victors, dem Senior Technical Leader Unfallverhütung bei Volvo, wird angenommen, dass Fahrzeuge des SAE-Level drei eine untergeordnete Rolle spielen werden, da es zu schwierig ist, dass abgelenkte Personen in einer gefährlichen Situation das Fahrzeug übernehmen (SAE International, 2014; Golson, 2016). Zudem hat das Konzept geteilter automatisierter Fahrzeuge wesentliche Vorteile, wenn die Fahrzeuge Leerfahrten durchführen können. Aus diesen Gründen umfassen die Szenarien nur Fahrzeuge mit den SAE-Automationslevel vier und fünf. In der Einleitung der Studie wird ferner erwähnt, dass AV nur nach dem Nachweis, dass sie substantiell sicherer als menschliche Fahrer sind, verfügbar sein werden. Den Befragten wird zudem mitgeteilt, dass sie für keine Unfälle verantwortlich sind, in denen das Fahrzeug involviert ist. Da die Befragten der Stichprobe bei Kyriakidis et al. (2015) hauptsächlich um Hacking besorgt waren, wird angegeben, dass die Wahrscheinlichkeit gehackt zu werden, für die angenommenen Fahrzeuge tief ist und die Fahrzeuge unabhängig von zentralen Servern operieren können.

Es ist zudem wichtig zu definieren, ob die Befragten die Möglichkeit haben, private automatisierte Fahrzeuge zu kaufen und zu gebrauchen oder AV nach Bedarf anzufordern (oder beides). Zusätzlich wird das Berücksichtigen von temporären Abhängigkeiten als wichtig erachtet. Wenn Reisende das Anfordern von Taxi-AVs oder PAVs bereits gewohnt sind, könnte das Marktpotential für AV in privatem Besitz im Vergleich zu einer gleichzeitigen Einführung kleiner sein (und umgekehrt). Unter Berücksichtigung, dass bei einer Flotten-Lösung weniger Fahrzeuge für die Deckung der Transportnachfrage genügen, ist es interessant zu vermerken, dass Fahrzeughersteller wie BMW Group (2016) und Ford (Ross, 2016) planen, Taxi-AVs bzw. PAVs vor dem Verkauf von AV an private Kunden einzuführen. Die Pläne von Google zeigen in dieselbe Richtung (Urmson, 2016). Aus diesem Grund werden zwei Szenarien unterschieden:

- **Szenario 1**: Flotten aus Taxi-AVs und PAVs sind erhältlich. Nahverkehrsangebote sind die gleichen wie heute.
- **Szenario 2**: Szenario 1 war für drei Jahre vorhanden und private Kunden können jetzt automatisierte Fahrzeuge kaufen.

Auf Grund der zusätzlichen Komplexität für die Befragten wird angenommen, dass die Massenverkehrsmittel unverändert bleiben.
Um den Effekt der Marktdiffusion zu berücksichtigen, enthalten die zwei oberen Szenarien in der Studie zwei Unterszenarien: Zwei Wochen nach der Markteinführung und ein Jahr danach. Die Befragten werden zudem informiert, dass sie Taxi-AVs und PAVs via Smartphone-App und via Telefon anfordern können. Die Zahlungen erfolgen elektronisch und automatisch nach Fahrende.

5.2 Beschreibung der Studie

Die Studie ist in drei Stufen unterteilt. Die erste Stufe befasst sich mit der Soziodemografie der Befragten, deren Mobilitätswerkzeugen sowie zwei regelmässigen Wegen. Des Weiteren werden die Befragten gefragt, wie sie ihre Mobilitätswerkzeuge unter Szenario 1 (Taxi-AV und PAV sind verfügbar) anpassen würden. In der zweiten Stufe füllen die Befragten Verkehrsmittelwahlexperimente aus, welche sowohl derzeit erhältliche Verkehrsmittel, als auch die Alternativen Taxi-AV, PAV und ein Taxi -AV-Zubringerangebot für Züge umfassen. Die Ausprägungen der Attribute basieren auf den zwei regelmässigen Wegen. Die Verfügbarkeit der Verkehrsmittel basiert auf den aus der ersten Stufe gewonnenen Informationen. Anschliessend werden die Befragten gebeten, Fragen zu Ihren Einstellungen gegenüber verschiedenen Sachverhalten zu beantworten. Der letzte Teil der zweiten Stufe fragt nach den Anpassungen der Mobilitätswerkzeuge, falls sowohl private automatisierte Fahrzeuge, als auch Taxi -AV und PAV erhältlich sind. In der dritten Stufe der Studie werden die Befragten erneut gebeten, aus verschiedenen Verkehrsmitteln in verschiedenen Szenarien zu wählen.

Erste Stufe

Die Fragen zur Soziodemografie beinhalten Alter, Einkommen, Geschlecht, Haushaltsgrösse und -form, Bildungshintergrund, und die Beschäftigungssituation. Die Fragestellungen und Kategorien basieren auf dem Schweizer Mikrozensus (Bundesamt für Statistik (BFS) und Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), 2012). Wie zuvor erwähnt, werden die Befragten auch nach den Mobilitätswerkzeugen des Haushaltes befragt. Zusätzlich zur Anzahl und Typ der Autos im Haushalt enthält die Studie Fragen bezüglich der Abonnements des öffentlichen Verkehrs aller Haushaltsmitglieder. Die Parkplatzsituation an der Wohnadresse wird auch eruiert. Bei den zwei regelmässigen Wegen werden sowohl nach den Start- und Zielorten und -zeiten als auch nach der Häufigkeit gefragt. Zusätzlich geben die Befragten Informationen über die Parkplatzverfügbarkeit und die Anzahl Personen, welche sich bei dem Reiseweg dem Befragten anschliessen, an. Das Letztgenannte wird ermittelt, da sich die Kosten für den öffentlichen Verkehr auf eine Fahrkarte beziehen, während die Grenzkosten für Autos und Taxi-AV bis zu einer gewissen Anzahl an Personen null ist. Die laufende Verkehrsmittelwahl wird ferner bezüglich der Wettervorhersagen unterschieden.

Der nächste Abschnitt der ersten Stufe besteht aus der Einführung in das Konzept automatisierter Fahrzeuge. Die Beschreibung beinhaltet die in Abschnitt 5.1 erwähnten Aspekte. Des Weiteren werden ein Link und ein QR-Code zu einem Video des Mercedes F015 bereitgestellt. Das Video wurde gewählt, da es ein AV in Bewegung zeigt und der Innenraum an automatisierte Fahrzeuge angepasst ist.

Schliesslich werden den Befragten die gleichen Fragen zu den Mobilitätswerkzeugen gestellt unter der Annahme, dass TAXI-AV und PAV erhältlich sind. Das Preisniveau wird zwischen den Befragten variiert:

- Taxi-AV – 35, 55, 75 Rappen pro Fahrzeugkilometer
- PAV – 20, 30, 40 Rappen pro Passagierkilometer.

Die mittleren Werte stehen im Einklang mit der Kostenanalyse. Zur besseren Verständlichkeit wurde der Preis pro Fahrzeug- statt pro Passagierkilometer für das Taxi-AV angegeben.

Zweite Stufe

Die zweite Stufe der Studie beginnt mit der Einführung zu AV und fährt mit dem Verkehrsmittelwahlexperiment fort. Die möglichen Alternativen sind: derzeitiger öffentlicher Verkehr, Gehen, Velo, derzeitiges Auto, Taxi-AV und PAV. Falls die Verbindung mit derzeitigem öffentlichen Verkehr einen Zug beinhaltet, wird Zug mit einem Taxi-AV-Zubringer zur Liste der Alternativen hinzugefügt. Die Alternativen Auto und Velo hängen von den bestehenden Mobilitätswerkzeugen der Befragten ab.

Die Attribute in dem Experiment sind: Totale Reisezeit, Reisezeit im Hauptverkehrsmittel, Reisezeit im Zubringer, Wartezeit, Zugangs- und Abgangszeit, Anzahl Umstiege, Taktzeit und variable Kosten. Die Basiswerte der Attribute beziehen sich auf die aktuellen Reisezeiten und Preise. Die Reisezeiten heutiger Verkehrsmittel werden mittels der Google Maps API[10] abgefragt. Die Reisezeiten für Taxi-AV entsprechen den Autoreisezeiten. Der Basiswert von PAV liegt 30% darüber. Die Fahrkartenpreise für den öffentlichen Verkehr basieren auf dem Personentarif T600 bzw. den Zonenpreisen. Abonnemente des öffentlichen Verkehrs werden für die Fahrkartenpreisberechnung des öffentlichen Verkehrs berücksichtigt. Falls der Befragte im Besitz einer Jahreskarte ist, bleibt der Preis bei 0. Die variablen Kosten pro Fahrzeugkilometer beziehen sich auf die Berechnungen des TCS Touring Club Schweiz (2009) und betragen 26,28 Rappen pro Kilometer. Parkkosten werden hinzugefügt, falls diese in der vorhergegangenen Stufe angegeben wurden. Die Wartezeiten von 3,5 Minuten für Taxi-AV und 4 Minuten für PAV basieren auf den Berechnungen des OECT – International Transport Forum (2015). Für das *Experimental Design* werden die Basiswerte der Attribute um 33% erhöht und verringert. Die Reihenfolge der Alternativen ändert sich zudem zwischen den Befragten.

Die Wahlsituationen enthalten zusätzlich Szenariovariablen. Wie zuvor angegeben, wird zwischen zwei Zeithorizonten unterschieden: Die Flotte wurde vor zwei Wochen eingeführt und die Flotte wurde vor einem Jahr eingeführt. Des Weiteren hat das Wetter sowohl die Ausprägung sonnig und 20°C, als auch die Ausprägung regnerisch und 5°C.

Eine beispielhafte Entscheidungssituation ist in ***Abb. 5*** dargestellt. Die Szenariovariablen befinden sich oben rechts auf der Seite. Die Befragten werden ausserdem informiert, welche Alternativen automatisiert sind und welche Alternative sie am häufigsten gewählt haben. Auf Grund der häufigeren Verbreitung, wurden automatisierte Alternativen als *autonom* gekennzeichnet.

Der anschliessende Abschnitt in der Studie besteht aus Einstellungsfragen, von welchen angenommen wird, dass sie die Akzeptanz und die Häufigkeit der Nutzung selbstfahrender Fahrzeuge beeinflussen. Während das *Car Technology Acceptance Model* von Osswald et al. (2012) die Meinung zu Technologie im Allgemeinen erfasst, berücksichtigt die Skala zur fahrtbezogenen Sensationslust von Delhomme und France (2002), ob die Befragten eine Autofahrt eher erfreulich als belastend betrachten. Ausserdem wird von der Lebensstiltypologie von Otte (2005), in welcher die Befragten nach den Dimensionen Modernität und finanzielle Kapazitäten klassifiziert werden, angenommen, weitere Einsichten zur Akzeptanz von AV zur Verfügung zu stellen. Schliesslich werden die Befragten über ihr Vertrauen gegenüber fremden Personen gemäss der Skala von Gächter et al. (2014) befragt. Es wird angenommen, dass dies eine mögliche negative Haltung zu PAVs teilweise erklärt.

Am Ende der zweiten Stufe werden die Befragten gebeten, ihre Mobilitätswerkzeuge anzupassen, nachdem private automatisierte Fahrzeuge erhältlich sind.

Die dritte Stufe besteht lediglich aus Verkehrsmittelwalexperimenten, welche private automatisierte Fahrzeuge miteinbeziehen.

[10] https://cloud.google.com/maps-platform/routes/

Flotte eingeführt	Wetter	Mobilitätswerkzeuge	Angegebener Weg
Vor zwei Wochen	**20°C**	Auto, Halbtax	Arbeitsweg

	Autonom		Autonom	Autonom	Bisher gewählt
Hauptverkehrsmittel	**Zug**	**Zug**	**Pooled-Service**	**Taxi-Service**	**Derzeitiges Auto**
Zubringer	Autonomer Taxi-Service	Bus / Tram			
Gesamtreisezeit	**00:56 h**	**00:52 h**	**00:34 h**	**00:40 h**	**00:45 h**
davon Fahrzeit in Hauptverkehrsmittel	00:30 h	00:18 h	00:30 h	00:35 h	
davon Fahrzeit in Zubringer	00:25 h	00:16 h			
davon Gesamtwartezeit	00:01 h	00:04 h	00:04 h	00:05 h	
davon Zugangs- und Abgangszeit		00:14 h			
Anzahl Umsteigen	**1**	**1**			
Takt	**00:18 h**	**00:18 h**			
Variable Kosten	**8 CHF**	**7 CHF**	**12 CHF**	**20 CHF**	**18 CHF**
Ihre Auswahl	☐	☐	☐	☐	☐

Abb. 5 *Beispiel Verkehrsmittelwahl*

5.3 Durchführung der Studie

Die Hauptstudie wurde in den ersten Monaten des Jahres 2018 durchgeführt. Die Rekrutierung erfolgte über das Einwohnerregister des Kantons Zürich. Es wurden 4000 Personen postalisch kontaktiert, wobei 444 Personen bei einem Incentive in Höhe von 20 CHF rekrutiert werden konnten. Die Antwortzahlen für die Stufen 1,2, und 3 betragen 359, 309 und 295. Es gilt zu beachten, dass das Ausfüllen der gesamten Studie in etwa anderthalb Stunden in Anspruch nimmt. Die Probanden wurden per E-Mail an die Zusendung erinnert, sofern die Bögen 3 Wochen nach der ursprünglichen Frist nicht eingetroffen waren. Bereits während der Durchführung der Studie wurde die Konsistenz der Angaben zum Besitz der Mobilitätswerkzeuge überprüft und gegebenenfalls in Absprache mit den Probanden korrigiert.

5.4 Stichprobe

Tab. 11 *Soziodemographie der Stichprobe*

	Hauptstudie	MZ Zürich 2015
Altersdurchschnitt	46.11	49.32 (Volljährige)
Durchschnittl. monatl. Bruttohaushaltseinkommen	12400 CHF	8000 CHF
Durchschnittl. Anzahl Autos pro Haushalt	1.36	0.99
Anteil mit ZVV-Abo (ohne Streckenabo)	29.11%	13.65%
Anteil mit GA	17.71%	9.66%
Anteil Frauen	41.79%	51.05%
N	347	-

Die soziodemographischen Daten der 359 Probanden, welche die erste Stufe ausgefüllt haben, sind in ***Tab. 11*** zusammengefasst und dem Mikrozensus 2015 (Bundesamt für Raumplanung und Bundesamt für Statistik, 2016) gegenübergestellt. Während das Durchschnittsalter der Studienteilnehmer jenem des gewichteten Mikrozensus nahe ist, sind das Haushaltseinkommen und die durchschnittliche Anzahl an Autos höher. Zudem liegen die Anteile an ZVV-Abonnements und GAs deutlich höher. Um Aussagen über den Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl treffen zu können, ist eine Gewichtung der Probanden sinnvoll.

5.5 Besitz von Mobilitätswerkzeugen

Wie bereits weiter oben erwähnt, haben die Probanden Auskunft darüber gegeben, welche Mobilitätswerkzeuge sie derzeit besitzen. Zudem wurden sie gefragt, inwiefern sich dies ändert, sobald eine Flotte selbstfahrender Fahrzeuge bzw. sowohl einer Flotte selbstfahrender Fahrzeuge als auch private selbstfahrende Fahrzeuge zur Verfügung stehen.

Tab. 12 *PW-Besitz pro Haushalt*

	Konventioneller PW	Priv. AV	Gesamt
Derzeit	1.37		1.37
AV Flotte	0.95***		0.95***
AV Flotte & Priv. AV	0.68	0.66	1.34

Gepaarter zweiseitiger T-Test: *** : $p < 0.01$, ** : $p < 0.05$, * : $p < 0.1$

Tab. 12 stellt die Änderung des PW-Besitzes pro Haushalt dar. Es gilt zu beachten, dass die Analyse auf Basis jener Probanden erfolgt, die sowohl Stufe 1 als auch Stufe 2 retourniert haben. Zudem wurde auf die Konsistenz der Angaben geachtet. Es ergibt sich eine Stichprobengrösse von 300. Es handelt sich des Weiteren um die tatsächlichen Anteile in der Stichprobe. Es ist aufschlussreich zu erkennen, dass der PW-Besitz signifikant von 1.37 auf 0.95 sinkt, sollte lediglich eine Taxi-Flotte selbstfahrender Fahrzeuge zur Verfügung stehen. Sobald die Probanden die Fahrzeuge jedoch erwerben

können, bleibt der PW-Besitz nahezu unverändert. Es ist zudem hervorzuheben, dass die Besitzraten konventioneller und selbstfahrender Fahrzeuge in etwa gleich hoch sind.

Tab. 13 *Veränderung Mobilitätswerkzeuge Fahrzeugbesitzer*

Vorher: \ Nachher:	ÖV-Abo, PW	ÖV-Abo	PW	Nichts	Summe
ÖV-Abo, PW	88	26	4	1	119
PW	11	5	136	18	170
Summe	99	31	140	19	289

Tab. 13 beleuchtet die Entscheidungen jener Personen, denen derzeit ein PW zur Verfügung steht, im Szenario AV-Flotte näher. So entscheiden sich 22.69% jener Probanden, die derzeit sowohl über einen PW verfügen als auch im Besitz eines ÖV-Abonnements sind, für die Aufgabe ihres konventionellen PW. Lediglich 4 Personen unter jenen, die ein ÖV-Abonnement besitzen und denen ein PW zur Verfügung steht, sehen die Einführung einer selbstfahrenden Taxiflotte als Anlass das ÖV-Abonnement aufzugeben. Unter jenen, die derzeit nur über einen PW verfügen, sind es 13.53%, die angeben, dass der Haushalt keinen PW mehr besitzen wird.

Tab. 14 *ÖV- Abo Besitz nach Szenario*

	GA	ZVV	Gesamt
Derzeit	0.18	0.29	0.47
AV Flotte	0.20	0.29	0.49
AV Flotte & Priv. AV	0.19	0.24	0.43

McNemar's Test: *** : $p < 0.01$, ** : $p < 0.05$, * : $p < 0.1$

In ***Tab. 14*** ist der Besitz an ÖV-Abonnements für die verschiedenen Szenarien dargestellt. Keine der Veränderungen ist dabei signifikant zum 5%-Niveau gemäss McNemar's Test. Lediglich die Anzahl der ZVV-Abonnements nimmt im zweiten Szenario von ursprünglich 29% auf 24% ab.

Der Besitz der Mobilitätswerkzeuge zusätzlich mit multivariaten Probit Modellen untersucht. Die binären abhängigen Variablen stellen dabei der Besitz mindestens eines konventionellen PWs, der Besitz eines ÖV-Abonnements (ZVV oder GA), und der Besitz eines selbstfahrenden PWs dar. Die Abbildung mittels univariater Modelle würde hierbei die Korrelationen zwischen den abhängigen Variablen vernachlässigen und wurde deshalb nicht berücksichtigt. Die Menge unabhängiger Variablen setzt sich aus soziodemographischen Variablen (Geschlecht, Altern, logarithmiertes Einkommen, Ausbildungsgrad), der ÖV-Güteklasse (Kanton Zürich, 2017), wobei jeweils die Stufen A und B, C und D, sowie E, F, und G zusammengefasst sind, und des Preises selbstfahrender Taxis und privater PWs zusammen.

Tab. 15 zeigt die Modelle für die einzelnen Szenarien, welche spaltenweise angeordnet sind. So gehören die drei vertikalen Blöcke jeweils zum gleichen Modell, wobei die Koeffizienten den einzelnen unabhängigen Variablen zugeordnet sind.

In der linken Spalte ist das Modell für den derzeitigen Besitz dargestellt. Den Erwartungen entsprechend haben die Attribute Männlich, Alter und Einkommen einen positiven Effekt auf den Autobesitz. Allerdings sind die Koeffizienten von Männlich und Alter nicht signifikant, während jener des Einkommens nur zum 10%-Niveau signifikant ist. Die Koeffizienten der ÖV-Güteklassekategorien sind wiederum signifikant positiv, was ebenfalls den Erwartungen entspricht. Der Koeffizient der Anzahl Minderjähriger im Haushalt ist wie erwartet positiv, jedoch nicht signifikant von 0 unterschiedlich. Es ist interessant, dass ein sekundärer Schulabschluss (nicht signifikant) den Autobesitz erhöht, während ein tertiärer Abschluss diesen im Vergleich zu einem primären Abschluss senkt (ebenfalls nicht signifikant).

Den Besitz eines ÖV-Abonnements betreffend, wirken sich das Alter signifikant negativ und das Einkommen signifikant positiv auf den Besitz aus. Während die ÖV-Güteklassen

C und D keinen signifikanten negativen Einfluss auf den Besitz eines ÖV-Abonnements im Vergleich zu den Klassen A und B haben, ist dieser Einfluss für die Kategorien E, F und G signifikant. Auch hat die Anzahl Minderjähriger einen signifikant negativen Einfluss. Die signifikante Korrelation zwischen den Alternativen PW- und ÖV-Abonnement Besitz spricht für die Schätzung eines multivariaten Probit-Modells. Das negative Vorzeichen impliziert weiterhin, dass die Befragten ungern in beide Mobilitätswerkzeuge investieren.

Die Ergebnisse des Modells, welches für das Szenario der Flotte selbstfahrender Taxis geschätzt worden ist, unterscheiden sich an wenigen Stellen. So hat das Einkommen nun keinen signifikant positiven Einfluss auf den Besitz konventioneller PWs. Des Weiteren ist der Koeffizient für die Anzahl Minderjähriger nun zum 10%-Niveau signifikant positiv. Der km-Preis eines Taxi-AVs hat in dem von der Studie definierten Bereich keinen signifikanten Einfluss auf die Anzahl konventioneller Fahrzeuge.

Auch in Bezug auf den Besitz der ÖV-Abonnements lässt sich feststellen, dass der positive Effekt des Einkommens nun nicht mehr signifikant ist. Das Vorzeichen des Koeffizienten für den km-Preis eines Taxi-AVs ist erneut nicht signifikant. Die Interpretation der Korrelation zwischen beiden Alternativen ist analog zum vorherigen Modell.

Das dritte Modell bezieht sich auf das Szenario, in dem sowohl eine Taxi-Flotte als auch private selbstfahrende Fahrzeuge zur Verfügung stehen. Für den Besitz konventioneller PWs sind die Güteklassen C und D zum 1%-Signifikanzniveau und die Güteklassen E, F und G zum 10%-Signifikanzniveau signifikant. Die restlichen Koeffizienten sind nicht signifikant von 0 unterschiedlich. Dies spricht dafür, dass die soziodemographischen Variablen und der Preis von AVs (in der Bandbreite der Studie) nur eine geringe Erklärungskraft besitzen.

Hingegen sind die Koeffizienten des Alters, der ÖV-Güteklassen E, F und G sowie der Anzahl Minderjähriger weiterhin negativ signifikant bei der Erklärung des Besitzes eines ÖV-Abonnements.

In Bezug auf den Besitz eines privaten selbstfahrenden Fahrzeugs, ist der Koeffizient für die ÖV-Güteklassen C und D, analog zur Funktionen für den ÖV-Abonnement Besitz, nicht signifikant von 0 unterschiedlich. Dies ändert sich jedoch für die niedrigeren Güteklassen E, F, und G. Auch hat die Anzahl Minderjähriger im Haushalt einen positiven Einfluss auf den Besitz privater selbstfahrender Fahrzeuge. Dies steht im Kontrast zu der Funktion für konventionelle PW, in welcher kein signifikanter Effekt beobachtet werden konnte. Des Weiteren ist der Koeffizient des Preises für private selbstfahrende PW zum 10%-Niveau signifikant negativ. Interessanterweise ist im letzten Modell lediglich die Korrelation zwischen den abhängigen Variablen konventioneller PW und selbstfahrender PW signifikant von 0 unterschiedlich. Das negative Vorzeichen entspricht der Erwartung, dass die Fahrzeuge eher ausgetauscht als zusätzlich gekauft werden.

Tab. 15 *Multivariate Probit Modelle zum Besitz von Mobilitätswerkzeugen*

	Derzeit		Sz. AV Fleet		Sz. Priv. Aut. PW & AV Fleet	
Koef.	Schätzung	t-Wert	Schätzung	t-Wert	Schätzung	t-Wert
#PW>0						
β_Männlich	0.059	0.250	0.028	0.140	-0.168	-0.810
β_Alter	0.037	0.540	0.038	0.660	-0.001	-0.010
β_LogEink_P	0.786	1.710	0.166	0.420	0.536	1.300
β_ÖV_Güte_EFG	1.140	3.030	1.073	3.820	0.515	1.840
β_ÖV_Güte_CD	0.981	4.480	0.851	4.750	0.603	3.130
β_#Minderjährige	0.147	1.400	0.162	1.800	0.067	0.730
β_Ausbildung_Tertiär	-0.469	-1.610	-0.147	-0.590	-0.310	-1.150
β_Ausbildung_Sekundär	0.328	0.860	-0.105	-0.360	0.092	0.300
β_Preis AV Taxi			0.027	0.530	-0.001	-0.020
β_Preis Priv. AV					0.060	1.380
α_PW	-2.459	-1.520	-0.963	-0.660	-2.519	-1.620
GA oder ZVV						
β_Männlich	0.082	0.440	0.209	1.100	0.248	1.170
β_Alter	-0.187	-3.360	-0.165	-2.970	-0.132	-2.190
β_LogEink_P	0.824	2.180	0.373	0.990	-0.026	-0.060
β_ÖV_Güte_EFG	-0.685	-2.630	-0.589	-2.350	-0.629	-2.230
β_ÖV_Güte_CD	-0.097	-0.550	-0.071	-0.410	0.030	0.160
β_#Minderjährige	-0.196	-2.340	-0.202	-2.430	-0.254	-2.730
β_Ausbildung_Tertiär	-0.284	-1.210	0.000	0.000	-0.156	-0.580
β_Ausbildung_Sekundär	-0.147	-0.540	0.085	0.310	0.196	0.640
β_Preis AV Taxi			-0.069	-1.440	-0.014	-0.250
β_Preis Priv. AV					-0.012	-0.280
α_ÖV	-1.941	-1.470	-0.200	-0.150	1.091	0.680
#AutPW > 0						
β_Männlich					0.123	0.590
β_Alter					-0.058	-0.970
β_LogEink_P					0.085	0.200
β_ÖV_Güte_EFG					0.910	2.980
β_ÖV_Güte_CD					0.141	0.740
β_#Minderjährige					0.216	2.240
β_Ausbildung_Tertiär					0.185	0.700
β_Ausbildung_Sekundär					-0.173	-0.580
β_Preis AV Taxi					-0.022	-0.410
β_Preis Priv. AV					-0.073	-1.650
α_AutPW					0.307	0.190
atrho21	-0.561	-3.820	-0.394	-3.460	-0.050	-0.450
atrho31					-0.241	-2.080
atrho32					-0.185	-1.61
N	278		274		220	
Loglik const	-280.472		-330.814		-426.016	
Final Loglik	-272.282		-324.452		-422.215	
Prob > chi2 (Wald)	0		0		0.0067	
#Draws	1000		1000		1000	

5.6 Verkehrsmittelwahlmodelle

Die Nutzung verschiedener Verkehrsmittel wurde unter anderem mittels Hybrid Choice Modellen untersucht. Hierbei werden neben der Soziodemographie und den Attributen der Verkehrsmittel die Einstellungen zu damit in Zusammenhang stehenden Konstrukten in das Modell aufgenommen.

Die zuvor erwähnten Konstrukte wurden mittels zwei Faktoren (gemäss Knick-Kriterium) abgebildet. Unter Berücksichtigung eines minimalen *Loading Factors* von 0.7 wurden die Indikatoren aus ***Tab. 16*** für die weitere Analyse verwendet. Dabei sind die Fragen 4, 5 und 7 der *Driving Related Sensation Seeking Scale* dem zweiten Faktor zugeordnet, während sieben Einstellungsfragen des *Car Technology Acceptance Models* dem ersten Faktor zugeordnet sind. Gemäss den in ***Tab. 16*** dargestellten Fragen erzielen jene Personen bei der Einstellung gegenüber automatisierten Fahrzeugen insbesondere dann einen hohen Wert, wenn sie die Bedienung als einfach für sie selbst einschätzen. Zusätzlich haben sie und ihr Umfeld keine Bedenken gegenüber der Nutzung der Technologie. In Bezug auf die Einstellung gegenüber dem Führen eines Fahrzeugs haben sich die Befragten insbesondere in Bezug auf Ihre Präferenzen gegenüber schnellen Autofahrten unterschieden.

Tab. 16 *Im Hybrid Choice Modell berücksichtige Indikatoren*

Fahreinstellung	
4	Ich würde gerne lernen Autos zu fahren, die über 300 km/h fahren.
5	Ich mag eine "schnelle" Fahrt.
7	Ich denke, ich würde es geniessen sehr schnell auf einer steilen Strasse zu fahren.
Einstellung gegenüber AVs	
5	Ich schätze, dass die Bedienung der Technologie klar und verständlich sein wird.
6	Es wäre einfach für mich, schnell mit der Bedienung der Technologie vertraut zu werden.
7	Ich schätze, dass es einfach wird die Technologie zu bedienen.
8	Die Nutzung der Technologie ist eine gute Idee.
13	Menschen, deren Meinung mir wichtig ist, würden die Technologie auch mögen.
21	Sollte ich Zugriff auf das System haben, werde ich es nutzen.
25	Ich stelle mir vor mich sicher während der Nutzung der Technologie zu fühlen.

Im folgenden Abschnitt werden die Strukturgleichungen des Hybrid Choice Modells und dessen reduzierter Form vorgestellt. Bezüglich des Messgleichung für die latenten Variablen sei erwähnt, dass die Indikatoren per *Ordinary Least Squares* modelliert worden sind. Dies ist durch die massiven Laufzeitnachteile bei gleichzeitig geringen Effizienzgewinnen (siehe Schmid et al, 2017) einer *Ordered Logit*-Modellierung begründet.

$$\text{Trad: } V_{trad,aic} = \alpha_{ai} + f_{(tt,a)(x_{dist,ic})} * x_{ttime,aic} + f_{(c)(x_{dist,ic},x_{inc,i})} * x_{cost,ait} + \beta_{Attr} * x_{Attr,ait} \quad (1)$$

$$f_{(tt,a)(x_{dist})} = \beta_{tt} * \left(\frac{x_{dist}}{\overline{x_{dist}}}\right)^{\lambda_{dist_ttime,a}} \quad (2)$$

$$f_{(c)(x_{dist},x_{inc})} = \beta_{Cost} * \left(\frac{x_{Inc}}{\overline{x_{Inc}}}\right)^{\lambda_{Inc_Cost}} * \left(\frac{x_{dist}}{\overline{x_{dist}}}\right)^{\lambda_{dist_Cost}} \quad (3)$$

Die Nutzenfunktion konventioneller sprich nicht-automatisierter Verkehrsmittel $a \subseteq A$ ist in den Gleichungen (1) bis (3) für alle Individuen $i \in I$ und alle Entscheidungssituationen $c \in \{1, \dots, 24\}$ dargestellt. Die Konstante ist sowohl alternativen- als auch individuenspezifisch. Wie in Gleichung (2) erkenntlich, ist der Reisezeitkoeffizient in

Abhängigkeit der Luftliniendistanz modelliert. Die tatsächliche Reisedistanz eignet sich auf Grund der hohen Korrelation mit der Reisezeit nicht. Der Kostenkoeffizient ist wiederum abhängig von der Luftliniendistanz und vom persönlichen Einkommen. Zusätzlich werden die alternativenspezifischen Attribute des Verkehrsmittelwahlexperiments in die Nutzenfunktion aufgenommen.

$$\mathrm{AV}: \mathrm{V}_{\mathrm{av,aic}} = \mathrm{V}_{\mathrm{trad,aic}} + \beta_{\mathrm{Att_AV}} * \mathrm{x}^{*}_{\mathrm{Att_AV,i}} + \beta_{\mathrm{Att_RiskDr}} * \mathrm{x}^{*}_{\mathrm{Att_RiskDr,i}} + \beta_{\mathrm{Socio}} * \mathrm{x}_{\mathrm{Socio,i}} + \sigma_{\mathrm{AV}} \tag{4}$$

$$\mathrm{x}^{*}_{\mathrm{Att_AV,i}} = \rho_{\mathrm{Socio,Att_{AV}}} * \mathrm{x}_{\mathrm{Socio,i}} + \omega_{\mathrm{i}} \tag{5}$$

Die Nutzenfunktionen der automatisierten Alternativen unterscheiden sich zum einen durch die Aufnahme soziodemographischer Variablen, welche die unterschiedlichen Präferenzen gegenüber selbstfahrenden Fahrzeugen weiter erklären sollen. Zum anderen finden die latenten Variablen, welche die Einstellung gegenüber AVs als auch die gegenüber schnellen Fahrten abbilden, Eingang in die Nutzenfunktionen. Wie in Gleichung 5 ersichtlich, werden dieselben soziodemographischen Variablen für die Erklärung der latenten Variable verwendet. Des Weiteren wird ein gemeinsamer *Error Component* für die automatisierten Alternativen eingeführt, da angenommen wird, dass deren Fehlerterme nicht unabhängig voneinander sind.

Auf Basis dieser Spezifikation wurden ein Hybrid Choice Modell und das Reduced Form-Gegenstück dieses Modells geschätzt.

Tab. 17 *Ergebnisse HCM Modell und Reduced form Modell*

Koeffizient	Schätzung	Rob. T-Wert	Schätzung	Rob. T-Wert
α_ptav	-2.140	-1.820	-2.152	-3.430
α_bike	-2.142	-1.830	-1.466	-1.870
α_car	0.277	0.480	0.192	0.400
α_sav	-2.204	-2.090	-2.434	-5.570
α_pav	-1.766	-1.830	-1.884	-3.670
α_privav	-0.496	-0.530	-0.744	-1.560
σ_ptav	-1.777	-6.070	1.212	3.400
σ_bike	4.917	5.630	-4.463	-5.330
σ_car	-2.476	-8.810	2.465	8.020
σ_sav	1.665	4.810	2.036	6.860
σ_pav	-0.832	-0.980	-1.039	-2.710
σ_privav	-2.428	-3.890	2.397	5.440
σ_av	-1.924	-6.660	-1.521	-5.740
β_tt_pt	-0.036	-8.030	-0.037	-7.960
β_tt_ptav	-0.051	-5.410	-0.042	-4.790
β_tt_bike	-0.034	-3.020	-0.041	-2.070
β_tt_car	-0.053	-8.950	-0.052	-12.890
β_tt_sav	-0.043	-5.630	-0.041	-5.670
β_tt_pav	-0.048	-7.010	-0.047	-9.080
β_tt_privav	-0.055	-9.130	-0.053	-9.130
β_Cost	-0.122	-12.320	-0.121	-12.540
β_transf	-0.183	-2.220	-0.182	-2.760
β_wat_pt	-0.045	-3.830	-0.043	-4.360
β_wkt	-0.061	-3.920	-0.056	-4.440
β_wat_av	-0.072	-2.220	-0.065	-2.160
λ_dist_time_pt	-0.295	-3.890	-0.317	-4.450
λ_dist_time_ptav	-0.457	-5.210	-0.434	-4.280
λ_dist_time_bike	-0.517	-4.870	-0.418	-2.450
λ_dist_time_car	-0.389	-4.680	-0.387	-9.290
λ_dist_time_sav	-0.358	-4.000	-0.338	-3.700
λ_dist_time_pav	-0.304	-2.940	-0.315	-4.800
λ_dist_time_privav	-0.438	-7.220	-0.415	-8.970
λ_dist_cost	-0.521	-13.240	-0.524	-16.030
λ_inc	-0.150	-2.060	-0.139	-2.170
β_AV_AGE	0.035	2.040	0.029	4.140
β_AV_Inc	0.071	0.130	-0.168	-1.080
β_AV_Male	-0.167	-0.230	-0.068	-0.170
σ_ATT_AV_EinstAV_1			0.824	14.730
σ_ATT_AV_EinstAV_5			0.735	16.540
σ_ATT_AV_EinstAV_6			0.756	14.240
σ_ATT_AV_EinstAV_7			0.632	12.550
σ_ATT_AV_EinstAV_8			0.629	13.970
σ_ATT_AV_EinstAV_13			0.849	18.760

Koeffizient	Schätzung	Rob. T-Wert	Schätzung	Rob. T-Wert
σ_ATT_AV_EinstAV_21			0.940	17.210
σ_ATT_AV_EinstAV_25			0.892	16.070
σ_RiskDr_EinstFahr_3			1.043	17.260
σ_RiskDr_EinstFahr_4			0.851	12.590
σ_RiskDr_EinstFahr_5			0.910	12.020
σ_RiskDr_EinstFahr_7			0.747	10.010
θ_ATT_AV_EinstAV_5			1.150	5.190
θ_ATT_AV_EinstAV_6			1.298	5.310
θ_ATT_AV_EinstAV_7			1.279	5.570
θ_ATT_AV_EinstAV_8			1.210	5.710
θ_ATT_AV_EinstAV_13			0.980	5.290
θ_ATT_AV_EinstAV_21			1.140	5.620
θ_ATT_AV_EinstAV_25			1.114	5.130
θ_RiskDr_EinstFahr_4			0.876	6.270
θ_RiskDr_EinstFahr_5			1.091	7.540
θ_RiskDr_EinstFahr_7			1.084	8.790
β_ATT_AV_av			1.035	3.070
β_ATT_RiskDr_av			0.074	0.440
σ_ATT_AV_Struktur			0.713	6.000
σ_RiskDr_Struktur			0.791	7.180
ρ_ATT_AV_AGE			-0.007	-3.390
ρ_ATT_AV_Inc			0.180	2.700
ρ_ATT_AV_Male			0.130	1.190
ρ_RiskDr_AGE			-0.011	-2.950
ρ_RiskDr_Inc			0.201	1.180
ρ_RiskDr_Male			0.294	1.340
Null LL (Choice Modell)	-7760.323		-7760.323	
Finale LL (Choice Modell)	-4220.243		-4226.575	
#Parameter	37		69	
#Personen	267		267	
#Observationen	4739		4739	
#Draws	1000		1000	

Die Ergebnisse einer MSL-Schätzung mit 1000 *Draws* sind in ***Tab. 17*** zusammengefasst. Es sei erwähnt, dass die Optimierung auf Basis der Varianz statt der Standardabweichungen erfolgt, weshalb negative Schätzungen für Standardabweichungen vorhanden sind. Zudem sei hervorgehoben, dass die Kostenkoeffizienten beider Modelle nahezu identisch sind, weshalb der Vergleich der Absolutwerte der Koeffizienten sinnvoll ist. Die Einheit der temporalen Variablen sind Minuten, während jener der Kosten Schweizer Franken sind.

Die Standardabweichungen der alternativenspezifischen Konstanten sind im HCM signifikant von 0 unterschiedlich. Des Weiteren bestätigt der signifikante Error Component σ_av, dass die Fehlerterme der automatisierten Alternativen nicht unabhängig voneinander sind.

In beiden Modellen wird die Wartezeit auf ein Taxi-AV negativer bewertet als die Umsteigezeit von ÖV-Verbindungen. So beträgt die Zahlungsbereitschaft die Wartezeit auf

ein AV um eine Stunde zu verkürzen 32,13 CHF pro Stunde im Hybrid Choice Modell. Der entsprechende Wert für die Umsteigezeit beträgt hingegen 21,42 CHF.

Unter den soziodemographischen Variablen, welche direkt als Veränderung der alternativenspezifischen Konstante in das Modell eingeflossen sind, ist in beiden Modellen lediglich der dem Alter zugeordnete Koeffizient β_AV_AGE signifikant von 0 unterschiedlich. Laut Modell zeigen Personen fortgeschrittenen Alters eine höhere Bereitschaft selbstfahrende Fahrzeuge zu benutzen. Einkommen und Geschlecht haben hingegen keinen signifikanten Einfluss.

Der Koeffizient β_ATT_AV_av gibt Auskunft darüber, welchen Einfluss die Einstellung gegenüber automatisierten Fahrzeugen auf die beabsichtigte Nutzung der selbstfahrenden Verkehrsmittel hat. Wie erwartet, erhöhen eine positive Meinung bzw. die Erwartung im Stande zu sein das Fahrzeug zu bedienen, die Bereitschaft selbstfahrende Fahrzeuge zu nutzen. Im Gegensatz dazu hat eine positive Einstellung gegenüber schnellen Autofahrten keinen Einfluss auf die Bereitschaft selbstfahrende Fahrzeuge zu nutzen. Der nicht signifikante positive Koeffizient steht im Kontrast zu der Erwartung, dass insbesondere jene Fahrzeuglenker, die das Autofahren mit *Sensation Seeking* verbinden, eine geringere Bereitschaft zur Nutzung der AVs haben.

Die ρ-Parameter geben Aufschluss über den Einfluss der soziodemographischen Variablen auf die latenten Variablen. Es ist interessant zu erkennen, dass jüngere Befragte eine positivere Einstellung gegenüber selbstfahrenden Fahrzeugen haben. Gleichzeitig sind ältere Befragte jedoch eher bereit diese zu nutzen. Des Weiteren hat das persönliche Einkommen einen positiven Effekt. Der Einfluss des Geschlechts ist erneut nicht signifikant. Den Erwartungen entsprechend, sind die jüngeren Teilnehmer der Studie gegenüber schnellen Autofahrten positiver eingestellt. Zwar sind Männer laut Modell interessierter an schnellen Autofahrten, jedoch ist dieser Effekt entgegen der Erwartungen nicht signifikant.

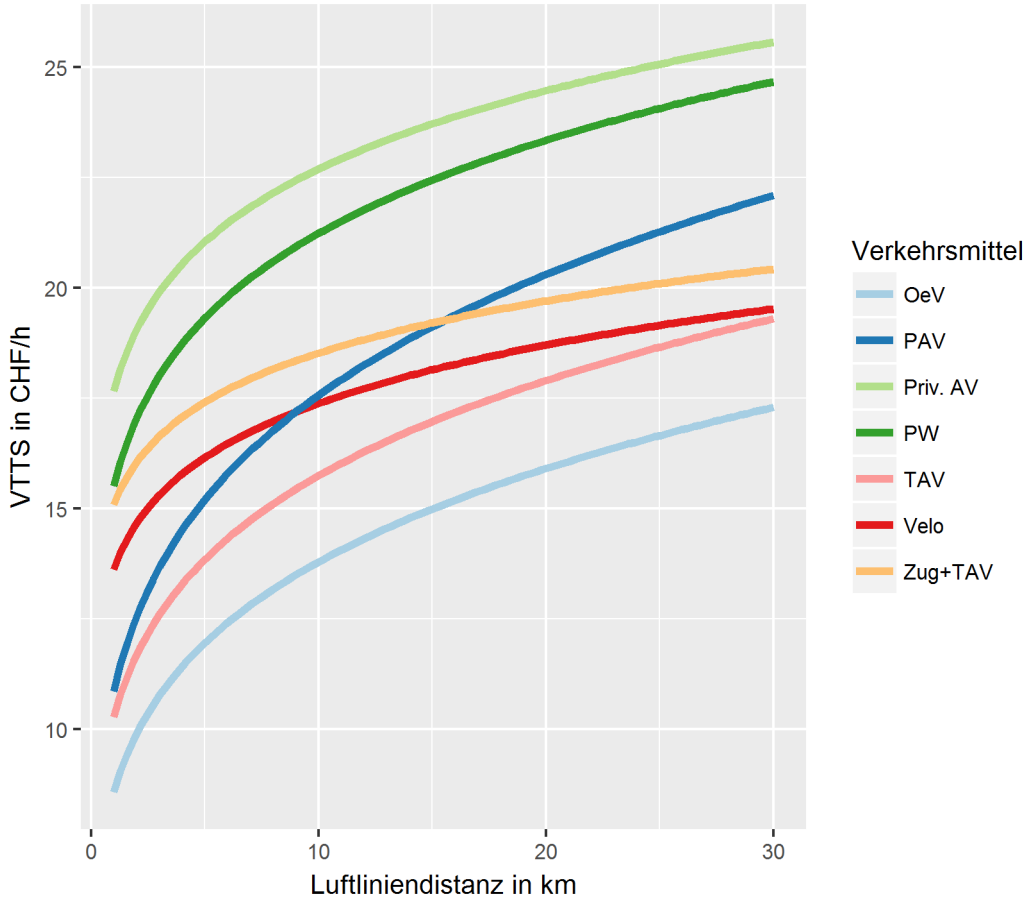


Abb. 6 *Values of Travel Time Savings nach Luftliniendistanz*

Die *Values of Travel Time Savings* des Hybrid Choice Modells sind für das mittlere persönliche Einkommen (7153 CHF) in der Studie in ***Abb. 6*** dargestellt. Wie in den Nutzenfunktionen ersichtlich, wurde sowohl der Reisezeitkoeffizient als auch dessen Distanzelastizität alternativenspezifisch geschätzt, wobei gemäss ***Tab. 17*** alle Parameter signifikant von 0 unterschiedlich sind. Wie in ***Abb. 6*** ersichtlich, haben die Befragten für konventionelle Massenverkehrsmittel (Kategorie ÖV) die niedrigste Zahlungsbereitschaft für eine Reisezeitverkürzung, was möglicherweise in Zusammenhang mit dem wahrgenommenen erhöhten Reisekomfort steht. Es ist interessant zu beobachten, dass die VTTS substantiell höher für die Alternative Zug mit SV Zubringer sind. Gemäss der Modellparameter sind die Befragten daher skeptisch gegenüber der Kombination der Systeme Taxi-AV-Flotte und Massenverkehrsmittel. Die nächstniedrigere Zahlungsbereitschaft wird dem Taxi-AV zugewiesen. Dies entspricht den Erwartungen, da angenommen wird, dass der Reisekomfort durch die Aufgabe des Fahrens erhöht wird. Des Weiteren ist durch die höheren VTTS des PAV ersichtlich, dass die Personen das Teilen der Fahrt mit Fremden Personen negativ bewerten. Interessant ist dabei, dass die VTTS der PAV sensitiver gegenüber der Luftliniendistanz ist als bei den Taxi-AV. Dies bedeutet, dass die Befragten insbesondere längere Fahrten ungern mit fremden Personen teilen.

Der Vollständigkeit halber ist der Reisezeitkoeffizient für Velos für die gesamte Bandbreite der Luftliniendistanz abgebildet. Es gilt jedoch zu bedenken, dass die Anzahl der Datenpunkte für Veloreisen über 10 km Luftliniendistanz begrenzt sind, sodass eine Interpretation höherer Distanzen nicht von den Daten gestützt ist. Es gilt zu bemerken, dass die automatisierten Taxis (Taxi-AV und PAV) für kurze Distanzen niedrigere VTTS aufweisen.

Die Zahlungsbereitschaft für eine Reisezeitverkürzung ist wie erwartet hoch für konventionelle PW, wobei in dieser Studie nicht zwischen Fahrer und Passagier

unterschieden wird. Es widerspricht jedoch den Erwartungen, dass die VTTS des privaten selbstfahrenden Fahrzeugs höher als jene des konventionellen PW sind. Es gilt jedoch zu beachten, dass die VTTS bei einer Luftliniendistanz in Höhe von 10 km für den konventionellen PW 21.24 CHF betragen, während jene für das private AV 22.70 CHF (6.86% höher) betragen. Weitere Erläuterungen befinden sich im Fazit dieses Kapitels.

5.7 Auswirkungen auf die Verkehrsmittelwahl

Neben den Parameterschätzungen ist aus verkehrsplanerischer Perspektive insbesondere die Veränderung der Verkehrsmittelwahl von Interesse. Da Mixed Logit Modelle auf Grund der Simulation der Likelihood ungeeignet für die Prognose auf Basis zahlreicher Inputdatensätze sind, wurde ein MNL-Modell geschätzt, welches auf dem Reduced Form Mixed Logit Modell des vorherigen Abschnitts basiert. In einem ersten Schritt wurden die Error Components nicht berücksichtigt. Da die alternativenspezifische Berücksichtigung der Distanzelastizitäten der Fahrzeit nicht signifikant unterschiedlich von einer gemeinsamen Berücksichtigung ist, wurde das Modell entsprechend angepasst. Zusätzlich wurde der Datensatz mittels *Iterative Proportional Fitting* nach den folgenden Variablen gewichtet:

- Luftliniendistanz der Wege
- Verwendetes Verkehrsmittel
- Haushaltseinkommen
- Besitz eines ÖV-Abonnements (GA oder ZVV) des Befragten
- Alter des Befragten
- Anzahl Fahrzeuge pro Haushalt

Die Ergebnisse sind in ***Tab. 18*** zusammengefasst. Die Vorzeichen der Parameter entsprechen den Erwartungen. Analog zu den vorherigen Modellen, ist der Effekt des Einkommens auf die Kostensensitivität erneut nicht signifikant von 0 unterschiedlich.

Tab. 18 *Ergebnisse MNL-Modell*

Koeffizient	Schätzung	Rob. SF	Rob. T-Wert
α_bike	-0.335	0.233	-1.440
α_car	1.220	0.202	6.020
α_pav	-1.800	0.396	-4.540
α_privav	0.113	0.307	0.370
α_ptav	-2.180	0.435	-5.000
α_sav	-1.160	0.396	-2.930
β_AV_AGE	0.019	0.004	4.570
β_AV_Inc	0.247	0.101	2.450
β_AV_Male	0.040	0.131	0.310
β_Cost	-0.134	0.009	-14.090
β_transf	-0.033	0.122	-0.270
β_tt_bike	-0.052	0.006	-8.580
β_tt_car	-0.061	0.005	-12.980
β_tt_pav	-0.028	0.004	-6.180
β_tt_privav	-0.047	0.005	-10.120
β_tt_pt	-0.024	0.005	-4.920
β_tt_ptav	-0.021	0.009	-2.220
β_tt_sav	-0.046	0.008	-6.010
β_wat_av	-0.047	0.043	-1.090
β_wat_pt	-0.064	0.019	-3.410
β_wkt	-0.057	0.011	-5.310
λ_dist_cost	-0.348	0.031	-11.210
λ_dist_time	-0.212	0.048	-4.380
λ_inc	-0.044	0.045	-0.970
Null LL (Choice model)	-5494.592		
Final LL (Choice model)	-3915.038		
#Parameter	24		
#Personen	267		
#Observationen	4739		

Für die Prognose der Verkehrsmittelwahl wurde das obige Modell auf die derzeitigen Attribute der Wege bzw. Verkehrsmittel angewandt. In Bezug auf die selbstfahrenden Verkehrsmittel wurden die Basislevel des Experiments verwendet. Zusätzlich wurden die Preise der selbstfahrenden Verkehrsmittel in den Bandbreiten des Experimentes verändert. In ***Abb. 7*** ist die Veränderung der Verkehrsmittelwahl für die kurzen Wege der Befragten (<50km) abgebildet, wobei die Veränderung des AV-Preises auf der x-Achse abgetragen ist. Die gestrichelten Linien zeigen die derzeitige gewichtete Verkehrsmittelwahl in der Stichprobe.

Es ist erkennbar, dass insbesondere der Anteil an zurückgelegten Wegen im konventionellen PW zurückgeht. So beträgt dieser derzeit 65,4% und sinkt auf 36,5% bei einem Preismultiplikator in Höhe von 1. Nichtsdestotrotz liegt der gemeinsame Anteil konventioneller PW; selbstfahrender PW und selbstfahrenden Taxis bei 61,8%. Rechnet man den Anteil der PAV hinzu, steigt dieser Anteil sogar auf 68,4%.

Der Modal Share der konventionellen Massenverkehrsmittel sinkt von 24.9% auf 20.2%. Gemeinsam mit der Alternative Zug + Taxi-AV Zubringer erhöht sich der Anteil jedoch auf 22,5%.

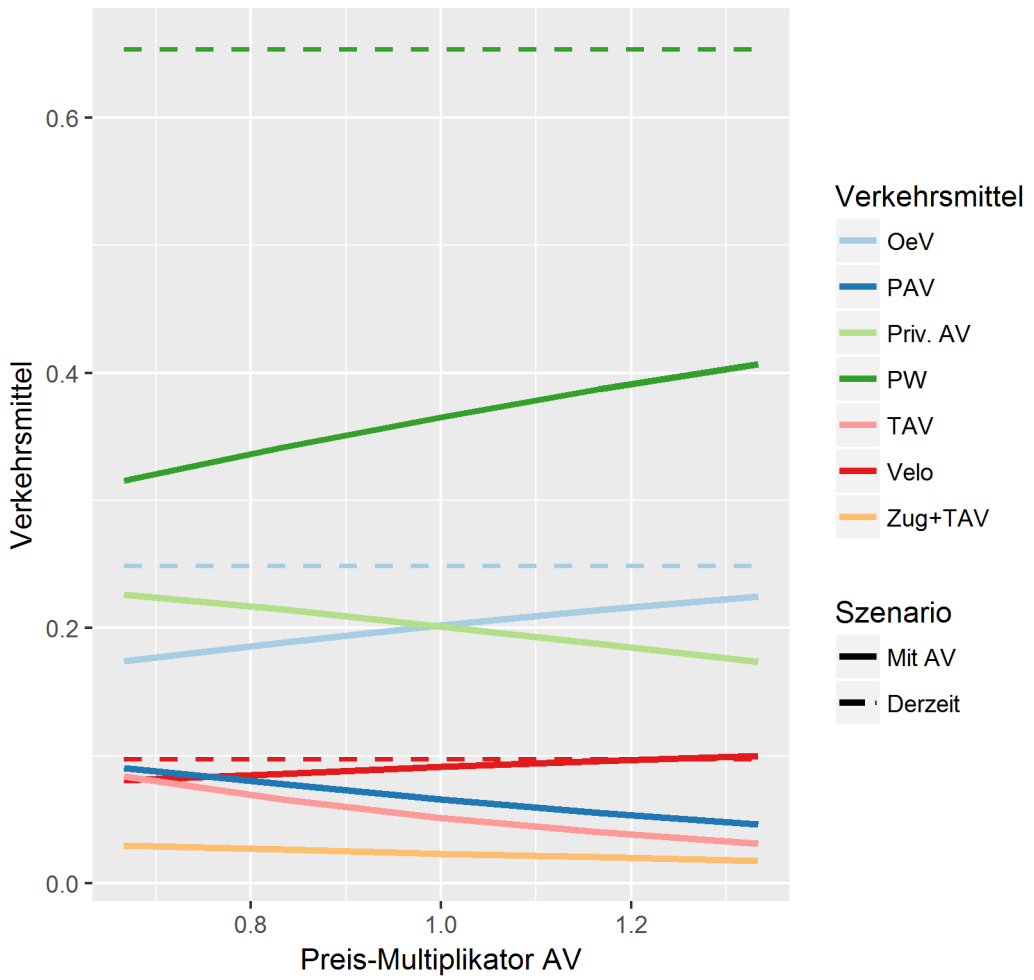


Abb. 7 *Veränderung der Verkehrsmittelwahl bei kurzen Wegen (≤50 km)*

Wie in ***Abb. 7*** ersichtlich, steigen die *Modal Shares* selbstfahrender Fahrzeuge bei sinkenden Preisen. So steigen die Modal Shares von Taxi-AVs und PAVs von 5,1% respektive 6,6% auf 8,4% und 9,0% bei einer Senkung der Preise um 33,0%. Des Weiteren steigt der Anteil privater AVs von 20,1% auf 22,6%. Die Anteile zurückgelegter Wege durch den konventionellen PW, den ÖV und das Velo sinken um 13,6%, 13,8% und 11,5% respektive.

Die Auswirkung auf die Verkehrsmittelwahl für Wege über 50 km sind in ***Abb. 8*** dargestellt. Ohne die Preise gegenüber den Basislevels zu verändern, sinkt in diesem Fall der Anteil der mit dem konventionellen Fahrzeug zurückgelegten Wege von 65.8% auf 29.6%. Der kumulierte Anteil konventioneller Fahrzeuge, privater AVs, Taxi-AVs und PAVs liegt jedoch bei 64.11%. Der Anteil konventioneller Massenverkehrsmittel sinkt lediglich von 33.2% auf 26.9%. Werden jedoch auch ÖV-Verbindungen mit Taxi-AV Zubringer hinzugerechnet, steigt der Anteil auf 35.2%.

Die Steigung der Kurven in ***Abb. 8*** machen ersichtlich, dass die Nachfrage deutlicher auf relative Änderungen des AV-Preises bei höheren Distanzen reagiert. So sinkt der Modal Share des konventionellen PW und ÖV um jeweils 32,0% und 27,6% bei einer Reduzierung der AV-Preise um 33,0%. Die Modal Shares der Alternativen Taxi-AV, PAV, und privatem AV steigen hingegen um 163,4%, 77,5% und 26,0%.

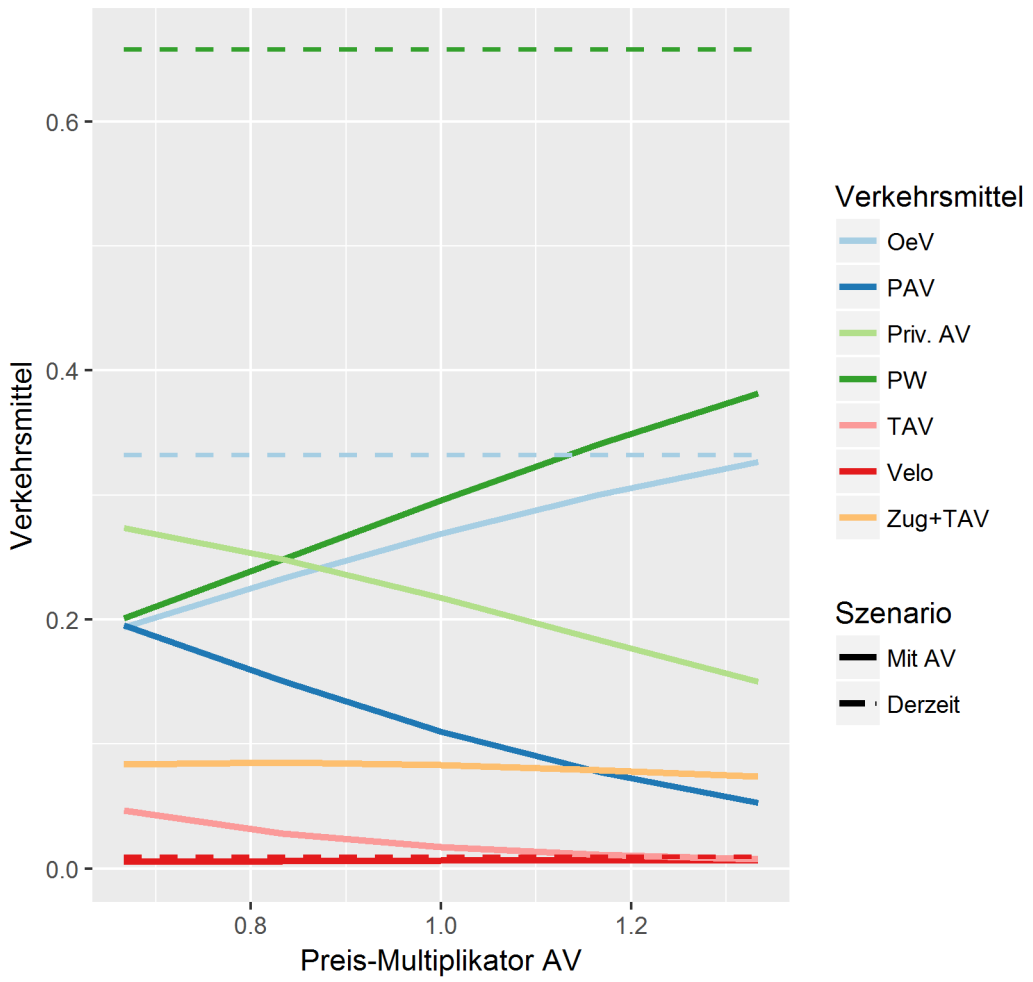


Abb. 8 *Veränderung der Verkehrsmittelwahl bei langen Wegen (>50 km)*

5.8 Fazit

Die Studie hatte das Ziel sowohl die Veränderung des Besitzes der Mobilitätswerkzeuge als auch die Veränderung in der Verkehrsmittelwahl durch die Einführung selbstfahrender Fahrzeuge zu untersuchen.

In Bezug auf den Besitz an Personenwagen wurde herausgefunden, dass die Einführung einer automatisierten Taxiflotte zu einer substantiellen Senkung der Anzahl an PW pro Haushalt führt. Dieser Effekt wird jedoch nahezu nivelliert, wenn die Personen die Möglichkeit haben automatisierte PW privat zu erwerben. Im Rahmen dieser Studie haben sich in beiden Szenarien nur wenige Befragte dafür entschieden ein ÖV-Abonnement neu zu erwerben oder aufzugeben.

Des Weiteren hatten sowohl die Soziodemographie der Befragten als auch die Preise der automatisierten Fahrzeuge nur einen geringen Einfluss auf die Entscheidung auf den Besitz an Mobilitätswerkzeugen. Eine deutlich wichtigere Rolle spielte die ÖV-Güteklasse des Wohnorts.

Die Verkehrsmittelwahlmodelle haben weiterhin ergeben, dass die Zahlungsbereitschaft für eine Reisezeitverkürzung weiterhin am niedrigsten für konventionelle Massenverkehrsmittel ist. Auch der automatisierte Zubringer zum Bahnhof wird höher bewertet. Für kurze Distanzen schätzen die Befragten den Komfort gewöhnlicher und *gepoolter* automatisierter Taxis nahezu gleich ein. Mit zunehmender Distanz bevorzugen die Befragten jedoch die Privatsphäre eines Einzeltaxis. Die *Values of Travel Time Savings*

für private automatisierte Fahrzeuge und konventioneller Fahrzeuge sind am höchsten. Auf Grund der Annahme, dass ein automatisiertes Fahrzeug komfortabler als ein konventionelles Fahrzeug ist, ist dieses Ergebnis kritisch und mit Hilfe künftiger Studien und weiterer Modellierungsschritte zu hinterfragen. Insbesondere könnten Modelle, welche die Mobilitätswerkzeug- und Verkehrsmittelwahl gleichzeitig berücksichtigen, einen tieferen Einblick verschaffen. Das Ergebnis steht auch im Kontrast zu den Ergebnissen der Studie von Kolarova *et al.* (2016). Im Rahmen dieser Studie, welche in Deutschland durchgeführt worden ist, liegen die VOT für private selbstfahrende Fahrzeuge zwischen dem ÖV und dem konventionellen PW. Gleichzeitig sind die VOT deutlich niedriger. So beträgt die ÖV-VOT für Gutverdienende bspw. 2€ pro Stunde.

Des Weiteren zeigen die Modelle, dass die Befragten Wartezeiten auf automatisierte Taxis trotz der Möglichkeit diese schon vor dem Warten am Strassenrand zu bestellen negativer als Umsteigezeiten bei Massenverkehrsmitteln bewerten.

Es ist zudem interessant zu sehen, dass jüngere Befragte eine positivere Einstellung gegenüber automatisierten Fahrzeugen haben. Gleichzeitig haben jedoch die älteren Befragten eine höhere Neigung diese Fahrzeuge tatsächlich zu nutzen.

Die auf Basis dieser Studie errechneten *Modal Shares* zeigen, dass insbesondere der konventionelle PW durch automatisierte Alternativen bei der Verkehrsmittelwahl ersetzt wird. Für kurze Wege sinkt der Anteil zurückgelegter Wege durch Massenverkehrsmittel (inkl. des AV-Zubringers) marginal, während er bei längeren Wegen sogar zunimmt. Sollten *Pooling*-Angebote breit verfügbar sein, überwiegt der niedrigere Preis den niedrigeren Komfort gegenüber Einzeltaxis für die Befragten. Des Weiteren ist die Nachfrage nach automatisierten Alternativen für längere Wege elastischer gegenüber dem Preis der automatisierten Fahrzeuge als für kurze Wege.

Zu den Limitationen der Studie gehört selbstredend, dass die Befragten zuvor nicht die Möglichkeit hatten ein automatisiertes Fahrzeug zu nutzen. Es ist daher zu hinterfragen, ob das tatsächliche Verhalten dem angegebenen Verhalten entspricht. Zudem sind die Ergebnisse der Studie von den Annahmen des Szenarios abhängig, wobei davon ausgegangen wird, dass automatisierte Fahrzeuge sicherer als derzeitige Fahrzeuge sind und sich die Reisezeiten des motorisierten Individualverkehrs nicht verändert haben.

Zudem ist die detaillierte Abfrage der Änderung der Mobilitätswerkzeuge auf einem Papierfragebogen kritisch zu sehen. Auf Grund des grossen Angebots von ÖV-Abonnementen und der Restriktionen in deren Auswahl wird empfohlen ähnliche Fragen online unter Einbezug von Konsistenzprüfungen zu stellen. Es sei jedoch hervorgehoben, dass die Angaben *ex post* auf Konsistenz überprüft worden sind und die Befragten bei Ungereimtheiten kontaktiert worden sind.

Auf Grund der Möglichkeit private automatisierte Fahrzeuge innerhalb eines oder mehrerer Haushalte zu teilen, wobei dies erhebliche Einflüsse auf das Verkehrsaufkommen hätte, wird in künftigen Studien zudem empfohlen diesen Sachverhalt genauer zu untersuchen. Des Weiteren wurde auf Grund des Umfangs der Studie nur ein AV-Preisniveau pro Befragtem bei den Fragen zum Mobilitätswerkzeugbesitz präsentiert. Genauere Aussagen zur Zahlungsbereitschaft liessen sich in einem darauf spezialisierten *Stated-Preferences* Experiment mit einer höheren Bandbreite an Attributwerten untersuchen.

6 Simulationen

Die folgenden Kapitel beschreiben den Simulationsteil der Studie. Ziel ist es dabei die Auswirkungen der gemessenen Präferenzen auf das Verkehrssystem abzuschätzen. Zunächst werden die neuen Methoden beschrieben, die im Laufe des Projekts entwickelt wurden. Danach wird eine Teilstudie zur Untersuchung verschiedener Flottensteuerungsalgorithmen für automatisierte Fahrzeuge vorgestellt, gefolgt von der Definition der finalen Szenarien. Anschliessend werden die Simulationen ausgewertet. Den Abschluss dieses Teils bildet eine kritische Diskussion der Methoden und der Ergebnisse, sowie ein Blick auf mögliche Verbesserungsvorschläge.

6.1 Methodik

Im Folgenden soll die Methodik beschrieben werden, mit der im Projekt vorgegangen wurde. Den Anfang macht eine Einleitung zu MATSim, der Simulationssoftware, die im Projekt genutzt wurde. Anschliessend wird die Synthese des Grundszenarios beschrieben, einschliesslich neuer Algorithmen und Methoden, die hierfür entwickelt werden mussten. Im dritten Teil werden die neu entwickelten Simulationskomponenten beschrieben, die das Projekt hervorgebracht hat.

6.1.1 MATSim

Zur Simulation der Verkehrsszenarien in diesem Projekt wurde die aktivitäts- und agentenbasierte Verkehrssimulationsplatform MATSim genutzt. Das Grundprinzip von MATSim ist es, einen Tag von 24 Stunden mit einer grossen Anzahl künstlicher Agenten zu simulieren, die die Reisenden in der Realität abbilden.

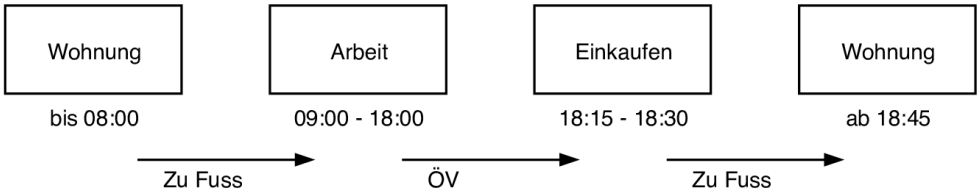


Abb. 9 *Beispiel eines Tagesplans eines Agenten in MATSim*

Jeder Agent der Simulation (für die Schweiz wären es z.B. rund 8 Millionen Agenten) hat dabei einen Tagesplan. Eine sehr einfache Variante ist in ***Abb. 9*** dargestellt: Der Agent beginnt seinen Tagesablauf um 8 Uhr morgens und läuft zur Arbeit. Am Abend nutzt der Agent dann den öffentlichen Verkehr um Einkaufen zu fahren um dann schliesslich zu Fuss um 18:45 wieder zu Hause anzukommen.

MATSim simuliert mehrere Tage nacheinander (“Iterationen”) und nach jedem Tag kann sich der Plan eines Agenten entsprechend vorgegebenen Strategien ändern. Beispielsweise lässt sich eine kleine Änderung auf die Dauer einer Aktivität einführen oder das Verkehrsmittel für einen Weg wird gewechselt. Wie der Plan auch aussieht - nachdem er einmal simuliert wurde, wird er nach einem bestimmten Bewertungssystem quantifiziert. Beispielsweise bringen Aktivitäten, die für die gewünschte Dauer durchgeführt wurden eine positive Bewertung, während ein Zuspätkommen negativ bewertet wird. Ähnlich werden auch die Reisen mit verschiedenen Verkehrsmitteln unterschiedlich negativ bewertet, einerseits da die Reisezeit mit dem Komfort eine Rolle spielen, andererseits, weil die monetären Kosten, z.B. die Kilometerkosten beim Auto oder die Ticketpreise beim öffentlichen Verkehr, mit einfliessen. Mit der Zeit (nach mehreren Iterationen) sammeln sich eine bestimmte Maximalanzahl an getesteten Plänen für einen Agenten an und er wählt davon einen aus, sodass gut bewertete Pläne mit einer höheren Wahrscheinlichkeit gewählt werden. Diese werden dann wiederum modifiziert und durch die vielen kleinen

stochastischen Änderungen verbessert sich der Plan immer weiter, bis der beste Plan für den Agenten gefunden ist, bzw. man im “stochastischen Nutzergleichgewicht” für alle Agenten angekommen ist.

Das Interessante an diesem Ansatz ist dabei, dass die Bewertungen der Pläne auch durch die Pläne der anderen Agenten beeinflusst werden. Jeder Abschnitt (*link*) im Strassennetzwerk von MATSim wird als Warteschlange simuliert, die Agenten nur passieren lässt, wenn genügend “Restfluss” vorhanden ist. Das heisst wenn bereits zu viele Agenten den *link* durchfahren haben (z.B. 1200 Fhz/h, es geht also um die Kapazität) dauert es länger, bis der nächste Agent fahren darf. Auf diese Weise kommt es zu Stau und letztlich dazu, dass durch die vielen kleinen iterativen Änderungen der Tagespläne (welche auch Routenwahl einschliessen) es zu einem Gleichgewicht der Tagespläne kommt. Sind die Reisezeiten zu lang, können also entsprechend der Bewertung der Tagespläne Ausweichrouten gewählt werden, oder die Agenten können direkt auf andere Verkehrsmittel wechseln (oder sie passen ihre Abfahrtzeiten oder Aktivitätendauern an).

Der Ansatz von MATSim bietet eine Reihe von Vorteilen gegenüber fluss-basierten Berechnungsmethoden. Einerseits ist es möglich, Staueffekte örtlich und zeitlich korrekt darzustellen, zweitens lassen sich sehr detaillierte Analysen durchführen, abhängig beispielsweise von den demographischen Faktoren einer Gruppe von Agenten o.ä. Der Detailgrad lässt sich dabei fast beliebig erweitern. Dies ist auf der einen Seite ein grosser Vorteil, auf der anderen Seite bedeutet ein sehr hoher Detailgrad natürlich auch einen hohen Arbeitsaufwand bei der Erstellung der Simulationsszenarien.

Für die Simulation automatisierter Fahrzeuge ist der Ansatz aus zwei Gründen sehr gut geeignet: Zunächst lassen sich Kapazitätseffekte auf eine sehr intuitive Weise darstellen. Um beispielsweise die Effekte der Vernetzung von Fahrzeugen darzustellen muss in MATSim nicht unbedingt die Kapazität der *links* erhöht werden, sondern es kann auch definiert werden, dass ein automatisiertes Fahrzeug beispielsweise nur die Hälfte der Kapazität eines konventionellen Fahrzeugs “verbraucht”. Auf diese Weise hat man also nicht einen makroskopischen Effekt, sondern einen Effekt auf Fahrzeugbasis umgesetzt. Dies ist ein guter Kompromiss aus einer rein mikroskopischen Sicht (beispielsweise mit *car-following* Modellen) und einer makroskopischen Sicht (beispielsweise mit einer Berechnung von Zonenflüssen).

Zweitens eignet sich ein agenten-basierter Ansatz wie MATSim hervorragend für die Simulation dynamischer Verkehrsmittel, zu denen beispielsweise automatisierte Taxiflotten gehören. Generell wird MATSim in letzter Zeit vermehrt dazu genutzt beispielsweise Rufbusse oder Taxis zu simulieren, wo es darauf ankommt eine Flotte zeitlich genau zu steuern und auf die dynamische Nachfrage zu reagieren. Auf Ebene makroskopischer Simulationstools konnte, nach Information der Autoren, nur teilweise vollständige Darstellungen dieser Verkehrsmodi erreicht werden (Friedrich *et al.*, 2017), während ein solches Unterfangen ganz natürlich in den Aufbau von MATSim hineinpasst.

Während agenten-basierte Simulationsstudien bisher einen Nachfrageeffekt ausser Acht gelassen haben, ist dies Kernziel des Simulationsteils in diesem Projekt: Jedes Angebot eines Services zieht einen Effekt mit sich, beispielsweise hängt der Preis pro Kilometer eines Taxiservices von der Flottengrösse ab, aber auch von den Einnahmen, die direkt mit der Kundendistanz verknüpft sind. In bisherigen Studien wurde dabei nicht darauf geachtet ein Gleichgewicht zwischen Preis und Nachfrage zu finden, sondern es wurde entweder das eine oder das andere als fix angenommen. Genau so steht es mit den erzeugten Wartezeiten: Sind sie zu hoch fällt die Nachfrage, was wiederum höhere Preise zur Folge hat, etc. Die folgenden Kapitel werden beschrieben, wie erstmals eine agenten-basierte Verkehrssimulation durchgeführt wurde, die endogen ein Nachfragegleichgewicht für einen dynamischen Verkehrsservice mit konsistenten Preisen, Nutzerpräferenzen und Angeboten berechnet.

6.1.2 Grundszenario

Das Grundszenario basiert hauptsächlich auf den Arbeiten von Bösch *et al.* (2016), mit denen ein konsistentes MATSim Szenario für die Schweiz erstellt wurde. Dabei wurde zunächst Augenmerk auf die Erzeugung von Haushalten gelegt, welche auf der „Statistik der Bevölkerung und der Haushalte (STATPOP)“ (Bundesamt für Statistik, 2016 und dem Mikrozensus für Verkehr und Mobilität (Bundesamt für Raumplanung und Bundesamt für Statistik, 2016) aufbauen. Ausgehend davon wurden einzelne Personen synthetisiert, die in den wichtigsten demographischen Dimensionen jene aus STATPOP möglichst genau widerspiegeln. Alle Gelegenheiten für Aktivitäten (Arbeitsplätze, Schulen, Einkaufszentren, …) wurden den Erhebungen des Bundesamts für Statistik entnommen und für die Simulation aufbereitet. Weiterhin wurden Modelle zur Wohnortwahl angewendet, die Wahl des Arbeitsortes erfolgte entsprechend den erhobenen Pendlermatrizen.

Das Strassennetzwerk stammt aus den Daten von *OpenStreetMap*[11] und wurde mit Hilfe des Tools *pt2matsim*[12] (Poletti, 2017) erstellt. Im gleichen Schritt wurde mit den öffentlich verfügbaren GTFS-Daten der Schweiz[13] der Fahrplan für den öffentlichen Verkehr für MATSim aufbereitet.

Was im Grundszenario bisher nicht existierte waren konsistente Orte für sekundäre Aktivitäten, wie Einkaufen oder Freizeit. Das Grundszenario von Bösch *et al.* (2016) beinhaltete auch eine Methodik zum “Ausschneiden” eines “Zürich” Szenarios, allerdings auf sehr simple Weise. Im Laufe des vorliegenden Projekts wurden diese Punkte aufgegriffen und verbessert.

Ortswahl sekundärer Aktivitäten

Während in Bösch *et al.* (2016) die Annahme gemacht wurde, dass die existierende Funktionalität zur Zielortwahl in MATSim mit den Szenarien verwendet werden sollte, stellte sich bereits zu Projektbeginn heraus, dass dieser Ansatz nicht zielführend sein würde. Der vorgeschlagene Ansatz ist sehr rechenintensiv, speziell wenn eine so grosse Anzahl an Agenten als auch Gelegenheiten existiert wie in der vorliegenden Studie. Aus diesem Grund musste ein neuer Algorithmus (bisher unveröffentlicht) zur Ortswahl von sekundären Aktivitäten entwickelt werden. Die folgenden Abschnitte beschreiben den Algorithmus und zeigen, wie zufriedenstellende Ergebnisse für die vorliegende Population der Schweiz erzielt werden konnten.

Zielstellung

Aus der Population von Bösch *et al.* (2016) sind die täglichen Pläne aller Agenten bekannt. Die Annahme ist dabei, dass bei der Generierung sinnvolle Pläne erzeugt wurden, in denen speziell die Abfolge der Aktivitätentypen und der verbinden Verkehrsmittel sinnvolle Ketten ergeben. Während die Orte der Hauptaktivitäten (Wohnen, Arbeit, Lehre) bekannt sind, sind die der sekundären Aktivitäten (Einkaufen, Freizeit, …) bisher undefiniert. Ziel ist es daher, Orte für diese Aktivitäten zu wählen, die sinnvoll in die Pläne der Agenten passen. Im speziellen Fall für das Szenario der Schweiz sind die verfügbaren Orte für verschiedene Aktivitätstypen bekannt, sowie die Distanzen zwischen den Aktivitäten sollen entsprechend der in den Plänen vorgesehenen Reisezeiten und Verkehrsmittel angepasst werden.

Abb. 10a zeigt ein Beispiel eines solchen Plans: Während die Aktivitäten “Wohnen” und “Arbeit” bereits fixen Orten zugewiesen sind, müssen diese für “Einkaufen” und “Freizeit” noch bestimmt werden. Aus dem Plan des Agenten ist allerdings bereits bekannt, mit welchen Verkehrsmodi die Wege zurückgelegt werden sollen und wie viel Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Aktivitäten zur Fortbewegung zur Verfügung steht. Ziel ist es

[11] https://www.openstreetmap.org/

[12] https://github.com/matsim-org/pt2matsim

[13] https://opendata.swiss/en/dataset/timetable-2018-gtfs

nun, aus den Mengen der verfügbaren Orten jene auszusuchen, die sinnvoll zu den örtlichen und zeitlichen Vorgaben des bestehenden Plans passen.

Algorithmus

Zur Lösung des Problems schlagen wir einen schrittweisen Sampling-Algorithmus vor. Der erste Schritt besteht darin, einen sinnvollen Vorschlag von Reisedistanzen zufällig zu ziehen (im vorliegenden Fall handelt es sich dabei um Luftliniendistanzen). Abhängig von den Eigenschaften einer Reise zwischen zwei Aktivitäten wird somit eine bestimmte Distanz aus einer Verteilung gezogen. Dies wird für alle Reisen einer Kette getan.

Im zweiten Schritt werden die unbekannten Aktivitätsorte so gewählt, dass die Distanzen zwischen den Aktivitäten einen geschlossenen Pfad ergeben. Dabei gibt es drei Möglichkeiten: Entweder die Summe der Distanzen ist kleiner als die Gesamtdistanz (in diesem Fall gibt es keine Lösung), die Summe ist gleich der Gesamtdistanz (in diesem Fall gibt es genau eine Lösung, eine gerade Linie). Ist die Summe der Distanzen grösser als die Direktdistanz ergeben sich zwei Lösungen, wenn nur eine unbekannte Aktivität in der Kette vorhanden ist, aber viel mehr wenn es sich um mehr als eine Aktivität handelt.

Zur Auffindung zulässiger Lösungen des Problems wird ein Gravitätsmodell genutzt: Zunächst werden die Aktivitäten auf einer geraden Linie zwischen Start- und Endaktivität angeordnet, jeweils mit kleinen (konfigurierbaren) lateralen Abweichungen. Daraufhin wird iterativ ein Gravitätsmodell simuliert, in dem sich die Endpunkte der Reisen und die drauffolgenden Aktivitätsorte gegenseitig anziehen. Ein Beispiel ist in ***Abb. 10b*** zu sehen.

Ist eine Lösung gefunden, geht der Algorithmus über zum dritten Schritt: Zwar steht nun eine zulässige Abfolge von Distanzen für die Aktivitätskette zur Verfügung, allerdings stimmen diese nicht mit Orten überein, an denen tatsächlich eine Aktivität durchgeführt werden kann. Darum werden diese “kontinuierlichen Orte” diskretisiert. Dabei wird im Umkreis der kontinuierlichen Orte nach Möglichkeiten für den jeweiligen Aktivitätstyp gesucht und ein diskreter Ort wird entsprechend gewählt. Dies kann entweder der nächstmögliche Ort sein, oder eine zufällige Auswahl aus den N nächsten Alternativen. Zukünftig sollte es auch möglich sein, Orte entsprechend bestimmter Attraktivitätsmasse o.ä. zu bestimmen.

Schliesslich wird eine Abweichung der diskretisierten Kette zu den gewünschten (in Schritt 1 ausgewählten) Distanzen berechnet. Ist diese Abweichung ausreichend gering, wird die erzeugte Kette akzeptiert, ist die Abweichung zu gross, wird der gesamte Prozess wiederholt bis eine passende Folge von diskreten Orten gefunden ist.

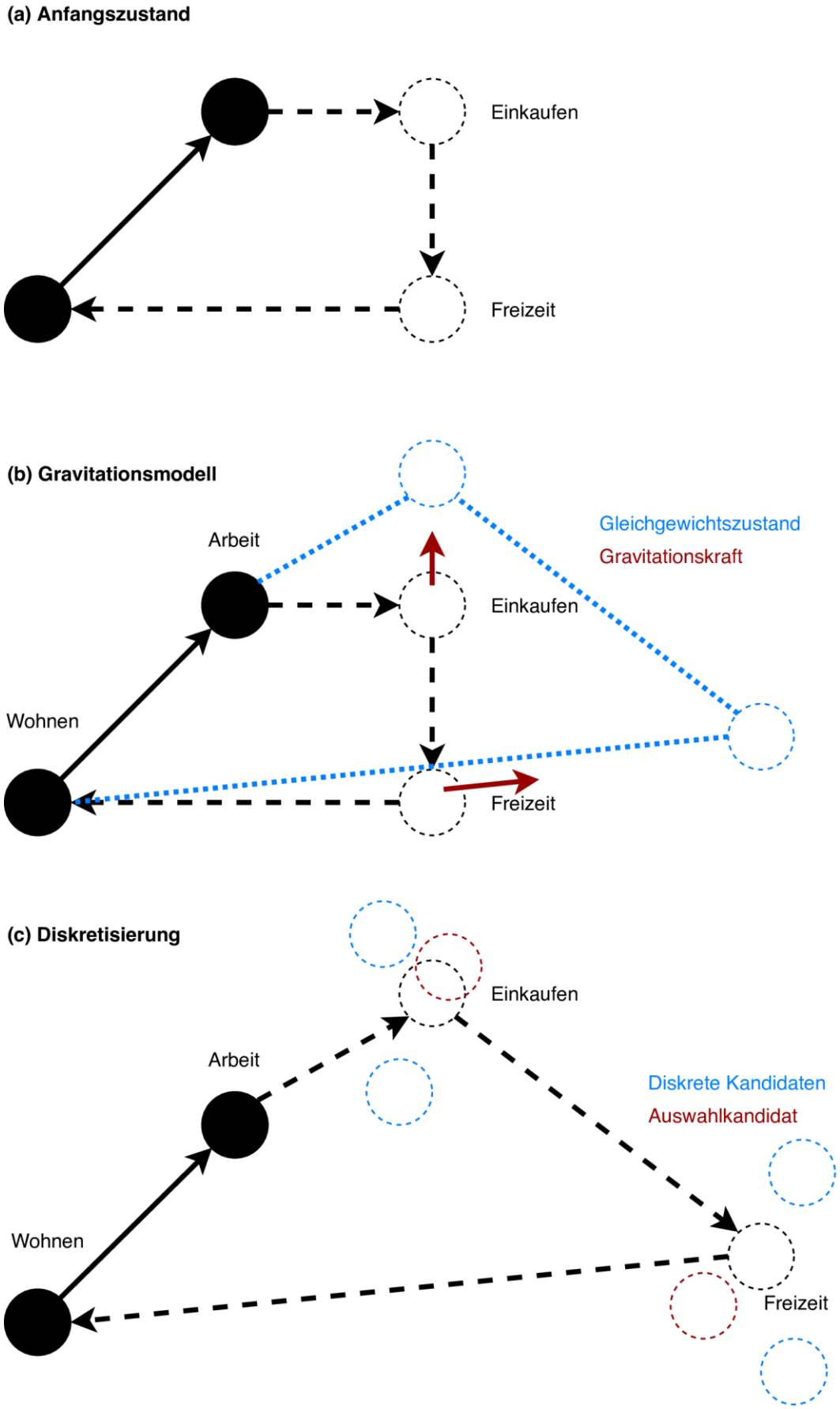


Abb. 10 *Schematische Darstellung der Ortswahl für sekundäre Aktivitäten*

Anwendung

Der Algorithmus wurde auf die vorliegende Agentenpopulation der Schweiz angewendet. Zunächst wurde der Mikrozensus Mobilität und Verkehr verwendet um Distanzverteilungen nach Verkehrsmittel und Reisezeit zu bestimmen. Für jedes Verkehrsmittel wurden die empirische Verteilung der Reisezeiten in eine Anzahl Quantile eingeteilt, sodass jedes Quantil mindestens 400 Beobachtungen enthält. Das Ergebnis ist in ***Abb. 11*** zu sehen.

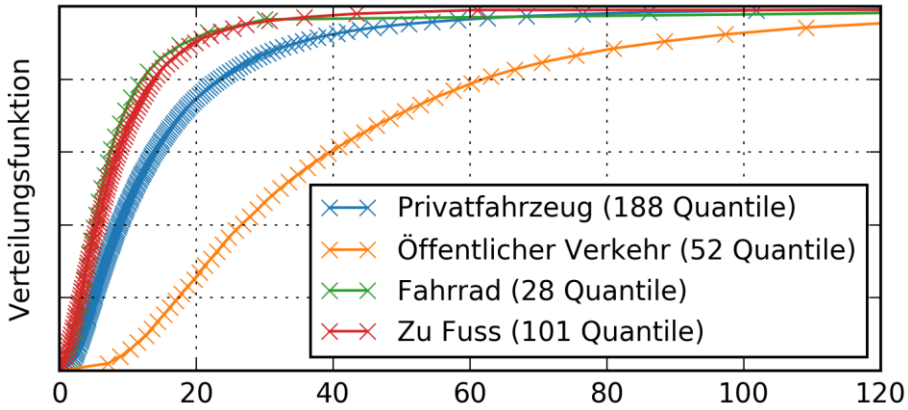


Abb. 11 *Einteilung der Distanz-Quantile für die sekundäre Aktivitätenortswahl*

Für jedes Quantil wurde dann eine Verteilung Distanzen extrahiert. ***Abb. 12*** zeigt für jedes Quantil in allen vier Verkehrsmitteln den Median und den Mittelwert der Verteilungen. Zudem ist der Bereich zwischen dem 10% und dem 90% Perzentil der jeweiligen Distanzverteilung im Hintergrund eingefärbt.

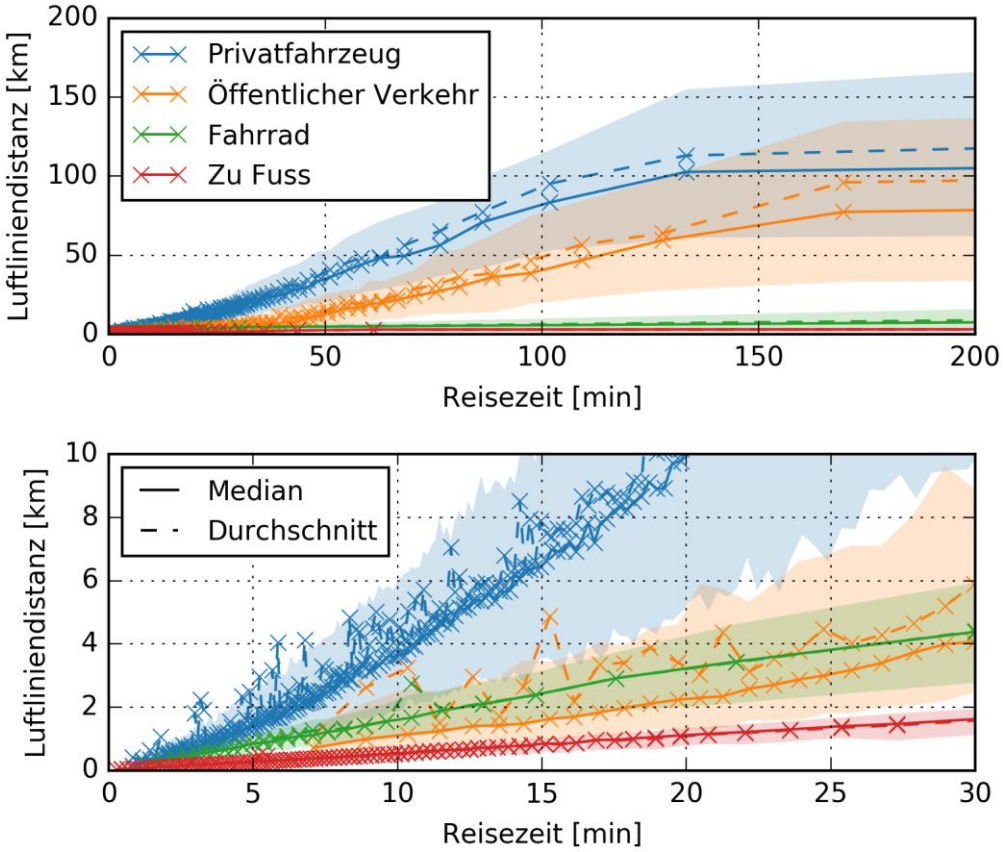


Abb. 12 *Visualisierung der Sampling-Verteilungen für die Ortswahl, oben für den Bereich bis 200 min Reisezeit, unten Vergrössert für den Bereich bis 30 Minuten*

Dabei ist gut zu sehen, wie die Varianz mit längeren Reisezeiten steigt. Ebenso ist klar erkennbar, dass die Verkehrsmodi spezifische Durchschnittsgeschwindigkeiten aufweisen. Interessanterweise ist zu sehen, dass man bis zu einer Reisezeit von ca. 30min im Schnitt mit dem Fahrrad in der gleichen Zeit eine grössere Distanz zurücklegt, als mit dem ÖV.

Diese Distanzverteilungen pro Reisedauer-Quantil wurden nun genutzt um die gewünschten Distanzen zu erzeugen. Zusätzlich wurden die möglichen Orte für die Aktivitäten den Szenariodaten entnommen.

Abb. 13 zeigt das Ergebnis: In schwarz ist die Verteilung der Luftliniendistanzen im Mikrozensus zu sehen, während die heller eingefärbte Verteilung den Ausgangszustand der Population beschreibt. Es ist gut zu sehen, dass ein Grossteil der Distanzen auf sehr kleinen Werten liegt, da die sekundären Aktivitäten direkt an den Wohnort gelegt wurden. Nachdem er Algorithmus angewandt wurde, sieht man (dunkel eingefärbt) dass die erzeugte Distanzverteilung nun gut dem Mikrozensus entspricht. Etwaige Abweichungen können in Zukunft mit weiteren Kalibrierungsschritten, bzw. einer genaueren Analyse der bestehenden Distanzen (z.B. von “Wohnen” nach “Arbeit”) oder Gemeindetypen weiter minimiert werden.

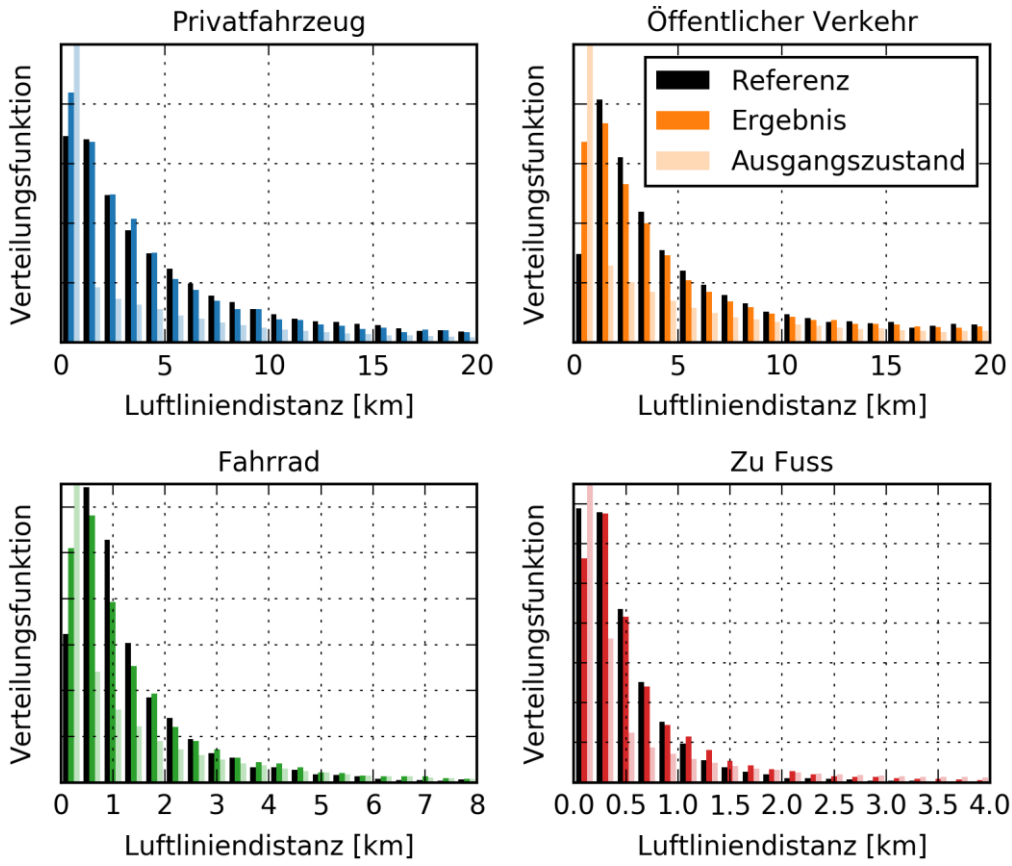


Abb. 13 *Ergebnis der Ortswahl für sekundäre Aktivitäten*

Diskussion

Für den vorliegenden Fall konnten gute Ergebnisse erzielt werden. Hauptziel war es, Aktivitätsorte so zu wählen, dass sie zu den existierenden Plänen passen und dass die Distanzverteilungen der Wege in den Plänen denen des Mikrozensus entsprechen.

Was momentan nicht berücksichtigt wurde sind die Kapazitäten der Aktivitätenorte. Zwar liegend hierzu Ergebnisse vor (Horni, 2013; Bösch *et al.*, 2016), allerdings konnten diese im Rahmen des vorliegenden Projekts nicht genauer untersucht werden. In einer zukünftigen Variante der Population könnte der gesamte Ortswahlalgorithmus iterativ angewendet werden indem die erzeugte Belegung der Aktivitäten pro Tageszeit mit der Kapazität verglichen wird. Agent für Agent könnte dann der Algorithmus angewendet werden und neue Ketten würden nur akzeptiert werden, wenn sich dadurch die mittlere Abweichung zwischen Belegung und Kapazität verkleinern würde.

Zuschneidung des Szenarios

Das ursprüngliche Scenario der Schweiz mit dem kompletten Strassennetzwerk und der Gesamtpopulation von 8 Millionen Agenten stellt die vorhandene Rechenarchitektur nach wie vor Probleme. Darum, und auch aus Gründen eines konsistenten Analysegebiets, soll ein Szenario für die Stadt Zürich und Umland (30km um den Bürkliplatz) ausgeschnitten werden, bzw. soll ein detaillierterer Blick auf dieses Gebiet ermöglicht werden.

Es reicht jedoch beispielsweise nicht, alle Agenten zu entfernen, die nicht im Gebiet wohnen oder keine Aktivität im Gebiet haben. Speziell für die Autobahnen im Analysegebiet ist es wichtig, den Hintergrundverkehr in und durch das Gebiet weiterhin sinnvoll abzubilden. Dies gilt vor allem für Reisen mit dem PKW, aber auch mit dem öffentlichen Verkehr. Das “Ausschneiden” des Szenarios muss daher die Übertritte der Agenten in den Untersuchungsradius detailgetreu abbilden.

Der Prozess verläuft dabei in drei Stufen: Zunächst wird die Population so modifiziert, dass nur die relevanten Elemente bestehen bleiben, als zweiter Schritt wird das ÖV Angebot entsprechend angepasst und im dritten Schritt wird das Netzwerk zugeschnitten. Die einzelnen Punkte werden im Folgenden genauer erklärt.

Population

Bei der Zuschneidung der Population ist zu beachten, dass Verkehr, der über den Szenarienradius hinausgeht, weiterhin abgebildet werden soll. Die Schnittpunkte liegen dabei immer zwischen zwei Aktivitäten, d.h. jeder Agent hat eine finite Anzahl an Wegen, die die Szenariogrenze überschreiten. Drei Beispielwegeketten sind in ***Abb. 14*** zu sehen. Dabei fällt auf, dass es auch Situationen gibt, in denen ein Agent die Szenariogrenze mehrfach auf einem Weg überqueren kann. In diesem Fall muss zwischen Wegen unterschieden werden, die in das Gebiet hineingehen und Wegen, die aus dem Gebiet hinausgehen. Die Wege werden entsprechend zerschnitten, sodass die gesamte Wegstrecke, die im Untersuchungsgebiet liegt, tatsächlich abgebildet werden, während die Teile, die ausserhalb des Gebiets liegen durch virtuelle Etappen (Transportmittel “outside”) ersetzt werden.

Für Wege, die mit einem PKW durchgeführt werden, wird hierfür die Liste der Schnittpunkte auf einem Weg erstellt. An jedem Schnittpunkt wird im Plan des Agenten eine Aktivität mit dem Typ “outside” eingefügt. Die Endzeit wird entsprechend der Zeit angepasst, zu der der Agent an diesem Punkt laut der bestehenden Route angekommen sollte. Die Distanz, die ausserhalb des Gebiets überbrückt wird, wird dann durch einen Weg mit dem Transportmittel “outside” dargestellt, während für die innerseitigen Anteile der Reise die Routen so angepasst werden, dass die *links*, die innerhalb des Gebiets liegen, befahren werden.

Wege, die mit dem ÖV durchgeführt werden, werden ähnlich bearbeitet. Hierbei sind allerdings nicht die *links* im Netzwerk ausschlaggebend, sondern die Stationen, die sich im Untersuchungsgebiet befinden. Wird ein ÖV Weg zerschnitten, so werden die Stationen auf der Route entfernt, die sich ausserhalb des Gebiets befinden und eine “outside” Reise wird zwischen den sich im Gebiet befindlichen Stationen eingebaut. Die Ankunftszeit an den Stationen wird jeweils so eingestellt, wie es im zugehörigen Plan bisher zu finden war.

Wege, die mit dem Langsamverkehr durchgeführt werden (zu Fuss und Fahrrad) werden im aktuellen MATSim Szenario durch Teleportation simuliert. Somit kann die Luftliniendistanz zwischen zwei Aktivitäten zerstückelt werden und die Endzeiten der entstehenden “outside” Aktivitäten können entsprechend angepasst werden.

Mit dieser Art der Zerschneidung der Population haben wir den Vorteil, dass der Hintergrundverkehr detailgetreu entsprechend dem Schweiz-Szenario im Gleichgewichtszustand simuliert wird. Auf der anderen Seite gilt für den Rest des Berichts, dass grenzüberschreitender Verkehr nur in Ausnahmefällen verändert wird. So macht es beispielsweise keinen Sinn, Agenten neue Verkehrsmodi für diese Reisen wählen zu lassen, die entweder von einer “outside” Aktivität starten oder zu einer “outside” Aktivität hinführen. Denn eine Autofahrt von Bern bis wenige Meter hinter die Gebietsgrenze würde direkt auf der Grenze beginnen und somit wäre sie im vorliegenden Szenario sehr kurz. Das heisst ein Transportmittelwahlalgorithmus könnte dann für diese Reise durchaus “zu Fuss” als sinnvolles Verkehrsmittel wählen. Daher werden diese Reisen im Folgenden von solchen Veränderungen ausgeschlossen, wenn nicht anders beschrieben (z.B. für automatisierte vs. konventionelle Privatfahrzeuge).

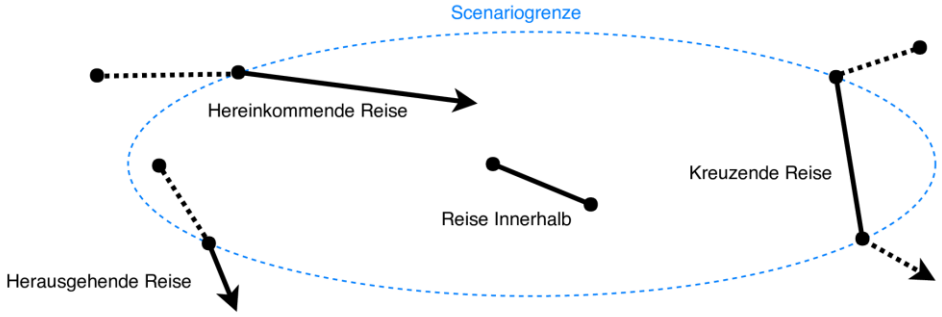


Abb. 14 *Schematische Darstellung der Reduktion der Population*

Alle Agenten, deren Aktivitäten ausserhalb des Untersuchungsgebiets liegen und die mit keinem Weg das Untersuchungsgebiet schneiden, werden aus der Population entfernt.

Die wichtigsten Statistiken zur der 10% Stichprobe der Population, die in den folgenden Simulationen verwendet wird, deren Wegeketten im Ausgangszustand, als auch im Ausschnitt, werden in ***Tab. 19*** zusammengefasst. Es ist zu sehen, das die Agentenpopulation deutlich reduziert werden konnte.

Tab. 19 *Ergebnis der Reduktion der Population*

	Schweiz (10%)	**Zürich (30km, 10%)**
# Agenten [x1000 Agenten]	823	158
# Wohnort innerhalb		137
# Mindestens eine Aktivität innerhalb		155
# Ausschliesslich Durchgangsverkehr		21
# Reisen [x1000 Reisen]	2‘230	606
# Innerhalb des Gebiets		514
# Gebietsgrenze überquerend		69
# Gebiet durchquerend		22
# Aktivitäten [x1000 Aktivitäten]	2‘935	1‘023

ÖV Angebot

Eine Simulationskomponente, die viel Rechenzeit beansprucht, ist die Simulation des öffentlichen Verkehrs. In bisherigen Studien (e.g. Bösch *et al.*, 2016) wurde das ÖV Angebot der Schweiz selbst für eine Ausschnittssimulation beibehalten, was zu unnötig hohen Rechenzeiten geführt hat. Daher ist die Idee im vorliegenden Projekt, alle Linien zu entfernen, die nicht relevant für das Simulationsgebiet sind.

Dabei sind einige Dinge zu beachten: Einerseits soll der Übergangsverkehr in das Gebiet und der Durchgangsverkehr sinnvoll abgebildet werden. Das lässt sich aus den existierenden Plänen der Agenten aus der Schweiz-Population ableiten. Nur die Linien, die tatsächlich von den übriggebliebenen Agenten (siehe vorheriger Abschnitt) genutzt werden, müssen weiterhin simuliert werden. Allerdings sollten alle Linien innerhalb des Gebiets weiterhin Bestand haben, denn auch wenn eine Linie momentan von keinem Agenten genutzt wird, könnte sich doch im Laufe der geplanten Simulationen ein gewisser Teil der Population umentscheiden.

Die Reduktion des ÖV Angebots erfolgt daher in zwei Schritten: Zunächst werden alle Stationen gesucht, die innerhalb des Gebiets liegen und zur Menge der bestehenden Stationen hinzugefügt. Für jede Linie wird dann die erste Station gesucht, die nach einer

Überquerung des Untersuchungsgebiet liegt, sowie die letzte Station, die sich im Untersuchungsgebiet befindet. Alle Stationen dazwischen, selbst wenn die Route das Gebiet kurzzeitig verlässt, werden ebenfalls zu den bestehenden Stationen hinzugefügt. Die Linien werden dann so gekürzt, dass sie jeweils nur noch aus dem Teil zwischen ihrem Start- und Endstation innerhalb des Gebiets bestehen. Die Abfahrtzeiten an der ersten Station werden jeweils so angepasst, dass die Fahrzeuge die Station fahrplangetreu verlassen. Ein Beispiel anhand einer Bahn-Linie wird in ***Abb. 15*** gegeben. Wie bereits im vorherigen Abschnitt besprochen, beginnen Agenten ihre Reisen jeweils an der ersten Station innerhalb des Untersuchungsgebiets. Da all jene Stationen in im reduzierten Fahrplan enthalten sind, ist dies konsistent. Wird der Algorithmus ausgeführt, werden automatisch alle Linien gelöscht, die nicht durch eine bestehende Station führen. Auf diese Weise wird ein Grossteil der ÖV-Simulation entfernt, was erhebliche Geschwindigkeitsvorteile bei der Simulation des Szenarios ermöglicht.

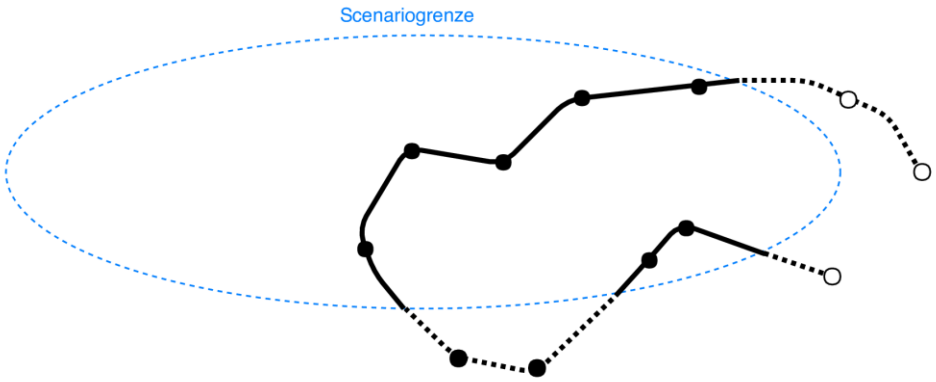


Abb. 15 *Schematische Darstellung der ÖV-Reduktion*

Die finalen Statistiken zum ÖV-Fahrplan nach dem Ausschneidevorgang sind in ***Tab. 20*** zusammengefasst.

Tab. 20 *Ergebnis der Reduktion des ÖVs*

	Schweiz	**Zürich (30km)**
# Linien	2‘183	648
# Haltestellen und Bahnhöfe	48‘101	8‘009

Netzwerk

Zuletzt muss noch das Netzwerk minimiert werden. Da in der Netzwerksimulation von MATSim jeder *link* in jedem Zeitschritt betrachtet wird, gibt es einen gewissen Teil der Rechenzeit, die nur dafür verwendet wird festzustellen, dass auf einem *link* “nichts” passiert. In bisherigen Versionen des Szenarios (Bösch *et al.*, 2016) wurde diese nicht berücksichtigt. Nach dem Ausschneiden der Population und des ÖV-Fahrplans wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, ist es jedoch einfach, auch das Netzwerk selbst zuzuschneiden.

Hierzu wird folgendermassen vorgegangen: Da die Routen aller Agenten mit PKW-Wegen, sowie die Routen aller ÖV-Linien bekannt sind, können alle *links* entfernt werden, die nicht im Untersuchungsgebiet liegen und gleichzeitig nicht in einem Plan eines Agenten vorkommen. Die wichtigsten Statistiken zum Netzwerk vor und nach der Reduktion sind in ***Tab. 21*** zusammengefasst. ***Abb. 16*** zeigt das verwendete Netzwerk des Zürich-Szenarios.

Tab. 21 *Ergebnis der Reduktion des Netzwerks*

	Schweiz	Zürich (30km)
# Knoten [x1000]	386	73
# Verbindungen [x1000]	875	160
# Länge [1000 km]	153	23

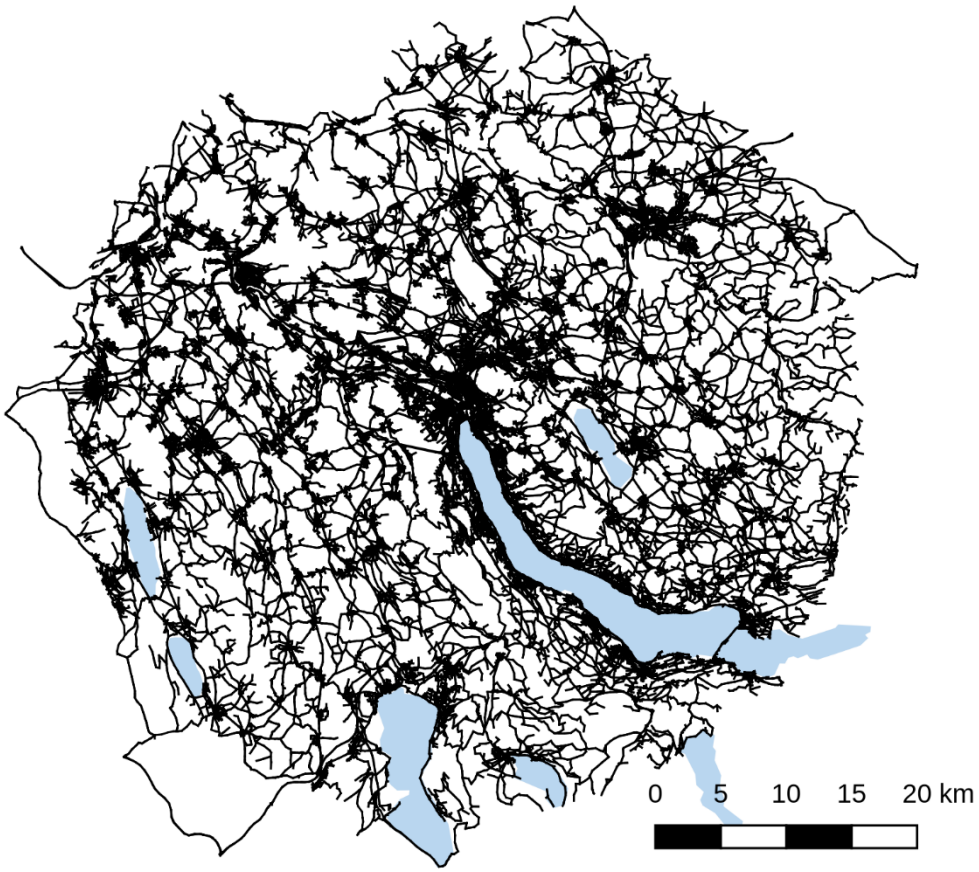


Abb. 16 *Reduziertes Netzwerk für das Projektszenario*

Haushalte und Standorte

Die Haushalte und Standorte in der Simulation können entsprechend entfernt werden. Für die Standorte werden all jene entfernt, die ausserhalb des Untersuchungsgebiet liegen, während für die Haushalte all jene entfernt werden, für die kein Mitglied mehr existiert. Die resultierenden Statistiken sind in ***Tab. 22*** zusammenfasst.

Tab. 22 *Ergebnis der Reduktion der Haushalte und Standorte*

	Schweiz	Zürich (30km)
# Haushalte [x1000]	648	150
# Gelegenheiten [x1000]	891	148

Kalibration

Zur Kalibration des Szenarios waren einige Arbeitsschritte erforderlich, einschliesslich einer neuen Methodik zur Simulation der Verkehrsmittelwahlentscheidungen, welche separat in Kapitel 6.1.3 beschrieben wird. Die folgenden Abschnitte werden die

Vorbereitung der Referenzdaten, den Aufbau unserer Kalibrationspipeline, sowie die eigentliche Kalibration genauer erläutern.

Für die Kalibration der Simulation wurden hauptsächlich folgende Dimensionen berücksichtigt, die ausschlaggebend für eine sinnvolle Analyse der Verkehrsmittelwahl der Agenten sind:

- Die Reisezeitverteilung pro Verkehrsmittel
- Die Reisedistanzverteilung pro Verkehrsmittel
- Die Reisegeschwindigkeitsverteilung pro Verkehrsmittel
- Die Verteilung der Verkehrsmittel nach Distanz

In bisherigen Studien zu MATSim ist eine detaillierte gleichzeitige Betrachtung dieser wichtigen Dimensionen nur aus den Studien der Berliner Gruppe bekannt (Ziemke und Nagel, 2017). Aus bisherigen Erfahrungen mit MATSim Simulationen ist ausserdem bekannt, dass es schwierig ist, sowohl die Verteilungen der Reisezeiten, als auch der Reisedistanzen simultan sinnvoll zu kalibrieren. Eine zusätzliche gute Entsprechung der mittleren Reisegeschwindigkeiten konnte zudem noch für kein MATSim-Szenario im Schweizer Kontext gezeigt werden. Da der Fokus im vorliegenden Projekt jedoch auf den Verkehrsmittelentscheidungen der Agenten liegt, wurde es als Ziel gesetzt, alle drei Dimensionen (Reisezeit, Distanz und Geschwindigkeit) für die Hauptmodi PKW und ÖV detailgetreu abzubilden.

Ein hochwertiger Fit der Verkehrsmittelverteilung nach Distanz ist wichtig um zu zeigen, dass das verwendete Verkehrsmittelwahlmodell sinnvolle Ergebnisse erzielt. Eine einfache Analyse der Verkehrsmittelverteilung über alle Distanzklassen, wie sie häufig für Verkehrssimulationen durchgeführt wird, ist irreführend, da die Distanzen über den Preis eine wichtige Rolle bei der Verkehrsmittelwahl spielen. Ist dieser Zusammenhang nicht ausreichend kalibriert, bzw. validiert, können keine vertrauenswürdigen Aussagen über die simulierten Verkehrseffekte getätigt werden. Insbesondere stellt eine Verkehrsmittelverteilung nach Distanzklassen sicher, dass den Zeitwerten in der Verkehrsmittelwahl genügend Gewicht verliehen wird, anstatt dass sich der Modalsplit hauptsächlich aus den unbeobachteten Eigenschaften ergibt (was sehr hohen verkehrsmittelspezifischen Konstanten in einem Verkehrsmittelwahlmodell entspräche).

Referenzdaten

Die Referenzdaten für die Kalibration des Verkehrsverhaltens stammen aus dem Mikrozensus für Verkehr und Mobilität. In dem Datensatz, bestehend aus den detaillierten Tagesabläufen von rund 60,000 Teilnehmern, sind detaillierte Angaben zu den durchgeführten Aktivitäten, ihren Orten und deren Start- und Endzeiten enthalten. Dies ermöglicht eine Analyse der Verteilungen der Reisedistanzen und Reisezeiten, sowie der mittleren Geschwindigkeiten und der Nutzung der einzelnen Transportmittel.

Für das Untersuchungsgebiet (30km um den Bürkliplatz in Zürich) enthält der Mikrozensus 23‘641 beobachtete Reisen, die innerhalb des Gebiets stattfinden. Diese werden zum Vergleich mit der Simulation herangezogen. Gebietsüberschreitende Reisen werden sowohl in der Analyse der Simulation als auch in der Analyse der Reisen aus dem Mikrozensus ignoriert, da diese aufgrund der Zuschneidung des Szenarios zu Verzerrungen führen würden.

Leider sind viele Angaben zu Zeiten im Mikrozensus relativ grob gerundet. So werden die Start- und Endzeiten der Aktivitäten oft auf fünf Minuten gerundet, sodass die Berechnung der Reisezeiten zwischen ihnen nur sehr ungenau geschehen kann. Aus diesem Grund wurden alle Reisen mit Startpunkt, Zielpunkt und Abfahrtzeit des Mikrozensus neu geplant. Dazu wurde die Google Maps API genutzt, und zwar für jedes mögliche Verkehrsmittel für jede im Mikrozensus vorhandenen Weg. Zwar reichen für die Kalibrierung lediglich die beobachteten Verkehrsmittel, der resultierende Datensatz erlaubt es aber detaillierte Verkehrsmittelwahlmodelle zu schätzen, wie beispielsweise in Bundesamt für

Raumentwicklung (2014) für einen älteren Mikrozensus oder in de Freitas (2018) für ein integriertes Verkehrsmittel- und Routenwahlmodell.

Abb. 17 zeigt die Reisezeiten für den originalen Datensatz des Mikrozensus 2015 und dazu den neu gerouteten Datensatz. Man erkennt klar die starken Rundungseffekte im originalen Datensatz, während die Verteilung mit den anhand real gemessener Reisezeiten bestimmten Routen viel glatter ist und somit einen höheren Informationsgehalt besitzt.

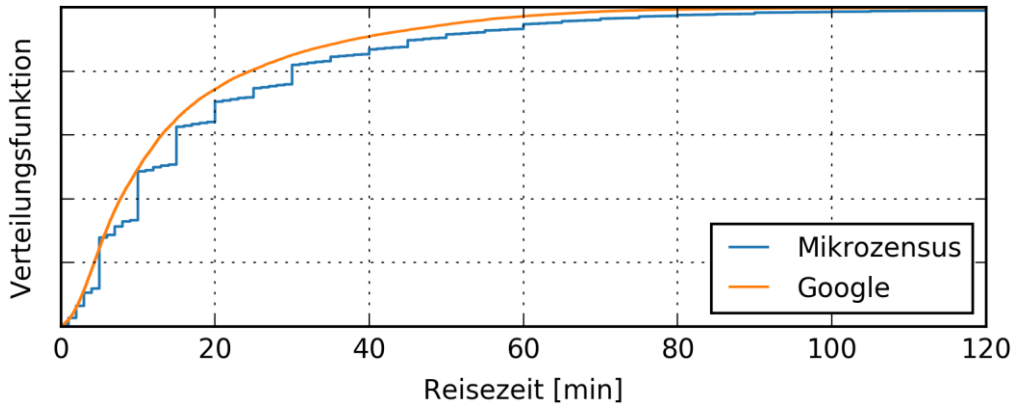


Abb. 17 *Gerundete Reisezeiten im Mikrozensus und die verbesserten Reisezeiten des Routings mit Google*

Kalibrationsprozess

Die Kalibration im vorliegenden Projekt wurde weitestgehend manuell durchgeführt, d.h. Parameterwerte wurden modifiziert, dann wurde eine Simulation gestartet, das Ergebnis wurde ausgewertet und schliesslich wurde überprüft, ob die Änderung zu Annäherung an die Referenzdaten geführt hat. In Standard-MATSim Simulationen ist dieses Unterfangen sehr aufwändig, da es eine Vielzahl an Parametern gibt. So müsste beispielsweise jeder Parameter im Verhaltensmodell (je eine Konstante pro Verkehrsmittel, ein Zeitwert pro Verkehrsmittel, ein Kostenparameter, …) in dieser Kalibration berücksichtigt werden.

Im vorliegenden Projekt war es ein Ziel, Verkehrsmittelwahlmodelle direkt in MATSim zu nutzen (siehe Kapitel 5 für die Modelle und Kapitel 6.1.3 für deren Integration in MATSim). Dies vereinfachte den Prozess ungemein, da die meisten Parameter des Wahlmodells nicht kalibriert werden mussten, bzw. nicht kalibriert werden sollten.

Anfänglich wurden zwei Parameter vorgeschlagen: Der *"flow capacity factor"*, der die Kapazitäten im Strassennetzwerk gleichmässig im ganzen Szenario skaliert, sowie die "*crossing penalty*", die eine Neuentwicklung in unserem Szenario darstellt und dafür sorgt, dass Agenten eine gewisse Zeit länger auf *links* verweilen müssen, die zu einer Kreuzung führen und nicht die Hauptachse dieser darstellen. Entsprechend bildet diese Erweiterung in einfacher Weise Verzögerungen durch Vorfahrtsregelungen und Ampelschaltungen ab.

Für die Verwendung in MATSim wurde aus den Verkehrsmittelwahlmodellen aus Kapitel 5.6 eine einfachere Variante erstellt die nur die Reisecharakteristiken nutzt, die aus der Simulation einfach zu bestimmen sind. Das Modell ist wie folgt definiert:

$$u_{car}(\chi) = \alpha_{car} + \beta_{travelTime,car} \cdot \chi_{travelTime,car} + \beta_{travelTime,car} \cdot \theta_{parkingSearchPenalty} + \beta_{travelTime,walk} \cdot \theta_{accessEgressWalkTime} + \beta_{cost} \cdot \left(\frac{\chi_{crowflyDistance}}{\theta_{averageDistance}}\right)^{\lambda} \cdot \chi_{cost,car}$$

$$u_{pt}(\chi) = \alpha_{pt} + \beta_{numberOfTransfers} \cdot \chi_{numberOfTransfers} + \beta_{inVehicleTime} \cdot \chi_{inVehicleTime} + \beta_{transferTime} \cdot \chi_{transferTime} + \beta_{accessEgressTime} \cdot \chi_{accessEgressTime} + \beta_{cost} \cdot \left(\frac{\chi_{crowflyDistance}}{\theta_{averageDistance}}\right)^{\lambda} \cdot \chi_{cost,pt}$$

$$u_{bike}(\chi) = \alpha_{bike} + \beta_{travelTime,bike} \cdot \chi_{travelTime,bike} + \beta_{age,bike} \cdot \max(0, a_{age} - 18)$$

$$u_{walk}(\chi) = \alpha_{walk} + \beta_{travelTime,walk} \cdot \chi_{travelTime,walk}$$

Die Variablen, die mit α, β und λ bezeichnet sind entstammen direkt den Schätzungen mit Biogeme (mit kleineren Anpassungen, siehe unten), während a agentenspezifische Eigenschaften bezeichnen und θ Kalibrationsparameter darstellen, die mit sinnvollen Annahmen angepasst wurden. Alle χ bezeichnen die erklärenden Variablen, die im Verkehrsmittelwahlprozess für die jeweiligen Entscheidungssituationen berechnet werden müssen. Die Parameterwerte sind in ***Tab. 23*** zusammengefasst.

Tab. 23 *Modellparameter für das Grundszenario*

MIV (car)	α_{car}	0.827	
	$\beta_{travelTime,car}$	-0.0667	[min^{-1}]
ÖV (pt)	α_{pt}	0.0	
	$\beta_{numberOfTransfers}$	-0.17	
	$\beta_{inVehicleTime}$	-0.0192	[min^{-1}]
	$\beta_{transferTime}$	-0.0384	[min^{-1}]
	$\beta_{accessEgressTime}$	-0.0804	[min^{-1}]
Fahrrad (bike)	α_{bike}	-0.1	
	$\beta_{travelTime,bike}$	-0.0805	[min^{-1}]
	$\beta_{age,bike}$	-0.0496	[a]
Zu Fuss (walk)	α_{walk}	0.63	
	$\beta_{travelTime,walk}$	-0.141	[min^{-1}]
Diverse	β_{cost}	-0.126	[CHF^{-1}]
	λ	-0.4	
	$\theta_{averageDistance}$	40	[km]
Kalibration	$\theta_{parkingSearchPenalty}$	6	[min]
	$\theta_{accessEgressWalkTime}$	5	[min]

Während fast alle Parameter direkt aus der Schätzung des Models mit Biogeme entstammen, wurden die Parameter für “Fahrrad” manuell im Kalibrationsprozess angepasst. Dies ist aus unserer Sicht vertretbar, da die Simulation hier sehr von den Annahmen im Datensatz, der die Grundlage der Schätzung bildet, abweicht. Der grösste Unterschied ist, dass in MATSim momentan keine Fahrradverfügbarkeit für die Agenten berücksichtigt wird. Somit hat jeder Agent die Möglichkeit, ein Fahrrad zu nutzen, was das Verkehrsmittel ungleich attraktiver macht. Dementsprechend wurde das Modell in diesem Punkt angepasst.

Für den “*flow capacity factor*” wurde im Kalibrationsprozess zunächst ein Wert von 10% angenommen, der eine logische Wahl darstellt. Da nur eine Stichprobe der Population von 10% simuliert wird, macht es Sinn, auch das Netzwerk um 10% zu skalieren. Überraschenderweise ist dies auch der Wert, der die beste Übereinstimmung mit den Referenzdaten liefert. Die “*crossing penalty*” wurde nach mehreren Kalibrationsschritten auf 3 Sekunden eingestellt. Wir konnten feststellen, dass dieser neue Parameter in unserer

MATSim Implementierung tatsächlich eine wichtige Rolle dabei spielt, realistische Reisezeiten, aber vor allem auch realistische mittlere Reisegeschwindigkeiten zu erzeugen. Unsere Empfehlung für zukünftige Simulationen und Projekte ist daher, diese neue Komponente zu verwenden.

Kalibrationsergebnis

Die Ergebnisse der Kalibration sind in ***Abb. 18*** bis ***Abb. 22*** dargestellt. In der ersten Abbildung ist die Reisezeitverteilung aus unserem Simulationslauf des Grundszenarios für Zürich zu sehen, im Vergleich mit den Referenzdaten aus dem neu gerouteten Mikrozensus. Es ist klar erkennbar, dass die entsprechenden Verteilungen für die Verkehrsmittel gut reproduziert werden. Ebenso ist eine gute Übereinstimmung der Distanzen (***Abb. 19***) und der Geschwindigkeiten (***Abb. 20***) zu sehen. Hier ist anzumerken, dass die nicht-motorisierten Reisen “teleportiert” werden, d.h. es wird die Luftliniendistanz zwischen Start- und Endpunkt bestimmt, welche mit einem Korrekturfaktor angepasst wird. Daraufhin wird mit einer fixen Geschwindigkeit pro Verkehrsmittel die Reisezeit berechnet. Da dieser Wert konstant ist, sieht man eine singuläre Verteilung in ***Abb. 20***.

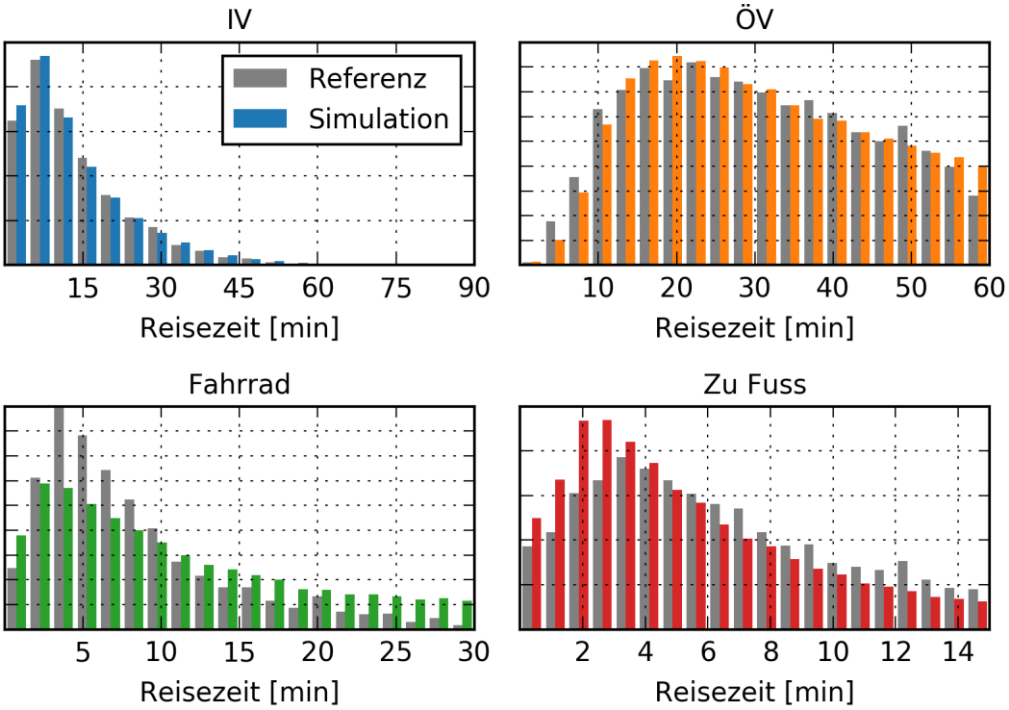


Abb. 18 *Reisezeiten im Kalibrierten Szenario im Vergleich mit den Referenzdaten*

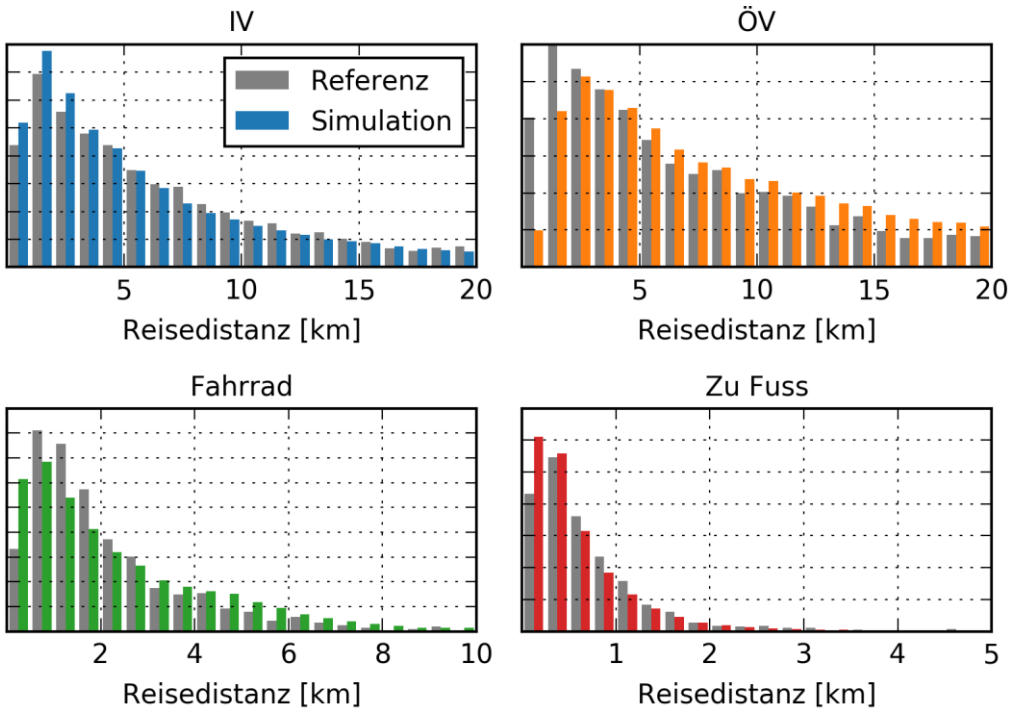


Abb. 19 *Reisedistanzen im Kalibrierten Szenario im Vergleich mit den Referenzdaten*

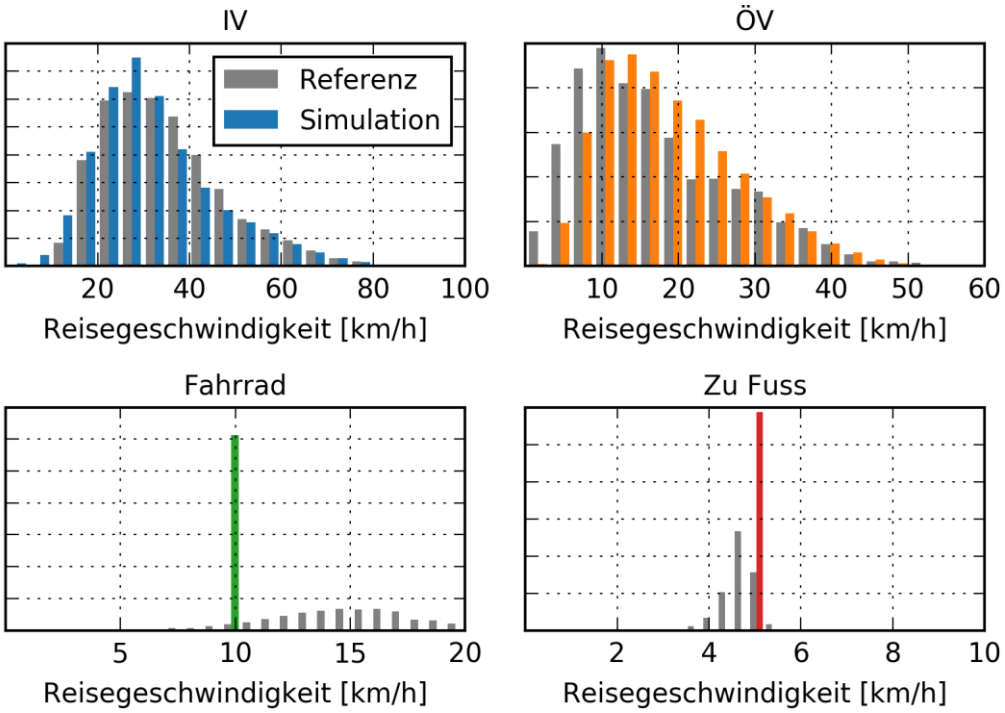


Abb. 20 *Reisegeschwindigkeiten im Kalibrierten Szenario im Vergleich mit den Referenzdaten. Für den Langsamverkehr wurden konste Geschwindigkeiten angenommen.*

Ähnlich gut können wir in unserer Simulation den Modalsplit nach Distanzklassen widergeben. ***Abb. 21*** vergleicht den Anteil an Reisen in der Simulation und in den Referenzdaten.

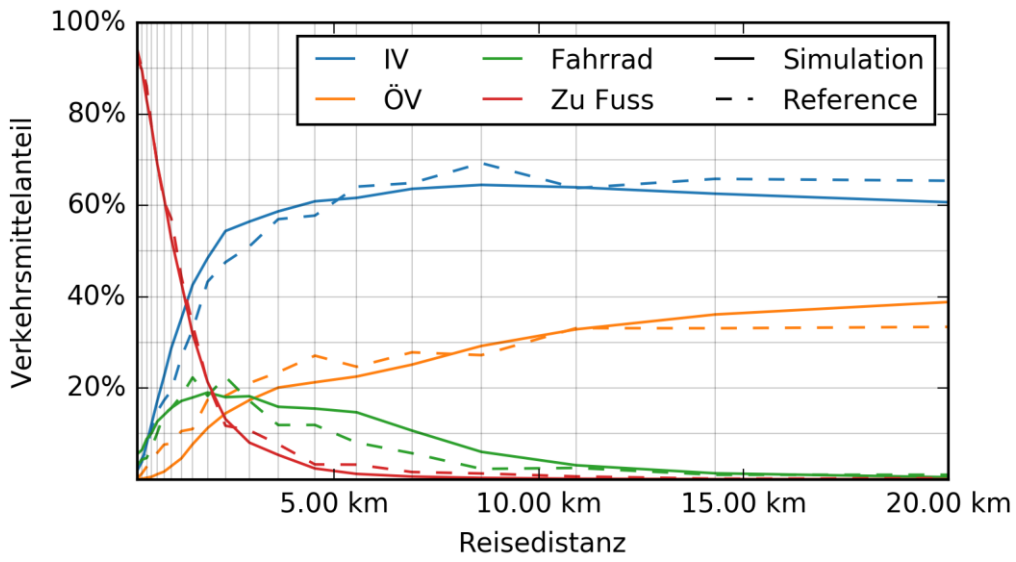


Abb. 21 *Kalibrierte Verteilung der Verkehrsmittelanteile nach Distanzklassen. Die Vergleichspunkte entsprechen den 20 Quantilen der Distanzverteilung des Referenzdatensatzes und sind durch das Raster dargestellt.*

Zusätzlich kann das kalibrierte Szenario nun gut die Verkehrsmittelverteilung nach Tageszeit abbilden (***Abb. 22***).

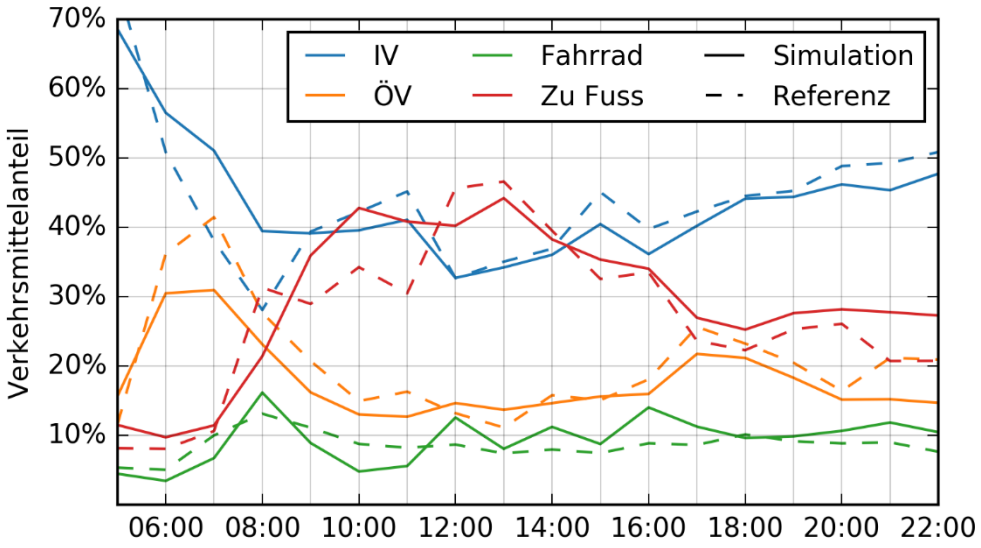


Abb. 22 *Kalibration der Verkehrsmittelanteile über den Tagesverlauf*

Im Laufe des Projekts wurde viel Arbeit in die Kalibration des Grundszenarios unter Berücksichtigung der neuen Verkehrsmittelwahlmodelle gesteckt. Letztlich kann gesagt werden, dass sich dieser Arbeitsaufwand ausgezahlt hat, da nun ein agent-basiertes Verkehrsmodell für die Stadt Zürich und Umland vorliegt, welches es in diesem Detailgrad und in dieser Modellgüte so vorher noch nicht gegeben hat. Im Vergleich mit existierenden MATSim Szenarien gibt es bisher nur wenige Fälle, in denen ein ähnlich gutes Resultat erzielt wird (siehe z.B. Ziemke und Nagel (2017)).

6.1.3 Simulationskomponenten

Automatisierte Taxis

In bisherigen Studien mit MATSim am IVT (Boesch und Ciari, 2015; Meyer *et al.*, 2017) wurden hauptsächlich heuristische bzw. aggregierte Methoden angewendet, um die Dynamik automatisierter Fahrzeugflotten zu simulieren. Da im vorliegenden Projekt explizit das MATSim Framework genutzt werden sollte, mussten entsprechende Komponenten entwickelt werden, die die Simulation automatisierter Fahrzeuge in diesem Simulationstool erlauben.

Wie weiter oben bereits beschrieben, setzt MATSim auf eine Simulationsdynamik, bei der zunächst Tagespläne für Agenten vorgeschlagen werden. Erst in der zweiten Phase werden diese Pläne zusammen in der Netzwerksimulation getestet, wobei alle Entscheidungen konstant bleiben. Das heisst in der Grundform besitzt MATSim keine Funktionalität um Entscheidungen dynamisch während der Netzwerksimulation zu treffen. Für Flotten automatisierter Fahrzeuge (insbesondere für Taxiflotten) ist es jedoch unerlässlich, dass diese dynamisch simuliert werden können. Am VSP in Berlin wurde daher die DVRP (Dynamic Vehicle Routing Problem) Komponente für MATSim (Maciejewski *et al.*, 2017) entwickelt, welche es ermöglicht, solche dynamischen Vorgänge abzubilden. Dabei gibt es bestimmte Agenten, die in jedem Zeitschritt ihren Plan ändern können und somit für die Simulation, speziell von *on-demand* Angeboten, geeignet sind.

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde diese Erweiterung aufgegriffen und auf die Simulation automatisierter Fahrzeuge spezialisiert. Der entwickelte Ansatz (Hörl, 2017) ermöglicht es dabei auf flexible Weise verschiedene Angebotsformen automatisierter Fahrzeuge zu konfigurieren und zu simulieren. Es muss erwähnt werden, dass die Dynamik dieser Komponente einseitig auf der Simulation des Angebots liegt, die Reisenden selbst (Nachfrageseite) werden nach wie vor mit einem statischen Plan simuliert. Das heisst, wenn sie erwarten, dass sie mit einem dynamischen Service eine Reise durchführen (z.B. mit einem Taxi), müssen sie so lang warten, bis tatsächlich ein Fahrzeug vorbeikommt, um sie einzusammeln. Eine Änderung der Reiseroute nach einer zu langen Wartezeit ist hier nicht möglich.

Die dynamischen Fahrzeug-Agenten in der DVRP Erweiterung führen, wie die statischen Nachfrageagenten, entweder Aktivitäten durch oder befinden sich auf Wegen zwischen diesen. Für die automatisierten Fahrzeuge sind dabei in der Erweiterung des IVT drei Aktivitätstypen vorgesehen:

- **Warten ("*Idle*"):** Der Agent befindet sich an einem Punkt im Netzwerk und wartet auf neue Anweisungen. Er ist dabei "geparkt", allerdings nur im Sinne, dass er an einen bestimmten Strassenabschnitt im Netzwerk gebunden ist, auf diesem aber keinen Platz einnimmt (momentan wird keine Parkdynamik bzw. kein Platzbedarf simuliert).
- **Kunden auflesen ("*Pickup*"):** Der Agent ist an einem Strassenabschnitt angekommen, an dem ein Kunde eingesammelt werden soll. Falls der Kunde noch nicht an diesem *link* ist, wartet das Fahrzeug. Sobald der Kunde erscheint, wird eine bestimmte zusätzliche Zeit gewartet, die den Einsteigevorgang simuliert. Danach beginnt das Fahrzeug den folgenden Weg.
- **Kunden absetzen ("*Drop-off*"):** Der Agent kommt an einem Strassenabschnitt an, an dem ein Kunde abgesetzt werden soll. Dieser Ausstiegsvorgang beansprucht eine konfigurierbare, festgelegte Zeit. Danach fährt das Fahrzeug mit der nächsten Aufgabe fort (welche entweder ein weiterer Weg, oder eine Warteaktivität sein kann).

Momentan ist die stabile Funktionalität auf diese Aktivitäten begrenzt. Allerdings wurde der Code bereits im Laufe des Projekts bzw. in Parallelprojekten erweitert, dass weitere Phänomene simuliert werden können: Beispielsweise wurde im Rahmen einer Untersuchung zu elektrischen, automatisierten Fahrzeugen eine Aufladeaktivität ("*Recharge*") eingeführt, die die Fahrzeuge explizit an vorgegebenen Ladestationen durchführen müssen. Entsprechend ist für zukünftige Projekte geplant den Platzbedarf der

Fahrzeuge genauer zu berücksichtigen, indem sie tatsächlich nur dort "*Idle*" Aktivitäten durchführen können, wo genug Standplatz verfügbar ist. In einem dritten Projekt wurde bereits begonnen, verschiedene Parkierungsstrategien für AVs zu testen.

Die Fahrzeuge werden in der Erweiterung durch einen "Dispatcher" von einer Aktivität zur nächsten geschickt. Der Dispatcher erhält dabei von MATSim in jedem Zeitschritt Informationen über neue Anfragen von Kunden, die den entsprechenden Service nutzen möchten. Trifft eine solche Anfrage ein, speichert der Dispatcher diese zwischen und entscheidet dann in jedem Zeitschritt, welches Fahrzeug zu welchem Kunden geschickt wird, bzw. welches Fahrzeug welche Aktivität durchführen soll.

In der Grundversion der Erweiterung gibt es grundsätzlich zwei Dispatcher: Eine einfache Taxi-Heuristik, wie sie in Maciejewski und Bischoff (2015) beschrieben wird und eine darauf aufbauende *Pooling*-Heuristik. Der Fokus dieser beiden Ansätze liegt auf Geschwindigkeit und einer schnellen Lösung des Zuordnungsproblems zwischen freien Fahrzeugen und offenen Kundenanfragen. Im weiteren Verlauf des Projekts wurden auch erheblich intelligentere Algorithmen untersucht, die aber beträchtlich mehr Rechenzeit beanspruchen. In Kapitel 6.2 werden diese, zusammen mit den einfachen Heuristiken, im Detail betrachtet.

Die Simulationskomponente für automatisierte Fahrzeuge wurde beim ABTMRANS Workshop 2017 (Hörl, 2017) vorgestellt. Dabei wurde gezeigt, dass sinnvolle Nachfrageeffekte mit diesem Ansatz dargestellt werden können: Basierend auf den durch die Flottengrösse realisierten Warte- und Reisezeiten und den entsprechenden Nutzerpräferenzen (Scoring-Parameter) konnte gezeigt werden, dass immer weniger Agenten der Service nutzten, umso höher die Wartezeiten wurden. Im Gegensatz zu bisherigen Studien der TU Berlin (siehe alle gemeinsamen Veröffentlichungen von Maciejewski und Bischoff im Literaturverzeichnis), die eine statische Nachfrage nutzen, konnte so gezeigt werden, dass bei entsprechender Kalibrierung der Nutzerpräferenzen ein realistisches und sinnvolles Gleichgewicht zwischen Angebotskonfiguration und Nachfrage mit MATSim erreicht werden kann, auch für dynamisch simulierte Verkehrsangebote.

Automatisierte Privatfahrzeuge

Ebenfalls wurde eine Erweiterung für MATSim geschrieben, die die Simulation privater automatisierter Fahrzeuge ermöglicht. Grundsätzlich ist die Nutzung der Fahrzeuge sehr ähnlich zu konventionellen Fahrzeugen, allerdings sollen hier die Situationen berücksichtigt werden, in denen Leerfahrten entstehen können.

In der entsprechenden Komponente wird daher wiederum als Basis die DVRP Erweiterung für MATSim genutzt. Die dynamischen Agenten sind dabei die Privatfahrzeuge der Nutzer (d.h. statt einem traditionellem MATSim Agenten wird nun ein solcher und zusätzlich ein Fahrzeugagent simuliert). Diese Privatfahrzeuge können sich prinzipiell frei bewegen mit den gleichen Aktivitäten wie flottenbasierte automatisierte Fahrzeuge (siehe vorheriges Kapitel), kennen allerdings den Tagesplan ihrer Besitzer und haben entsprechend ebenfalls einen festdefinierten Tagesablauf.

Die Implementierung des Angebots erfolgt dabei so, dass der bestehende Tagesablauf des Agenten gescannt wird und der Algorithmus überprüft, für welche Reisen das private automatisierte Fahrzeug genutzt werden soll. Entsprechend wird ein Zeitplan für das Fahrzeug entworfen, der so strukturiert ist, dass das Fahrzeug immer am gewünschten Abfahrtsort bereitsteht, sobald der Agent das Fahrzeug in seinem Plan nutzen möchte. Dies eröffnet die Möglichkeit zu Leerfahrten: Beispielsweise könnte sich ein Agent entscheiden mit seinem Fahrzeug auf Arbeit zu fahren, dann von Arbeit aus den kurzen Weg zu einem Laden zu laufen um sich dort wieder von seinem Fahrzeug abholen zu lassen und nach Hause zu fahren. Die Leerkilometer, die so entstehen, können einerseits gemessen werden und andererseits direkt Einfluss nehmen auf die Verkehrsmittelwahl der Agenten, da auch für diese Leerkilometer Kosten berechnet werden.

Die Komponente ist bisher jeweils fokussiert auf einen Agenten und sein Fahrzeug. Es ist aber anzunehmen, dass automatisierte Fahrzeug zwischen Familienmitgliedern oder kleineren Gruppen geteilt werden können und so zu mehr Leerkilometern führen können, allerdings wird dies hier aufgrund der Komplexität des Problems nicht berücksichtigt. Einerseits würde dies intelligente (und somit rechenzeitaufwändige) *scheduling*-Algorithmen voraussetzen, die repetitiv in der Simulation ausgeführt würden, andererseits würde dies in der Realität eine Anpassung bzw. Koordination der Pläne einzelner Gruppen- bzw. Familienmitglieder aufeinander implizieren. Eine Untersuchung zu diesem Thema würde sicherlich ein eigenes Projekt füllen, sodass dies im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt werden konnte. Siehe aber (Dubernet, 2017) für erste Ansätze zu diesem Thema.

Ebenfalls nicht berücksichtigt - wie bei den flottenbasierten automatisierten Fahrzeugen - ist der Platzbedarf der Fahrzeuge. Diese bleiben einfach am Ort stehen, an dem ein Agent abgesetzt wurde. In Anbetracht der Fragestellungen rund um Leerkilometer, die durch Parkplatzsuche bzw. Vermeidung des Parkvorgangs als Ganzes, entstehen, sollte der Fokus allfälliger Folgeprojekten auf dieses Thema gelegt werden.

Kapazitätseffekte

Für die Simulation von Kapazitätseffekten stehen in MATSim momentan zwei Ansätze zur Verfügung, die im Rahmen des Projekts verglichen wurden. Um die Wirkungsweise dieser Ansätze zu erklären, ist es zunächst wichtig die Netzwerksimulation in MATSim zu veranschaulichen. Diese ist *link*-basiert, d.h. die kleinsten räumlichen Einheiten sind Strassenabschnitte, die durch Knotenpunkte verbunden sind. Die Simulation der *links* erfolgt zeitschrittbasiert. Zu Beginn der Simulation hat ein *link* einen bestimmten "überschüssigen Fluss", z.B. 1200 Fahrzeuge pro Stunde. Sobald nun ein Fahrzeug auf den *link* auffahren will (d.h. es verlässt einen vorhergehenden *link*), wird dieser Wert um eine Einheit (= ein Fahrzeug) reduziert. In jeder Sekunde wird der *link* allerdings wieder erhöht, bei 1200 Fhz/h, sind dies also 0.3 Fhz/s die dazugewonnen werden, bis das Maximum wieder erreicht ist. Will ein Fahrzeug auf einen *link* auffahren, aber es ist nicht genügend "Fluss" verfügbar, muss es im vorhergehenden *link* warten. Dies geschieht ebenfalls, wenn die Raumkapazität des *links* erreicht ist, d.h. wenn bereits so viele Fahrzeuge auf dem *link* warten, sodass nicht mehr genug Platz für ein weiteres Fahrzeug ist.

Die Grundannahme ist nun, dass automatisierte Fahrzeuge die Infrastruktur effektiver nutzen. Dieser Effekt kann momentan in MATSim auf zwei Arten simuliert werden:

- Ansatz NC (*Network Capacity*): Es wird angenommen, dass die Präsenz automatisierter Fahrzeuge (in einer bestimmten Flottenstärke) die Gesamtkapazität des Netzwerks ändert. Entsprechend kann die Kapazität flächendeckend im Netzwerk um einen bestimmten Prozentsatz gesteigert werden. Dies entspricht einer eher makroskopischen Sicht auf die Kapazitätsgewinne.
- Ansatz VFE (*Vehicle Flow Efficiency*): Hier wird angenommen, dass automatisierte Fahrzeuge (oder verbundene Fahrzeuge etc.) aufgrund ihrer Technologie weniger Kapazität verbrauchen als konventionelle Fahrzeug. Wird der Fluss eines *links* also um 1 Fhz/h reduziert, wenn ein konventionelles Fahrzeug darüberfährt, wird der Fluss z.B. nur um 0.5 Fhz/h sobald ein automatisiertes Fahrzeug darüberfährt. Dies entspricht einer eher mikroskopischen Sicht auf die Kapazitätsgewinne, da diese massgeblich durch die Fahrzeuge selbst entstehen.

Die Vorgehensweise bei beiden Ansätzen wäre dabei unterschiedlich und hängt stark von der Literatur ab, auf die zurückgegriffen wird. Im ersten Fall könnte man auf Literatur zugreifen, die bestimmte Kapazitätseffekte im Netzwerk bei bestimmten Durchdringungsgraden berechnen. Man müsste dazu nur bestimmen, wie gross der Anteil automatisierter Fahrzeuge an der Fahrzeugflotte ist, und dann das gesamte Netzwerk mit dem korrespondierenden Wert aus der Literatur anpassen. Im zweiten Ansatz könnte man auf Literatur zurückgreifen, die die Effizienz der Fahrzeuge im Blick hat. Wenn

beispielsweise kürzere Reaktionszeiten für automatisierte Fahrzeuge angenommen werden, kann dies in eine Verbesserung der Flusseffizienz der Fahrzeuge übersetzt werden.

Im Limit von einer 100%igen Flottendurchdringung sollten dann beide Ansätze das gleiche Ergebnis liefern. Wenn alle Fahrzeuge automatisiert sind, muss eine Verdopplung der *"flow efficiency*" für diese Fahrzeuge den gleichen Effekt haben wie eine Verdopplung der Kapazitäten auf allen Netzwerk-*links*.

Für die Untersuchungen in diesem Projekt wurde die zweite Variante genutzt, da sie besser mit der aktuellen Literatur zum Thema vergleichbar ist. Um weiter die Vergleichbarkeit zu erhöhen, wurde die bisherige Funktionalität in MATSim so erweitert, dass individuelle *"flow efficiency factors*" für Kombinationen aus Fahrzeugen und *links* zum Einsatz kommen. So ist es nun beispielsweise möglich, Faktoren für unterschiedliche Strassentypen zu definieren. Während diese Funktionalität im vorliegenden Projekt nur genutzt wurde, um zwischen Strassen mit hohem Ausbaufaktor und niedrigem zu unterscheiden (siehe Kapitel 6.1.3), kann sie in Folgeprojekten genutzt werden um beliebig detaillierte Modelle aufzubauen und unterschiedliche Einflüsse auf das Verkehrssystem zu untersuchen.

Kostenrechner

Der Kostenrechner (siehe Kapitel 4) wurde direkt in die MATSim Simulationen integriert. Ziel dabei war es dabei, die Flottenkosten endogen aus der Simulation abzuleiten und so entsprechende Kilometerpreise zu berechnen, für die der Service angeboten werden kann.

Abb. 23 zeigt die Integration des Rechners in den MATSim Loop: Am Ende jeder MATSim Iteration werden die benötigten Flottenparameter gemessen, z.B. der Anteil an Leerkilometern, die Auslastung der Flotte, die Anzahl der Fahrzeuge. Mit diesen Daten werden die Inputdateien für den Kostenrechner vorbereitet, woraufhin das R-Script aus MATSim bzw. Java heraus aufgerufen wird. Anschliessend werden die Ausgaben des Kostenrechners wieder eingelesen, die dann den Preis pro Personenkilometer für die beobachtete Iteration enthalten. Um die Preisentwicklung möglichst stabil zu halten, wird dieser Preis nicht direkt für die Verkehrsmittelwahl der nächsten Iteration übernommen, sondern als gleitender Mittelwert (*moving average*) bestimmt, d.h. die vom Kostenrechner berechneten Preise der letzten, z.B. 10, Iterationen werden gemittelt.

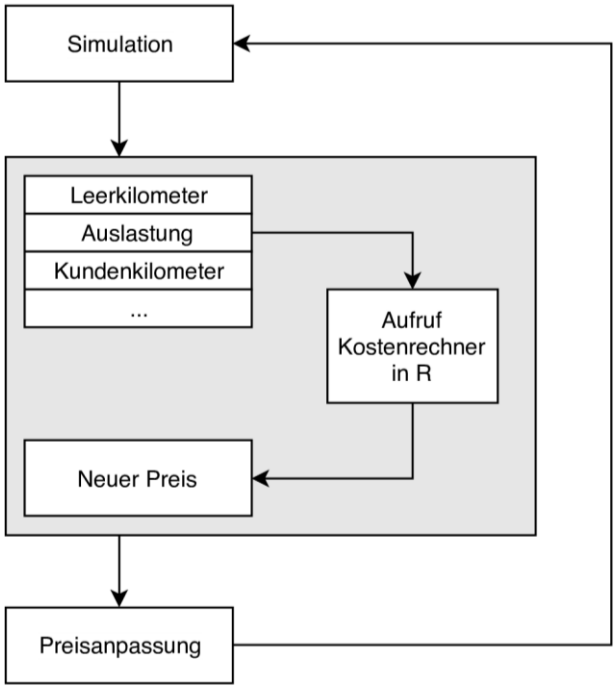


Abb. 23 *Schematische Darstellung der Integration des Kostenrechners in MATSim*

Abb. 24 (links) zeigt eine typische Simulation mit diesem Aufbau: Zunächst wird ein Startpreis von 0.4 CHF/km angenommen und in der Simulation wird eine zufällige Startnachfrage von 50% aller Reisen angenommen. Die Agenten reagieren somit auf einen Preis von 0.4 CHF/km und entscheiden sich für oder gegen den Service für ihre Reisen. Entsprechend der Nutzung der Flotte wird ein neuer Preis aus dem Kostenrechner ermittelt, dieser geht nun in die Berechnung ein (in diesem Fall 9x 0.4CHF/km und 1x der berechnete Preis). Ist die Flottengrösse genügend gross, sodass ein gewisser Level of Service gewährleistet werden kann, konvergieren dann im Laufe der Simulationen der in der Simulation genutzte Preis (aus dem *moving average*) und die momentanen Ergebnisse des Kostenrechners. Prinzipiell kann es bei diesem Aufbau zu Oszillationen des Preises kommen wenn die Sensitivität der Nachfrage auf den Preis sehr hoch ist, wie in ***Abb. 24*** (rechts) dargestellt. Grund dafür ist, dass zunächst viele Agenten die Taxis nutzen. Die Wartezeiten sind allerdings sehr hoch (da die Flotte sehr klein ist), was dazu führt, dass sich von Iteration zu Iteration immer mehr Agenten gegen den Service entscheiden. Dies führt dazu, dass der Preis für die restlichen Agenten steigt. Dieses Preisniveau macht weiterhin das Taxi für noch mehr Agenten unattraktiv. An einem bestimmten Punkt nutzen dann allerdings so wenige Agenten den Service, dass trotz des hohen Preises die extrem kurzen Wartezeiten sehr attraktiv sind. Dies führt dazu, dass nun wieder mehr Agenten das Verkehrsmittel nutzen. Der Preis fällt, allerdings steigen wieder die Wartezeiten und der Zyklus wiederholt sich. Dieses Verhalten wurde nur bei sehr kleinen Flottengrössen beobachtet, die für unsere Untersuchungen nicht interessant waren. Für alle Untersuchungsergebnisse (ab ca. 1000 Fahrzeugen) zeigt sich eine stabile Konvergenzdynamik, wie auf der linken Seite in ***Abb. 24*** dargestellt. Nichtsdestotrotz stellt dieses Phänomen aus systemtheoretischer Sicht eine interessante Beobachtung dar, die in Zukunft weiter untersucht werden sollte.

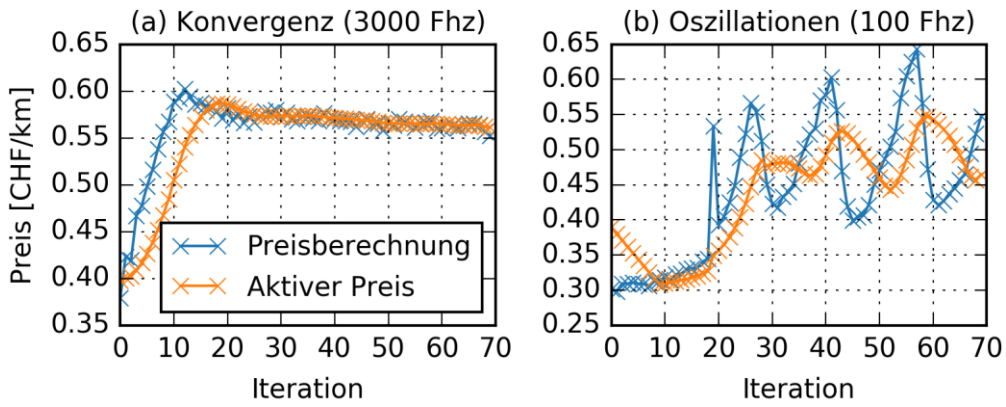


Abb. 24 *Stabiles und oszillatorisches Verhalten der Preisentwicklung in der Simulation*

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mit diesem Arbeitsschritt im Projekt erstmalig eine dynamische, adaptive Preisstruktur für ein Mobilitätsangebot erfolgreich in MATSim implementiert werden konnte.

Discrete Mode Choice

Die wahrscheinlich wichtigste Komponente im Projekt auf Seiten der Simulation ist die konsistente Widergabe der Verkehrsmittelwahl der Agenten. Bisher erfolgt dieser Prozess in MATSim auf sehr einfache Weise: Zu Beginn jeder Iteration wurden für einen zufällig ausgewählten Teil der Agentenpopulation die bisherigen gewählten Verkehrsmodi im Tagesplan durch neue ersetzt. Dieser Plan wurde dann in der darauffolgenden Iteration ausgeführt und ein Score wurde bestimmt, der angab wie gut ein Plan funktionierte. Gab es eine Verbesserung des Scores zur vorherigen Version des Planes hatte der neue Plan nun eine erhöhte Auswahlwahrscheinlichkeit. Die massgebenden Faktoren für die Bewertung eines Plans sind dabei verschiedene Faktoren, die z.B. die Reisezeit mit einem bestimmten Verkehrsmittel oder die Anzahl der Umstiege im ÖV in einer summenbasierten Nutzenfunktion zusammenfassen.

Die Praxis hat dabei gezeigt, dass MATSim Simulationen sehr schwierig zu kalibrieren sind. Hauptgrund hierfür ist die lange Laufzeit, die agenten-basierte Simulationen normalerweise haben. Für die Kalibration müssen die Parameter daher iterativ geändert werden und die Simulation muss wiederholt ausgeführt werden, um die korrekten Parameter zu ermitteln. Da jeder Simulationslauf viel Zeit kostet, ist dies eine sehr aufwendige Arbeit. Es ist zudem zu erwähnen, dass eine direkte Entsprechung zu den Parametern z.B. eines diskreten Verkehrsmittelwahlmodells nur bedingt existiert. Die Werte können als Startwerte für ein genauere Kalibration genutzt werden, bieten aber nur einen groben ersten Anhaltspunkt.

Der “klassische” Ansatz in MATSim hat zudem die grosse Schwäche, dass jedes Verkehrsmittel im Plan eines Agenten zunächst erst einmal in der Simulation getestet werden muss, bevor er eine Bewertung erhalten kann. Dies hat zur Folge, dass je nachdem wie viele Agenten dieses *replanning* durchführen (normalerweise werden ca. 5% gewählt), man einen ebenso grossen Anteil an Agenten hat, die potentiell sehr unrealistische Pläne durchführen. Denn auch die Variante den Arbeitsweg von 50km per Fuss zu gehen muss zunächst ausprobiert werden, um sie später durch eine schlechte Bewertung auszufiltern. Der Fakt, dass diese unsinnigen Pläne zunächst getestet werden müssen führt wiederum zu langen Laufzeiten.

Im Laufe des Projekts wurde daher ein komplett neuer Ansatz zur Verkehrsmittelwahl in MATSim entworfen, der direkt auf den Erkenntnissen zu diskreten Verkehrsmittelwahlmodellen aufbaut. ***Abb. 25*** zeigt den groben Aufbau.

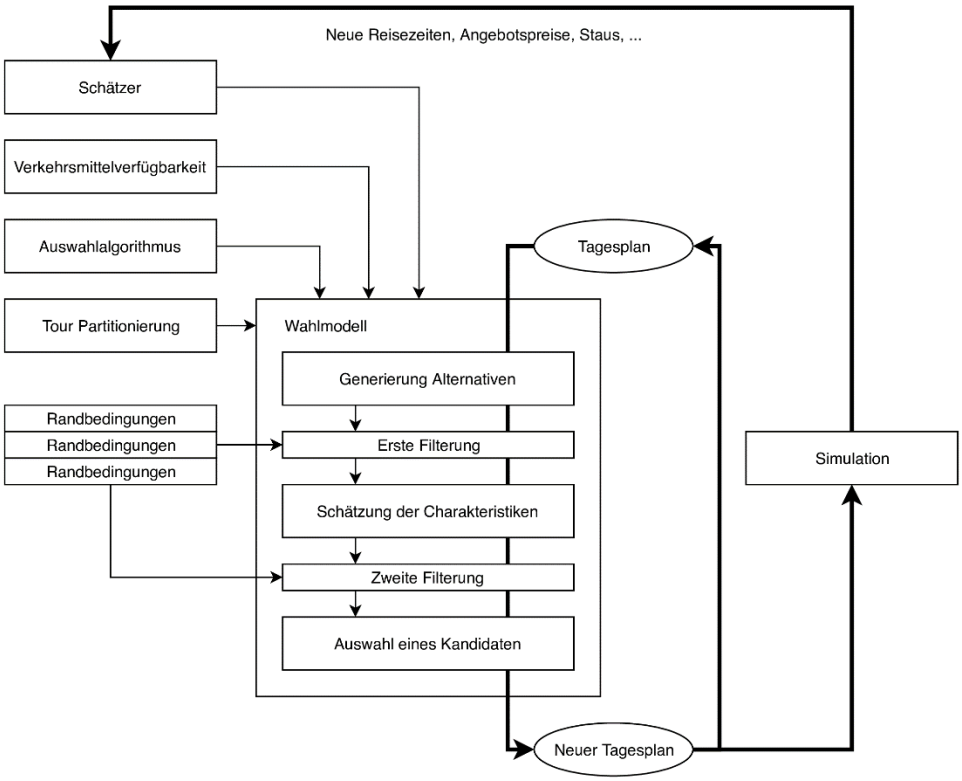


Abb. 25 *Schematische Darstellung der diskreten Verkehrsmittelwahl in MATSim*

Auf der rechten Seite sieht man den “Simulator”, in diesem Fall ist damit MATSim gemeint. Durch die Simulation der Agentenpopulation entstehen Reisezeiten im Netzwerk, ergeben sich Kosten für verschiedene Reisemöglichkeiten, usw. Während der Erneuerung der Agentenpläne wird dann ein Verkehrsmittelwahlmodell aufgerufen, das als Input einen aktuellen Tagesplan bekommt und einen neuen Tagesplan mit evtl. geänderten Verkehrsmitteln zurückgibt. Die Wahl der Verkehrsmittel für jede Reise im Tagesplan folgt dabei einem bestimmten Schema:

1. **Generierung der Alternativen:** In diesem Schritt werden alle möglichen Ketten an Verkehrsmitteln für einen Tagesplan entworfen. Gibt es also vier Verkehrsmittel (z.B. Auto, ÖV, Fahrrad, zu Fuss) und hat ein Tagesplan 3 Reisen, so ergeben sich 4^3 mögliche Ketten aus Verkehrsmitteln. Welche Verkehrsmittel einem Agenten überhaupt zur Verfügung stehen hängt dabei von bestimmten Attributen ab, etwa ob er eine Fahrerlaubnis hat oder ein Auto besitzt. Zudem spielen verschiedene Nebenbedingungen eine Rolle, beispielsweise, dass ein Auto oder Fahrrad nur für eine Reise genutzt werden kann, zu deren Startpunkt das Fahrzeug vorher bereits gebracht wurde. Ebenso müssen die Fahrzeuge eines Agenten zum Ende des Tages wieder an ihre ursprüngliche Position (gewöhnlich der Wohnort des Agenten) zurückgebracht werden. Die Verkehrsmittelverfügbarkeit, sowie die speziellen Bedingungen schliessen somit eine grosse Zahl an Ketten aus, sodass die tatsächliche Menge an erlaubten Varianten um einiges geringer ist als (Anzahl Verkehrsmittel) ^ (Anzahl Reisen).
2. **Bewertung der Alternativen:** Im zweiten Schritt werden die verbliebenen Ketten bewertet. Dafür müssen zunächst alle Reisecharakteristiken bestimmt werden. Für eine Reise mit dem Auto sind dies beispielsweise die Fahrtzeit und Fahrtdistanz (und davon abgeleitet die variablen Kosten), für eine Reise mit dem ÖV kommen dann noch die Anzahl der Umstiege oder die Wartezeit hinzu. Diese Charakteristiken werden daraufhin durch eine Nutzenfunktion bewertet, ähnlich wie es in MATSim standardmässig der Fall ist, allerdings ist die Nutzenfunktion beliebig anpassbar, sodass die Formulierung aus einem diskreten Verkehrsmittelwahlmodell direkt abgebildet werden kann. Die Teilnutzen der

einzelnen Reisen eines Tagesplans bzw. einer Kette an Verkehrsmitteln werden dann aufsummiert, was den Gesamtnutzen eines Tagesplans ergibt.

3. **Auswahl einer Alternative:** Schliesslich wird eine der vorhandenen alternativen Ketten anhand ihrer Bewertung ausgewählt. Im Projekt wird dafür ein Sampling nach einer kategoriellen Verteilung durchgeführt. In Gänze entspricht der Prozess somit einem Multinomial Logit Modell über verschiedene Tagespläne. Andere Ansätze wären allerdings denkbar und sind bereits implementiert, beispielsweise die Auswahl des bestbewerteten Plans, was einem *best response* Modell entspräche.

Zwar hat das Modell somit keine eindeutige Entsprechung zum entwickelten diskreten Verkehrsmittelwahlmodell, da dieses auf Reiseebene und nicht auf Tagesebene formuliert ist, allerdings konnte durch eine minimale Kalibration der verkehrsmittelspezifischen Konstanten ein sehr gutes Kalibrationsergebnis erzielt werden (siehe Kapitel 6.1.2). Weiterhin konnte eine erhebliche Beschleunigung des Simulationsprozesses erreicht werden, da in diesem Ansatz nur sinnvolle Alternativen ausgeführt werden.

Der neue Ansatz birgt allerdings auch einige Risiken. So hat der klassische MATSim Ansatz den Vorteil, dass die Pläne nach der Ausführung automatisch konsistent mit dem aktuellen Verkehrsgeschehen sind. In der neuen Variante spielt hingegen die Abschätzung der Reisezeiten, Kosten, etc. eine zentrale Rolle. Wenn für diese Werte falsche Annahmen getroffen werden, werden falsche Entscheidungen für die Agenten simuliert. Selbst im Gleichgewichtszustand nach vielen Iterationen, wenn keine Änderungen in der Verkehrsmittelwahl mehr beobachtbar sind, kann durch eine falsche Schätzung ein statischer Bias entstehen. Es ist daher in diesem Ansatz unerlässlich zu zeigen, dass der Bias zwischen geschätzten Reisezeiten und den danach tatsächlich realisierten Reisezeiten möglichst klein ist, bzw. dass die Schätzung möglichst gut ist.

Abb. 26 zeigt hierfür ein Beispiel: Auf der linken Seite werden die ersten 100 Iterationen einer Simulation mit dem in Kapitel 6.1.2 vorgestellten Grundszenario betrachtet. Dargestellt ist in jeder Iteration der relative Fehler zwischen den vorhergesagten Reisezeiten aller Agenten, die nach dem Verkehrsmittelwahlmodell das Auto nutzen, und den Reisezeiten die dann in der folgenden Netzwerksimulation tatsächlich beobachteten Reisezeiten. Es ist klar erkennbar, dass der Fehler bereits nach einer Iteration relativ klein ist und sich nach nur 20 Iterationen auf einem sehr geringen Level stabilisiert. Im Schnitt werden die Reisezeiten als um nur ca., -2.5% falsch vorhergesagt, der Median Fehler liegt sogar bei 0%. Auf der rechten Seite in ***Abb. 26*** sieht man die Verteilung der Fehler in Iteration 100. Klar zu sehen ist, wie die Mehrzahl der Reisen korrekt geschätzt wurde, während es einen grösseren *tail* auf der linken Seite gibt, wo also Reisezeiten als zu kurz vorhergesagt wurden.

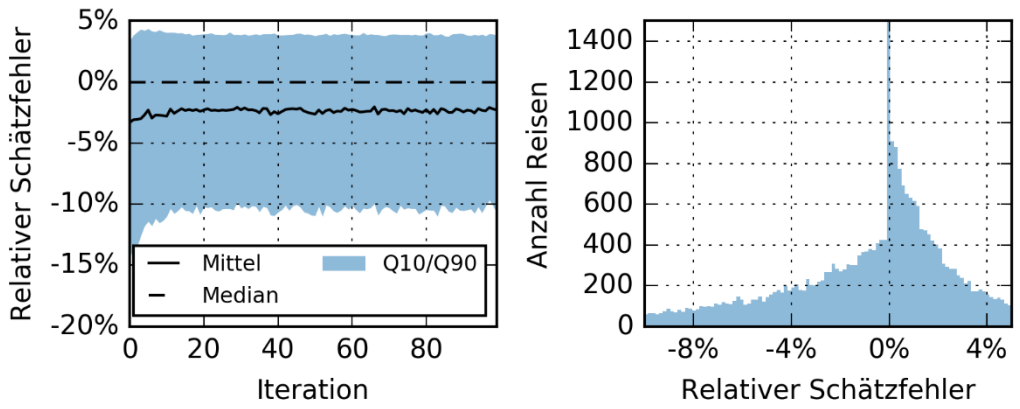


Abb. 26 *Darstellung der Fehlerdynamik der diskreten Verkehrsmittelwahl in MATSim*

Im Laufe des Projekts konnten wir somit zeigen, dass der Ansatz sinnvolle und konsistente Ergebnisse erzeugt und dabei sogar die Simulation beträchtlich beschleunigt. Der Ansatz wurde erstmals beim ABMTRANS Workshop 2018 vorgestellt, bei dem der zugehörige

Aufsatz den “Best Paper Award” erhalten hat, eine detailliertere Analyse wurde zudem für das *98th Annual Meeting of the Transport Research Board 2019* eingereicht:

> Hörl, S., M. Balac, K.W. Axhausen (2018) A first look at bridging discrete choice modeling and agent-based microsimulation in MATSim, *Procedia Computer Science*, **130**, 900-907.
>
> Hörl, S., M. Balac, K.W. Axhausen (2019) Pairing discrete mode choice models and agent-based transport simulation with MATSim, submitted for the 98th Annual Meeting of the Transport Research Board 2019

Für die vorliegenden Simulationen automatisierter Fahrzeuge konnten zudem methodische Vorteile gewonnen werden: Zum einen erlaubte die flexible und hochkonfigurierbare Struktur dieses Ansatzes die Integration des Kostenrechners wie zuvor beschrieben, sowie die direkte Implementierung der Verkehrsmittelwahlparameter aus dem vorhergehenden Teil des Projekts. Dies wäre so direkt mit den Standardmöglichkeiten in MATSim nicht möglich gewesen.

Der Ansatz trägt zudem auch zur Konsistenz der Ergebnisse bei. Bisher wurden “Vorher-Nachher-Studien” mit MATSim so durchgeführt, dass zunächst auf einen Grundzustand kalibriert wurde und danach auf einen geänderten Zustand. Im vorliegenden Projekt hätte dies bedeutet, dass die resultierenden Verkehrsmittelanteile aus den Befragungen dazu genutzt worden wären, MATSim erneut zu kalibrieren, sodass die beobachteten Anteile erreicht werden. Zwar wären Analysen der entstandenen Leerkilometer, etc. möglich gewesen, jedoch unter dem Gesichtspunkt exogen vorgegebener Verkehrsmittelanteile. Vor allem beim Kostenrechner hätte sich somit ein Preis ergeben, der eben nur auf diese statische Attraktivität des Verkehrsmittels reagiert.

Durch die Implementierung des Verkehrsmittelwahlmodells in MATSim wird das Verhalten jedoch nun konsistent für beide Zustände simuliert: Das gleiche Verhaltensmodell wird im Grundzustand angewendet (wo es die heutigen Referenzwerte korrekt widergibt), als auch im Zukunftszustand, mit dem einzigen Unterschied, dass in diesem die neuen Verkehrsmodi vorhanden sind. Den Ergebnissen aus diesem Ansatz ist nach Meinung der Autoren daher deutlich mehr Vertrauen zu schenken als der “traditionellen” Variante.

Berechnung der induzierten Reisen

Ein wichtiger Teil des Projekts war die makroskopische Abschätzung des induzierten Verkehrs nach (Weis und Axhausen, 2009; Weis und Axhausen, 2013). Neben einer Vorgängerstudie des Instituts für Verkehrsplanung und Transportsysteme (Meyer *et al.*, 2017) ist die vorliegende Arbeit nach Wissen der Autoren einer der ersten Anwendungstests dieses SVI Leitfadens.

Das Hauptprinzip des Leitfadens ist die Nutzung einer Regression, die die relativen Änderungen der Erreichbarkeiten in einem Verkehrssystem, verursacht durch systemische Massnahmen, mit den zu erwartenden induzierten Reisen ins Verhältnis setzt. Die Erreichbarkeit ist dabei definiert wie folgt:

Formel 1: Berechnung der Erreichbarkeit

$$A_i = \ln\left[\sum_{j=1}^{n} X_j \cdot f(c_{ij})\right]$$

- Als Zonierung dienen die Gemeindegrenzen (wie im Leitfaden)
- Als Basiswert X_i dient die Anzahl der Einwohner in Zone i (wie im Leitfaden)
- Als Kostenfunktion wird $f(c) = \exp(-0.2 \cdot c)$ genutzt (wie im Leitfaden)
- Als Kosten von Zone i nach j wird hier die kürzeste Reisezeit mit dem PKW, privatem AV oder Taxi-AV genutzt

Der Leitfaden erörtert leider nicht im Detail, wie ein Mix aus verschiedenen Verkehrsmodi gehandhabt werden soll, sodass hier die Entscheidung für das Minimum aus den Reisezeiten der motorisierten Verkehrsmittel getroffen wurde. Für die Berechnung der Reisezeit wird dabei eine Route vom Mittelpunkt der Startzone zum Mittelpunkt der Zielzone um 8 Uhr morgens berechnet. Für das Taxi-AV werden entsprechend die gemessenen Wartezeiten zu diesem Zeitpunkt in die Berechnung mit einbezogen.

Entsprechend Formel 1 können nun die Erreichbarkeiten im Grundzustand A_i^G berechnet werden, sowie A_i^S in den Zukunftsszenarien, die relative Änderung $\delta = {A_i^S}/{A_i^G} - 1$ muss dann mit einem speziellen Elastizitätsfaktor skaliert werden um beispielsweise die erwartete Änderung in der Anzahl Reisen aus einer Zone oder der erwarteten Änderung der Fahrleistung aus der Zone zu berechnen. Entsprechend kann dann für das Untersuchungsgebiet eine makroskopische Gesamtänderung berechnet werden.

Der Leitfaden schlägt zudem vor, den Vorgang iterativ anzuwenden: Während also im ersten Schritt eine gewisse Anzahl erzeugt werden könnte, führt die Einführung neuer Reisen in die Simulation zu einer Abschwächung des Effekts, da nun die rückkoppelnde Wirkung der Massnahme auf das Verkehrssystem berücksichtigt wird. Da dies ein langwieriger Prozess mit MATSim wäre, wird in dieser Studie nur der erste Iterationsschritt durchgeführt. Dies resultiert in einer *worst case* Abschätzung des induzierten Verkehrs.

ÖV Routing

Während des Projekts wurde mehrfach die Art und Weise gewechselt, wie Reisen mit dem öffentlichen Verkehr geroutet werden. Ursprünglich wurde die Standard-Implementierung von MATSim genutzt, welche auf einem Dijkstra-Algorithmus beruht, der auf einem komplexen Netzwerk ausgeführt wird, welches aus dem Fahrplan generiert wird. Während dieser Ansatz bisher für MATSim Simulation zielführend war, war die Performance für dieses Projekt zu langsam.

Aus diesem Grund wurde daher eine Erweiterung für MATSim geschrieben, welche den R5 Router von Conveyal[14] nutzt. Dies ist ein generisches Softwarepaket, welches den RAPTOR Algorithmus (Delling *et al.*, 2015) für Java implementiert und als Open Source Paket bereitstellt. Die Nutzung des RAPTOR-Algorithmus macht es erst möglich, dass der Verkehrsmittelwahlansatz wie oben beschrieben durchgeführt werden kann, da für jeden Agenten alle Reisen möglichst schnell für die ÖV-Alternative geroutet werden muss.

Parallel zu dieser Entwicklung arbeitete eine Gruppe bei der SBB an einer eigenen Implementierung des RAPTOR-Algorithmus welche eng mit MATSim verbunden ist. Seit dieses Paket[15] zur Verfügung steht, nutzt das vorliegende Projekt dieses Paket. Gegenüber der Implementierung von Conveyal wurden noch einmal starke Performancezuwächse verzeichnet (mindestens ca. 20x schneller, je nach Route). Zudem starten Simulationen beträchtlich schneller, da der “SwissRailRaptor” direkt mit den MATSim-eigenen Datenstrukturen der ÖV Fahrpläne interagiert.

6.2 Dispatching Algorithmen

Die Komponenten, die im vorliegenden Projekt entwickelt wurden, konnten bereits in einem frühen Stadium für eine Teilstudie mit statischer Nachfrage genutzt werden. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Dynamische Systeme der ETH Zürich wurden verschiedene Dispatching Algorithmen für automatisierte Taxiflotten untersucht. Da die entsprechenden Ergebnisse relevant für die Interpretation der folgenden

[14] https://github.com/conveyal/r5

[15] https://github.com/SchweizerischeBundesbahnen/matsim-sbb-extensions

Simulationsergebnisse sind, soll hier kurz ein Überblick dazu gegeben werden. Der originale Aufsatz befindet sich momentan im Review für Transportation Research: Part C:

> Hörl, S., R. Ruch, F. Becker, E. Frazzoli, K.W. Axhausen (2018) Fleet control algorithms for automated mobility: A simulation assessment for Zurich, Under Review for Transportation Research: Part C.

Wie in Kapitel 6.1.3 erwähnt stellt die Komponente zur Simulation der Taxi-AVs eine sehr flexible Programmierinfrastruktur zur Verfügung, mit der verschiedene Ansätze der Flottensteuerung getestet werden können. In einer Studie wurden daher vier verschiedene Algorithmen getestet:

- Die **Load-Balancing Heuristic (LH)** ist der in (Maciejewski und Bischoff, 2015) beschriebene Ansatz: Abhängig von der Verfügbarkeit der Fahrzeuge werden diese entweder zum nächstmöglichen Kunden geschickt, sobald sie frei werden, oder es wird das nächstmögliche Fahrzeug für einen Kunden gesucht, sobald dieser eine Anfrage stellt und genügend Fahrzeuge zur Verfügung stehen. Den Algorithmus zeichnet die besondere Schnelligkeit aus, die für Simulationen, wie sie in der vorliegenden Arbeit untersucht werden (d.h. Inklusive dynamischer Nachfrage) unerlässlich ist.
- Der **Global Eucledian Bipartite Matching Algorithmus (GBM)** wird alle 10 Sekunden in der Simulation aufgerufen und stellt alle verfügbaren Fahrzeuge, sowie alle vorhandenen Anfragen gegenüber. Es wird eine Zuordnung zwischen Fahrzeugen und Kunden hergestellt, die die Fahrtdistanz minimiert.
- Die **Feedforward Fluidic Optimal Rebalancing Policy (FF)**, erstmals vorgestellt von Pavone *et al.* (2017) löst in regelmässigen Abständen ein lineares Programm:

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & \sum_{i,j} T_{i,j}\alpha_{ij} \\ \text{subject to} \quad & \sum_{i\neq j} \alpha_{ij} - \alpha_{ji} = -\lambda_i + \sum_{i\neq j} \lambda_j p_{ji} && \forall i \in V \\ & \alpha_{ij} \geq 0 && \forall i,j \in V \end{aligned}$$

  Dessen Aufgabe ist es die *rebalancing flows* a_{ij} zu bestimmen, welche angeben, wie viele Fahrzeuge aus einer Zone i in eine Zone j verschoben werden sollen. Die erste Bedingung stellt dabei sicher dass die Netto Anzahl Fahrzeuge in einer Zone (linke Seite) der Ankunftsrate an Kunden (λ) und der durch bereits in den Fahrzeug befindlichen Personen (rechte Seite) ausbalanciert sind. Im Gegensatz zu den zwei ersten Ansätzen werden hier also Fahrzeuge im Netzwerk verschoben, um auf zukünftige Nachfrage zu reagieren. Die Ankunftsraten (Lambda) sind dabei a priori bekannt, der Dispatcher besitzt somit nahezu perfektes Wissen über die Nachfrage.
- Eine erweiterte Variante davon ist die **Adaptive Uniform Rebalancing Policy (AU)**, welche ähnlich funktioniert:

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & \sum_{i,j} T_{i,j} a_{ij} \\ \text{subject to} \quad & \sum_{i\neq j} a_{ij} - a_{ji} = -u - m_i + n_{available,i} + n_{arriving,i} && \forall i \in V \\ & a_{ij} \in \mathbb{N}^+ && \forall i,j \in V \end{aligned}$$

  Hier bezeichnet m_i die Anzahl der Kunden in Zone i, sowie $n_{available}$ und $n_{arriving}$ die verfügbaren bzw. ankommenden Fahrzeuge in dieser Zone. Die Variable u steht für die durchschnittliche Anzahl an Fahrzeugen in allen Zonen, d.h. Wenn in jeder Zone *u* Fahrzeuge stationiert sind, sind die Fahrzeuge uniform über das Gebiet verteilt. Gibt es also keine Nachfrage ($m_i = 0$), so hat man im Gleichgewichtszustand $n_{available} - u = 0$ und somit keine Bewegung der

Fahrzeuge. Der Dispatcher versucht also ständig alle Fahrzeuge uniform über das Gebiet zu verteilen.

Die vier Dispatcher wurden auf dem beschriebenen Grundszenario getestet, unter Anwesenheit automatisierter Taxis. Anders als im vorliegenden Projekt wurde allerdings noch keine dynamische Nachfrage genutzt. Das heisst, es wurde zu Beginn der Simulation statisch festgelegt, welche Reisen welcher Agenten mit dem Taxi-AV durchzuführen sind. Dabei wurde die Nachfrage so gewählt, dass jede motorisierte Reise (PKW und ÖV) durch das Taxi ersetzt wird, wenn die Reise im Stadtgebiet Zürichs liegt (siehe ***Abb. 27***) und dadurch keine Kette von Reisen mit einem Fahrzeug unterbrochen wird (d.h. Agenten, die von ausserhalb in das Gebiet hineinfahren, nutzen innerhalb nur ein AV, falls sie trotzdem die Möglichkeit haben, mit ihrem Auto das Gebiet wieder zu verlassen).

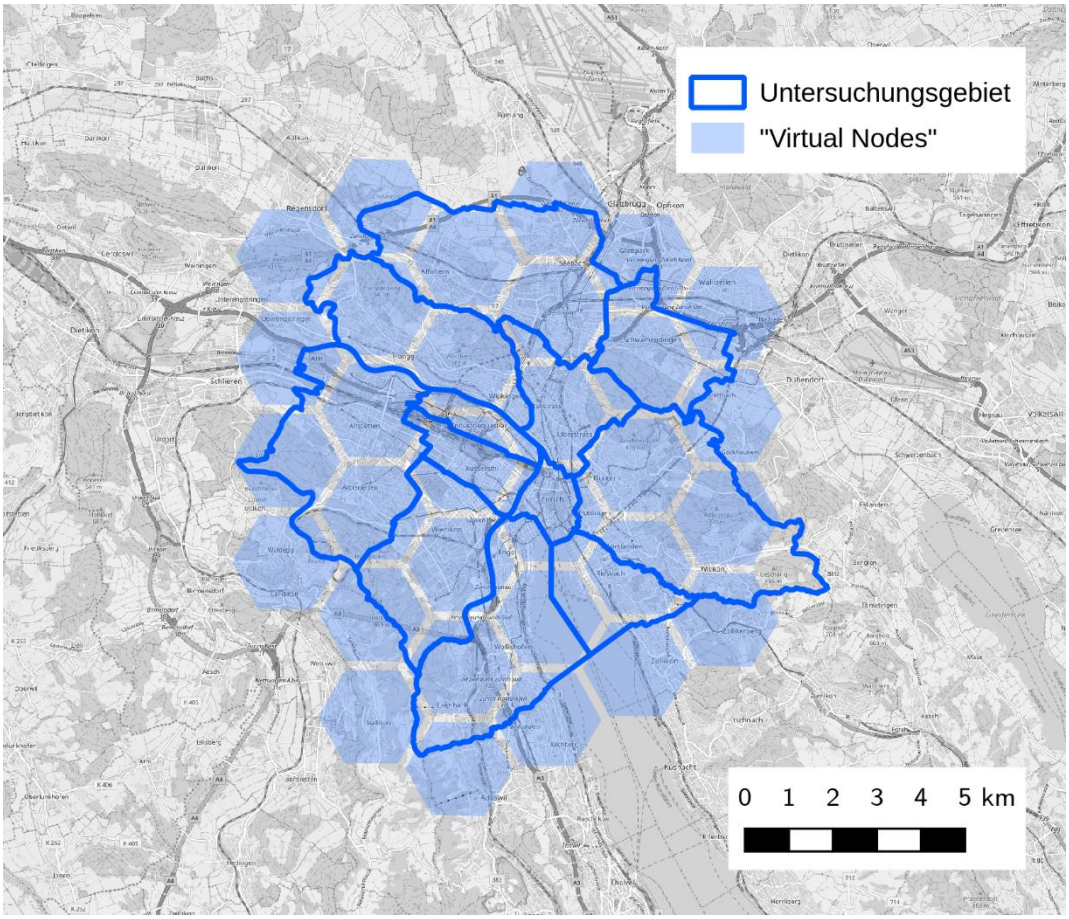


Abb. 27 *Untersuchungsgebiet für die Dispatching-Studie und die zugehörigen „virtual nodes“ für das Rebalancing.*

Die Hauptergebnisse der Studie waren wie folgt. ***Abb. 28*** zeigt die Wartezeiten, die mit verschiedenen Flottengrössen erzeugt wurden. Es ist gut zu sehen, dass in diesem statischen maximalen Nachfragefall der Bedarf mit ca. 8’000 bis 10’000 Taxis gedeckt werden kann, wenn zur morgendlichen Stosszeit keine durchschnittlichen Wartezeiten von mehr als fünf Minuten erreicht werden sollen. Es ist auch gut zu sehen, wie die unterschiedlichen Algorithmen die fünf Minuten Linie bei unterschiedlichen Flottengrössen schneiden. Am besten schneidet der FF Algorithmus ab, da er genaues Wissen über die vorhandene Nachfrage hat.

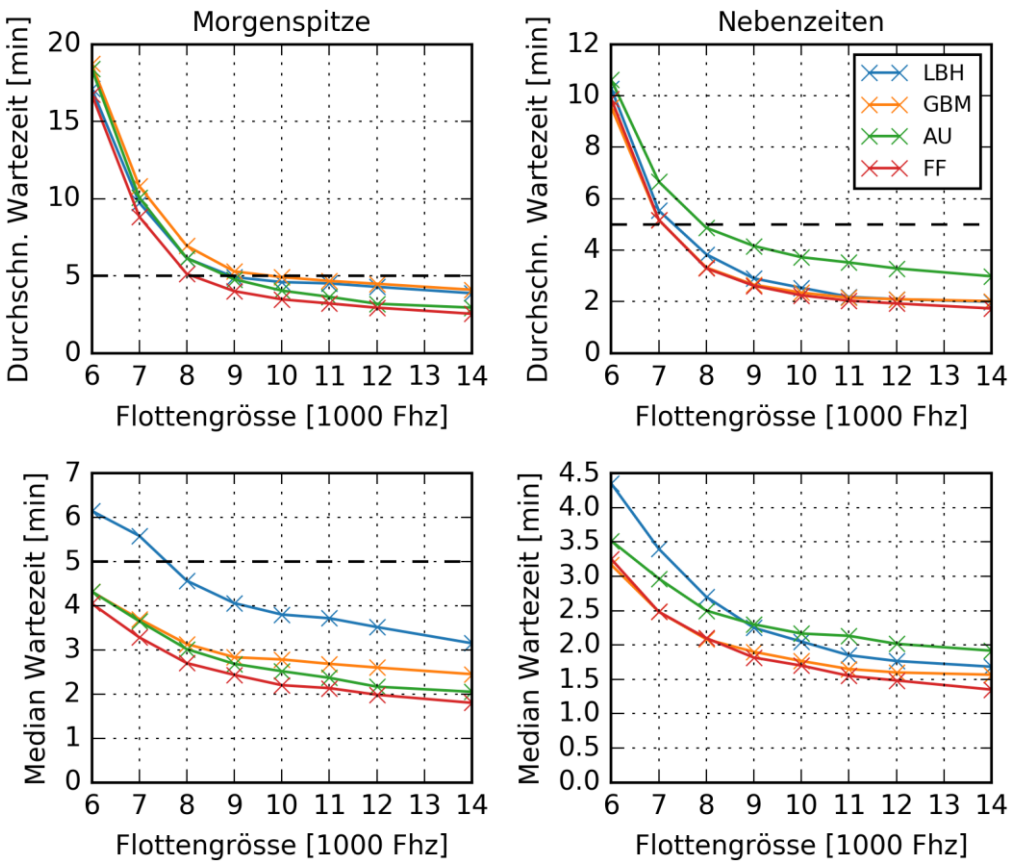


Abb. 28 *Generierte Wartezeiten der verschiedenen Dispatching-Algorithmen*

Weiterhin wurde der Kostenrechner genutzt, um die Preise zu errechnen, die die Kunden bei den jeweiligen Flottengrössen zu zahlen hätten (***Abb. 29***). Wie erwartet steigt der Preis mit grösseren Flotten und erreicht einen Wert von 70Rp/km (heutige Vollkosten eines Privatfahrzeugs, siehe TCS (2016)) erst bei über 14'000 Taxis. Wie bei den Wartezeiten sieht der Unterschied zwischen den Algorithmen hier jedoch auch zuerst klein aus. Kombiniert man nun Wartezeiten und Kosten und trägt die Kurven für die Algorithmen auf (***Abb. 29***, rechte Seite), sieht man die Paretofronten der Algorithmen. Man kann sehen, dass der FF Algorithmus durchweg die besten Kombinationen aus Wartezeit und Preis erzeugt und dass sich in diesem Vergleich eine klare Rangordnung der Algorithmen bestimmen lässt. Zwei weitere Dinge fallen auf: Erstens können alle vier Algorithmen in einer "nachhaltigen" Zone operieren, in der die Wartezeiten unter fünf Minuten und die Preise unter den Vollkosten eines PKW von heute liegen, zweitens lässt sich mit allen untersuchten Flottengrössen kaum ein Preis von unter 50 Rp/km erreichen. Verglichen mit den variablen Kosten für ein Privatfahrzeug des TCS von ca. 26 Rp/km ist solches Angebot immer noch doppelt so teuer.

Aus der Teilstudie lassen sich daher zwei grundlegende Erkenntnisse ziehen: Für kurzzeitige Entscheidungen steht ein automatisierter Taxiservice nicht in Konkurrenz zu einem privaten Auto, auf lange Sicht gesehen würde es jedoch günstiger werden. Dazu muss jedoch angemerkt werden, dass diese Simulationen einem idealen Fall darstellen, in dem wirklich jede mögliche Reise mit dem Taxi durchgeführt werden muss und der Anbieter somit eine grösstmögliche Nachfrage erhält.

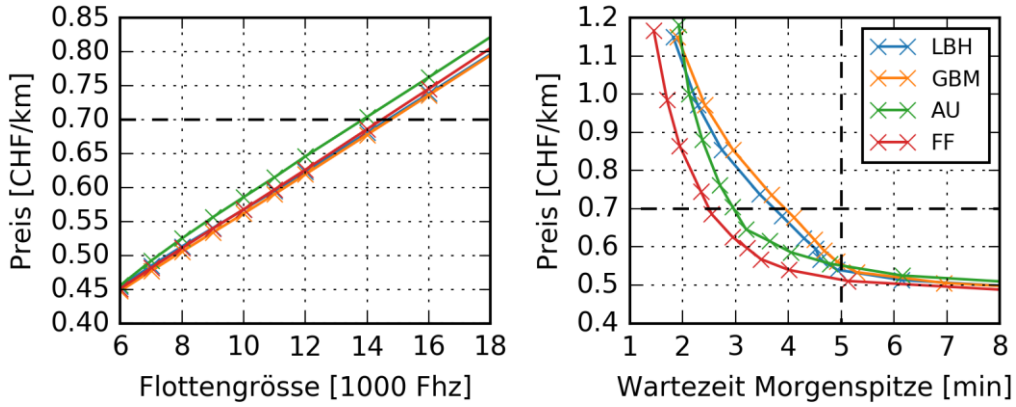


Abb. 29 *Kostenbetrachtung der verschiedenen Dispatching-Algorithmen*

Neben Wartezeiten und Kosten wurden auch die Flottennutzung und die Leerkilometer untersucht, wie in ***Abb. 30*** zu sehen ist. Vergleichen mit der durchschnittlichen Flottennutzung von ca. 1.32h pro Tag in der Schweiz (Bösch *et al.*, 2018) liegen alle Szenarien der Flottengrössen deutlich über dem Wert, d.h. der vorhandene Fuhrpark wird deutlich effizienter genutzt. Bei den Leerkilometer sieht man gut, dass der GBM seine Aufgabe tatsächlich umsetzt: die Minimierung der Fahrtdistanz. Vergleich man die Ergebnisse jedoch mit ***Abb. 29***, sieht man, dass dies auf Kosten des Preises bzw. der Wartezeit geschieht.

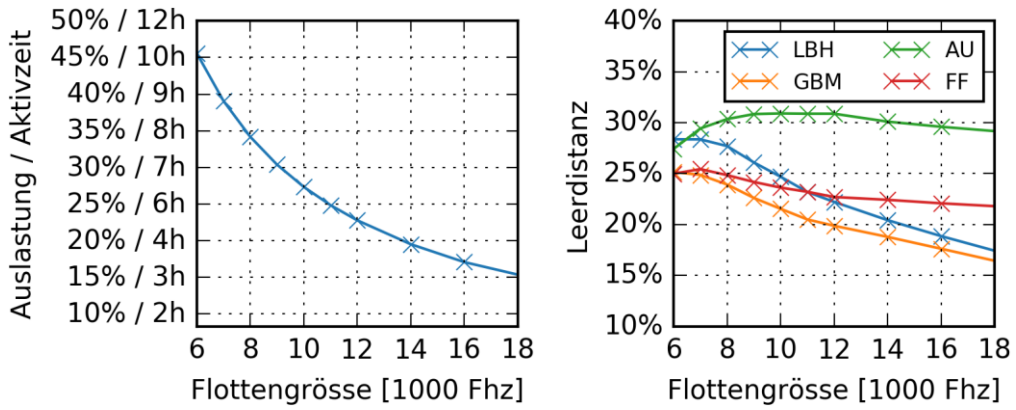


Abb. 30 *Auslastung und Leerkilometer der Dispatching-Algorithmen*

Für die Hauptstudie hatten diese Teiluntersuchungen eine Reihe von Konsequenzen: Erstens gab es erste Abschätzungen bei welchen Flottengrössen auch die Simulationen mit dynamischer Nachfrage durchgeführt werden sollten, zweitens wurde klar, dass die intelligenteren Algorithmen (d.h. alle, die über die einfache Heuristik hinausgingen) noch nicht die Rechengeschwindigkeiten haben, die für eine dynamische Nachfragesimulation notwendig sind. Aus diesem Grund wurde in dieser Studie ausschliesslich die Heuristik verwendet. Aus den Teilergebnissen (***Abb. 29***) ist jedoch ersichtlich, dass die Heuristik zwar nicht den "*worst case*" darstellt, die in unseren Simulationen abgebildeten Betreiber aber durch die Nutzung intelligenter Algorithmen noch um einiges geringere Preise bzw. Wartezeiten anbieten könnten. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen, ebenso dass sich die Forschung zu den Flottenalgorithmen noch im Anfangsstadium befindet und selbst die vorgestellten Algorithmen in der Zukunft noch einmal übertroffen werden könnten.

6.3 Szenarien

Für die Simulation der Verkehrsszenarien standen durch die Simulationskomponenten eine Reihe von Parametern zur Verfügung, mit denen Zukunftsszenarien konstruiert werden konnten. Die möglichen Parameter sind in ***Tab. 24*** aufgelistet. Eine Simulation aller möglichen Kombination war aufgrund der Rechenanforderungen (ca. 24h pro Simulation) unmöglich, sodass eine Reihe an interessanten Kombinationen ausgewählt werden musste.

Tab. 24 *Übersicht der Szenarioparameter*

Parameter	Werte	Beschreibung
Preisanpassung ÖV	als Faktor (hier x0.5)	Passt den Preis für den innerstädtischen lokalen ÖV an
Flow Efficiency		
Innerstädtisch	als Faktor	Bestimmt wie viel weniger Kapazität AVs in der Stadt verbrauchen
Ausserstädtisch	als Faktor	Bestimmt wie viel weniger Kapazität AVs ausserhalb der Stadt verbrauchen
Taxi-AV		
Taxi-AV erlaubt?	Ja / Nein	Definiert ob Taxi-AVs von den Agenten genutzt werden können
Basispreis	in CHF	Basistarif pro Reise mit dem Taxi-AV
Flottengrösse	in Fahrzeugen	Definiert wie gross die Flotte ist und bestimmt somit Massgeblich das Szenario
Private AVs		
Private AVs erlaubt?	Ja / Nein	Definiert ob private automatisierte Fahrzeuge von den Agenten genutzt werden können
Verfügbarkeit	Nach Person / Nach Haushalt	Bestimmt ob nur die Personen ein privates AV nutzen können, die vorher Zugang zu einem Auto hatten, oder alle Haushaltsmitglieder von Haushalten, die ein Auto besitzen

Es werden zwei Untersuchungsgebiete unterschieden. Das erste ist das "Gesamtgebiet", welches einen Bereich von 30km Radius um den Bürkliplatz in Zürich umfasst. Das zweite Gebiet ist das "Stadtgebiet", welches sich auf die 12 Kreise der Stadt Zürich bezieht. Somit ermöglich das erste eine generelle Analyse der Verkehrsänderungen um die Stadt Zürich herum, während das zweite einen detaillierten Blick in die Veränderungen der Reisedistanzen oder Verkehrsmittelwahl im städtischen Gebiet bietet.

6.3.1 Bewertungskriterien

Um die erwähnten Szenarien in Relation setzen zu können mussten zudem Vergleichsdimensionen definiert werden. Für die Auswertungen wurden aus systemischer Sicht betrachtet:

- Der **Verkehrsmittelanteil** nach gefahrener Distanz gibt an, wie viele ein Verkehrsmittel genutzt wird. Beispielsweise lässt sich daran erkennen, ob ein bestimmter Service mit automatisierten Fahrzeugen vor allem Einfluss auf den Individualverkehr oder den öffentlichen Verkehr hat.
- Die **Fahrleistung aller strassengebundener Fahrzeuge** ist eine der wichtigsten Grössen in der Verkehrsplanung. Durch Kennzahlen wie der Kosten durch Unfälle pro Kilometer oder der Kosten von Emissionen pro gefahrenem Kilometer, dient sie als guter Proxy für die Belastung der Gesellschaft durch das Verkehrssystem.
- Davon spielen die **Leerkilometer der automatisierten Fahrzeuge** eine wichtige Rolle: Ein solches Element gibt es im bisherigen Verkehrssystem nicht. Zwar gibt es Leerfahrten im öffentlichen Verkehr, allerdings nur örtlich und zeitlich beschränkt auf einer Route, und mit dem Ziel weitere Nachfrage entlang der Route

zu decken. Für automatisierte Fahrzeuge, speziell im Falle des Privatbesitzes, ist es jedoch wichtiger diese zu analysieren, da sie erwartungsgemäss bedeutend mehr sind und somit bessere Rechtfertigungen bieten müssen.

- Die **Anzahl der Fahrzeuge** die im Laufe des Tages im dem Analysegebiet interagieren gibt Aufschluss darüber welche Masse an Fahrzeugen die Verkehrsinfrastruktur täglich bewältigen muss. Ausgeschlossen aus dieser Statistik sind die Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs, da hierzu im Projekt keine Daten vorlagen (die Fahrpläne sind bekannt und die Anzahl der Fahrten pro Linie und Route, allerdings nicht, mit wie vielen verschiedenen Fahrzeugen diese bedient werden).
- Die **Personenkilometer** des **öffentlichen Verkehrs** geben an, wie profitabel das öffentliche Verkehrssystem noch ist. Ein starker Abfall der Personenkilometer kann dabei mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Preissteigerung bzw. Schliessung von Linien und somit einer Verringerung des Angebotslevels zur Folge haben.

Zudem werden verschiedene Dimensionen aus der Nutzersicht beleuchtet:

- Auf der einen Seite werden die kumulativen **Gesamtkosten** der Nutzer Systems betrachtet, d.h. wie viel investieren die Agenten in Mobilität im Untersuchungsgebiet pro Tag. Auf der anderen Seite wird gezeigt, wie sich die durchschnittlichen und **Median Kosten** pro Tag verändern.
- In ähnlicher Weise wird untersucht, wie sich die **Gesamtreisezeit** im Gebiet verhält, als auch wie sich die durchschnittliche bzw. **Median Reisezeit** der Agenten ändert.

Zuletzt werden die Kennwerte zur makroskopischen Untersuchung des induzierten Verkehrs nach Weis betrachtet: es werden aus den Steigerungen der Erreichbarkeiten die erwartete Gesamtsteigerung der gefahrenen Kilometer berechnet, als auch die Zunahme der Reisen.

6.3.2 Automatisierter öffentlicher Verkehr

Das erste Hauptszenario kommt ohne die Simulation neuer Fahrzeuge an sich aus. Zunächst sollte, neben dem Grundszenario, ein weiteres Vergleichsszenario geschaffen werden, wenn nur der Einfluss der Automatisierung auf den öffentlichen Verkehr berücksichtigt wird. Entsprechend des Resultaten des Kostenrechners (Kapitel 4) wurde angenommen, dass der öffentliche Nahverkehr ca. den halben Preis von heute hat. In der Simulation wurde dazu die Annahme getroffen, dass der Distanzanteil aller Reisen, die mit der Tram bzw. dem Bus durchgeführt werden, nur zum halben Preis abgerechnet wird. Für solch ein Szenario ist im späteren Vergleich zudem eine weitere Interpretation möglich: Nimmt man an, dass der ÖV heute in der Schweiz zu ca. 50% subventioniert wird, stellt ein solches verbilligtes Szenario den Fall dar, in dem dies weiter so gehandhabt wird, während das Grundszenario auch den Fall abbildet, in dem sich die Kosten halbieren, aber die Subventionen gestrichen sind.

6.3.3 Automatisierte Taxiflotte

Für die Analyse der Effekte automatisierter Fahrzeuge auf das Verkehrssystem sind zwei unterschiedliche Anwendungsformen von Belang: Die Nutzung der automatisierten Fahrzeuge als Taxis (wie oft in der Literatur vorhergesagt) oder die private Nutzung einzelner Fahrzeuge.

Das Szenario zu der Taxiflotte beschäftigt sich dabei mit automatisierten Fahrzeugen, die nur für Reisen innerhalb des Stadtgebiets von Zürich genutzt werden können. Entsprechend der Literatur wurden Kapazitätsannahmen gewählt: Für extra-urbane Strassen, bzw. Strassen mit hohem Ausbaustandard (hoher Kapazität) wurde entsprechend der Literatur (Kapitel 3.2) eine Steigerung der "*flow efficiency*" (Kapitel 6.1.3) von +80% gewählt, während für alle anderen Strassen eine Steigerung von +40% gewählt wurde. ***Abb. 31*** zeigt das Strassennetz der Simulation mit den entsprechend eingefärbten Strassenabschnitten.

Einer der wichtigsten Parameter, der in einem Szenario einer automatisierten Taxiflotte interessiert, ist dabei die Flottengrösse selbst. Mit dem innovativen Simulationsaufbau, der in dieser Studie gewählt wurde, hat sie grossen Einfluss auf das Verhalten der Agenten. Ist die Anzahl der Fahrzeuge zu klein wird das Angebot unattraktiv, weil die Wartezeiten ansteigen, ist die Anzahl der Fahrzeuge auf der anderen Seite zu gross, führt es auch zu weniger Kunden, da die Preise steigen. Dementsprechend ist es in diesem Szenario interessant die “optimale” Flottengrösse zu finden, bei der das Angebot die meisten Nutzer anzieht. Der erste Teil der Analyse wird daher eine Flottenauslegung (*fleet sizing*) sein, welches diesen Wert bestimmt.

Weiterhin ist Teil der Untersuchung, wie die Wahl eines Basispreises pro Fahrt das Verhalten der Population beeinflusst. Auf der einen Seite wird ein Szenario ohne Basispreis simuliert (was dem Kostenrechner entspricht), auf der anderen Seite werden verschiedene Werte getestet. Dies ist wichtig, da ein Angebot ohne Basispreis auch für sehr kurze Reisen attraktiv wird, was unrealistisch erscheint. Der Kilometerpreis des Kostenrechners ist dabei nur eine rechnerische Grösse. In der Realität würde man immer einen Basispreis erwarten. Dem wird mit der entsprechenden Analyse Rechnung getragen.

Als Vergleichsobjekt zwischen den verschiedenen Szenarien wird dabei das Unterszenario mit dem realistischsten Basispreis und der Flottengrösse mit der maximalen Nutzung gewählt. Zudem soll untersucht werden, welchen Einfluss die Vergünstigung des öffentlichen Verkehres (siehe entsprechendes Szenario) auf eine Flotte automatisierter Taxis hat.

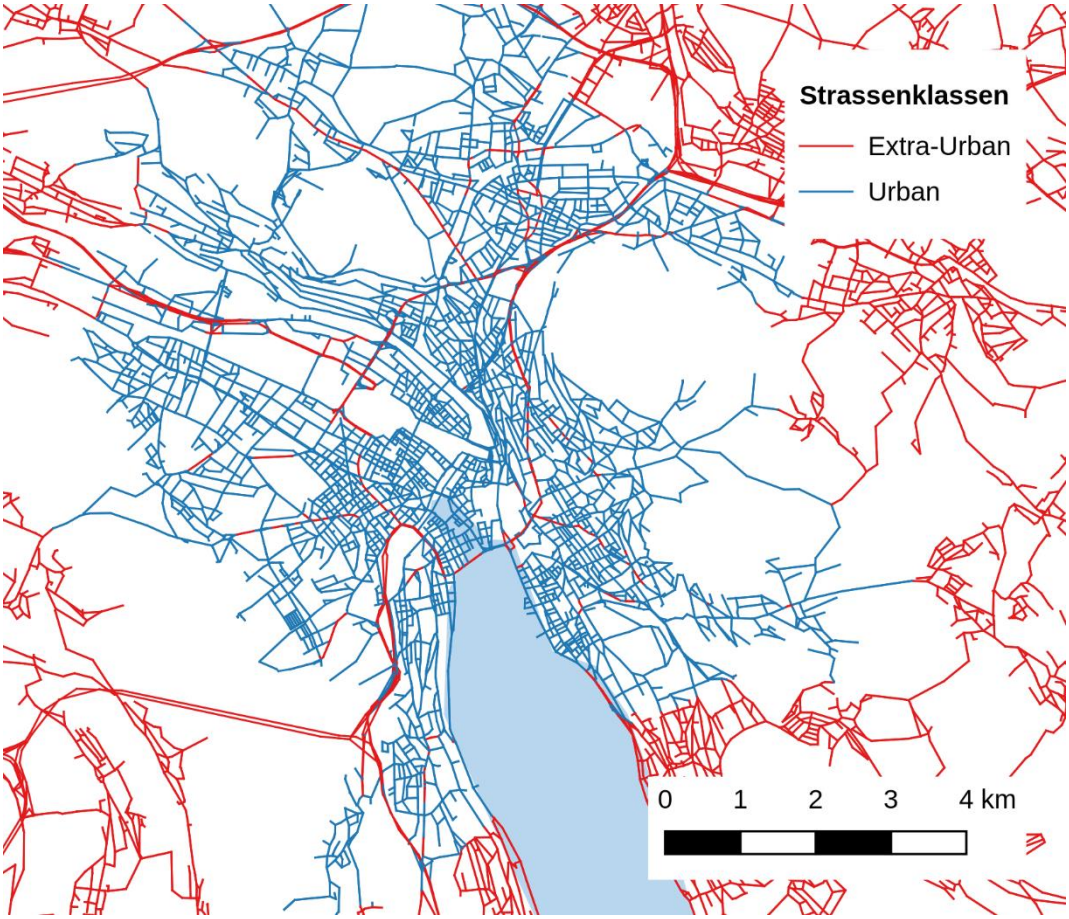


Abb. 31 *Kategorisierung der Strassentypen für automatisierte Fahrzeuge*

6.3.4 Private automatisierte Fahrzeuge

Für den Vergleich zu privaten automatisierten Fahrzeugen wurde eine extra-urban Kapazitätssteigerung von +80% gewählt, da diese entsprechend der Literatur am wahrscheinlichsten erscheint.

Die Nutzung der privaten automatisierten Fahrzeuge erfolgt ausschliesslich von Personen, die vorher bereits Zugang zu einem Privatfahrzeug hatten. Eine Erweiterung des Nutzerkreises scheint sinnvoll (z.B. auf Schüler), jedoch wäre es ein ganzes Forschungsprojekt in sich eine sinnvolle Absprache und Koordination der Tagespläne innerhalb von Haushalten oder Nutzergruppen zu erreichen. Um zumindest einen Einblick in die Attraktivität der privaten AVs für z.B. Schüler zu gewinnen, werden allerdings Szenarien gerechnet, bei denen jedes Haushaltsmitglied das automatisierte Fahrzeug wählen kann. Praktisch bedeutet dies jedoch, dass dem Haushalt dann mehr Fahrzeuge zur Verfügung stehen als vorher (eines pro Nutzer). Die Resultate zu Mehrdistanzen sind daher in diesem Fall verzerrt.

6.3.5 Verkehrsmittelwahlmodell

Um die Nutzerpräferenzen abzubilden wird in den folgenden Simulationen mit automatisierten Fahrzeugen das Modell des Grundszenarios (siehe Kapitel 6.1.2) verwendet, wobei zwei weitere Verkehrsmodi hinzugefügt werden (bzw. ist dies eher so zu verstehen, dass sie im Grundszenario schlicht nicht berücksichtigt wurden).

Neben den Nutzenfunktionen des Grundszenarios (siehe Kapitel 6.1.2, S. 111) gibt es zwei zusätzliche Verkehrsmittel:

$$u_{sav}(\chi) = \alpha_{sav} + \beta_{travelTime,sav} \cdot \chi_{travelTime,sav} + \beta_{waitingTime,sav} \cdot \chi_{waitingTime,sav} + \beta_{cost} \cdot \left(\frac{\chi_{crowflyDistance}}{\theta_{averageDistance}}\right)^{\lambda} \cdot \chi_{cost,sav}$$

$$u_{prav}(\chi) = \alpha_{car} + \beta_{travelTime,sav} \cdot \chi_{travelTime,sav} + \beta_{travelTime,walk} \cdot \theta_{accessEgressWalkTime} + \beta_{cost} \cdot \left(\frac{\chi_{crowflyDistance}}{\theta_{averageDistance}}\right)^{\lambda} \cdot \chi_{cost,car}$$

Tab. 25 *Zusätzliche Modellparameter für AVs*

Taxi-AV (sav)	α_{sav}	0.162	
	$\beta_{travelTime,sav}$	-0.0527	[min^{-1}]
	$\beta_{waitingTime,sav}$	-0.0802	[min^{-1}]
Privates AV	abgeleitet		

Die Werte für beide Verkehrsmodi sind in ***Tab. 25*** zusammengefasst. Es soll noch einmalhervorgehoben werden, dass diese Parameter des Wahlmodells für die Simulationen nicht 1:1 denen der detaillierten Verkehrsmittelwahlmodelle entsprechen. Da manche Einflussfaktoren zu komplex sind, um sie sinnvoll in der Simulation abzubilden, wurden diese entfernt, bzw. vereinfacht. Zudem ist hervorzuheben, dass die Simulationen vor Fertigstellung der detaillierten Modelle zur Nutzung der privaten AVs durchgeführt wurden. So wurde insbesondere die VOT für das Taxi-AV auf das private AV übertragen, was eine Überschätzung der Attraktivität der privaten Fahrzeuge darstellen kann. Die Diskrepanz zwischen den VOTs wurde allerdings im Befragungsteil bereits diskutiert.

Neben der Reisezeit spielt hier für das Taxi-AV die Wartezeit eine massgebende Rolle. Die Preise für dieses Verkehrsmittel berechnen sich aus $c_{Basispreis} + p \cdot \chi_{Passagierdistanz}$, wobei $c_{Basispreis}$ den Basispreis für eine Fahrt darstellt und p den aus dem Kostenrechner berechneten Preis, wie in Kapitel 4 beschrieben, prinzipiell werden die Anbieter also hier mit Profit simuliert, der sich aus der Zahlung des Basispreises ergibt. Spätere Iterationen des Simulations-Frameworks sollten eine realistischere Umlegung der Basispreise in Erwägung ziehen.

Während die Taxi-AVs explizit mit den erhobenen Daten aus den Umfragen ermittelt wurden, mussten für das private automatisierte Fahrzeug zu Beginn der Simulationen Annahmen getroffen werden. Dabei wird die verkehrsmittelspezifische Kontante auf die des konventionellen Fahrzeugs gesetzt, sowie, entsprechend den Ergebnissen des Kostenrechners, der Kilometerpreis auf den des konventionellen Fahrzeugs eingestellt. Es ist jedoch zu beachten, dass sich hier die zugrundeliegende Distanz aus der tatsächlich mit dem Besitzer gefahrenen Strecke und der involvierten Leerdistanz zusammensetzt. Ein grosser Vorteil gegenüber dem konventionellen Auto ist, dass die Kalibrationskonstante für die Parkplatzsuche wegfällt, da angenommen wird, dass das Fahrzeug immer entsprechend der Aktivtäten der Reisenden gerufen werden kann.

6.4 Simulation und Auswertung

Im Folgenden sollen nun die Simulationsergebnisse für die jeweiligen Szenarien ausgewertet werden. Zunächst wird dabei auf das *fleet sizing* für das Taxi-Szenario eingegangen und die Sensitivitätsanalyse zu den Kapazitätseffekten privater automatisierter Fahrzeuge wird beleuchtet. Schliesslich werden die Werte der Vergleichsszenarien dargestellt und erörtert.

6.4.1 Flottenauslegung

Im Vordergrund der Untersuchung zu AVs als Taxi steht daher zunächst die Abschätzung einer geeigneten Flottengrösse für Zürich (unter den genannten Voraussetzungen), sowie der resultierenden Effekte im Verkehrssystem.

Im ersten Schritt wurde daher ein *fleet sizing* unternommen. Dabei wurden Simulationen, in denen der Anbieter unterschiedliche Flottengrössen bereitstellt und unter verschiedenen Rahmenbedingungen durchgeführt. Diese Rahmenbedingungen sind einerseits ob es einen vergünstigten ÖV gibt und wie hoch der Basistarif des Taxi-Services ist. Dieser Basistarif ist im ursprünglichen Kostenrechner (Kapitel 4) nicht enthalten und stellt somit einen zusätzlichen Gewinn für den Anbieter dar. Es ist jedoch unerlässlich einen solchen Mindestpreis einzuführen, da das Verkehrsmittel sonst sehr attraktiv, auch für sehr kurze Wege, würde. Der Fall “Basispreis 0 CHF” stellt diesen Fall dar und kann somit im Vergleich zu anderen Fällen betrachtet werden.

Abb. 32 stellt die Flottenauslegung grafisch dar. Interessant für den Flottenbetreiber ist die Teilgrafik oben links. Sie stellt den Verkehrsmittelanteil des AV-Services an unternommenen Reisen dar. Es ist gut zu sehen, wie die Kunden auf die Angebote reagieren: In jedem dargestellten Fall gibt es ein Maximum der Nachfragekurven. Auf der linken Seite (kleinere Flottengrösse) geht die Nachfrage zurück, weil die Wartezeiten für ein Taxi aufgrund eines Mangels an Fahrzeugen höher werden (auch zu sehen im Plot unten links). Auf der rechten Seite (grössere Flottengrösse) geht die Nachfrage zurück, weil die Preise zu hoch werden (siehe oben rechts).

Schaut man sich die unterschiedlichen Basispreise an, so sieht man, dass ein tiefer Basispreis sehr viele Reisen anzieht. Erhöht sich der Basispreis wird die Nachfragekurve reduziert, d.h. es verschiebt sich einerseits das Nachfragemaximum zu kleineren Flottengrössen während es zudem bei einem kleineren Verkehrsmittelanteil liegt. Für einen Basispreis von 3 CHF (welcher hier als der realistischste angenommen wird) lässt sich sogar erkennen, dass ab einer bestimmten Flottengrösse und dem entsprechenden Preis überhaupt keine Nachfrage mehr entsteht. Der Vergleich mit dem Szenario mit einem vergünstigten ÖV zeigt, dass der Unterschied nicht sehr gross ist, d.h. ein um die Hälfte verbilligter öffentlicher Stadtverkehr hat nur einen marginalen Einfluss auf die Nutzung einer AV-Taxiflotte. In beiden Fällen (mit und ohne Preisanpassung) liegt die Flottengrösse mit maximaler Nachfrage bei ca. 3000 Fahrzeugen mit einem Basispreis von 3 CHF. Dieses Szenario soll in den folgenden Analysen als Referenzfall für eine AV-Taxiflotte genutzt werden, da die Annahmen den Autoren am sinnvollsten erscheinen.

Weiterhin ist bei der Flottenauslegung ein Blick auf die Leerkilometer interessant (***Abb. 32***, rechts unten). Es ist erkennbar, dass das Maximum der Leerkilometer gemeinhin bei einer Flottengrösse kleiner als bei maximaler Nachfrage zu finden ist.

Als fünfte Vergleichsgrösse wurde die Flottenauslastung betrachtet, d.h. wie viele Stunden pro Tag ist ein Fahrzeug in Gebrauch. Es lässt sich klar sehen, dass über die gesamte Bandbreite an sinnvollen Flottengrössen die Auslastung deutlich über der typischen Auslastung der Privatfahrzeuge von 1.32h (Bösch *et al.*, 2018) in der Schweiz liegt.

Zuletzt kann man einen Blick auf den “Sharing-Faktor” werfen. Dieser gibt das Verhältnis zwischen Nutzern der Flotte an, also allen Personen die mindestens einmal die Flotte pro Tag nutzen, und den vorhandenen Fahrzeugen. Für eine Flottengrösse von 3000 Fahrzeugen wird jedes Fahrzeug also beispielsweise von rund 20 Personen genutzt, wenn ein Basispreis von 3 CHF angenommen wird. Bei den anderen Basispreisen ist dieser Wert entsprechend höher.

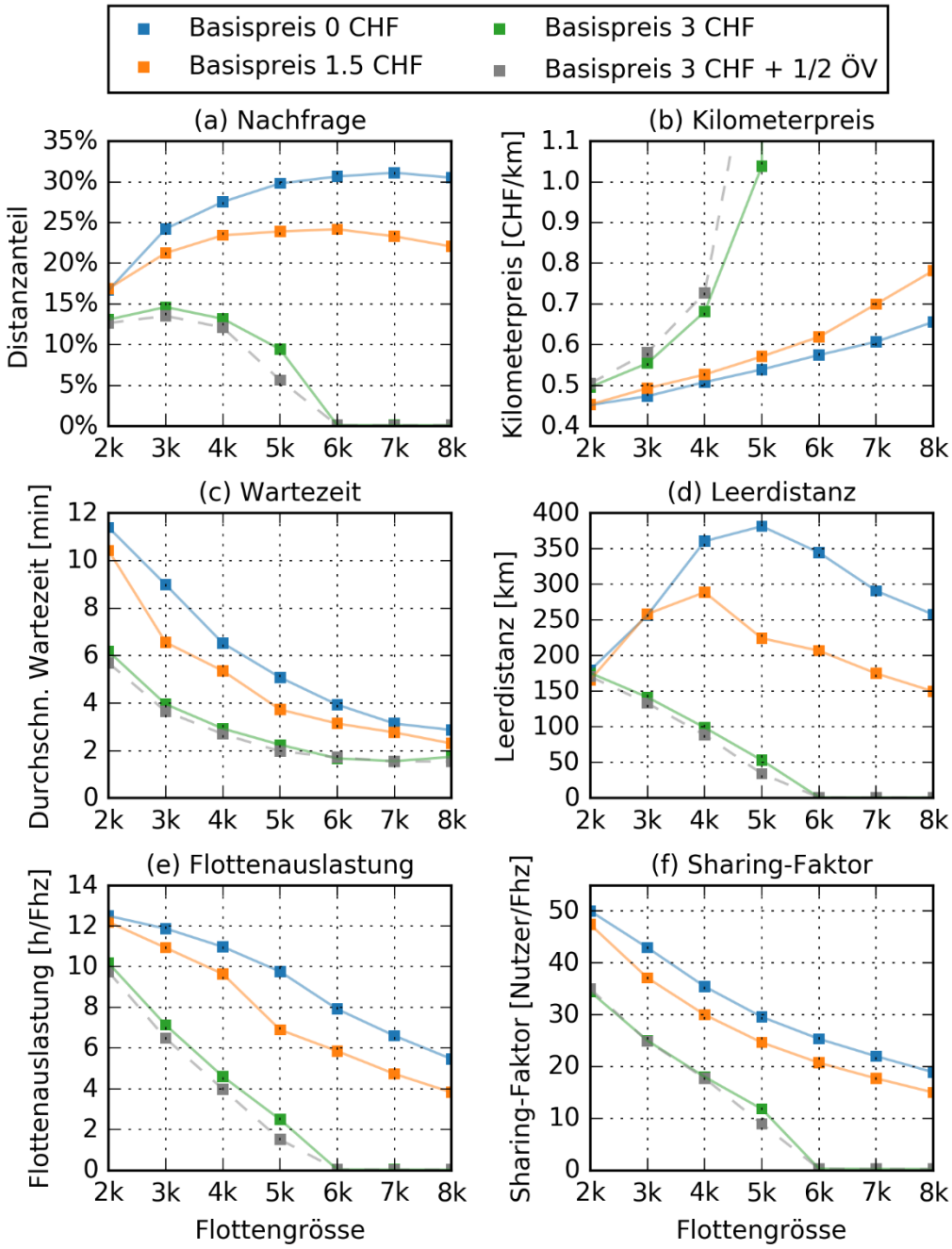


Abb. 32 *Ergebnisse der Flottendimensionierung. Dargestellt sind jeweils einzelne Läufe, Ensemble-Runs mit Darstellung der Standardabweichungen hätten zu einem zu hohen Rechenaufwand geführt. Die klare Ausformung der Graphen über verschiedene Flottengrössen hinweg zeigt jedoch, dass sich die jeweiligen Fälle quantitativ unterscheiden.*

6.4.2 Stadtgebiet

Die verschiedenen Untersuchungsszenarien können nun für das Stadtgebiet verglichen werden (ein Vergleich für das Gesamtgebiet, d.h. inklusive des Zürcher Umlands, erfolgt im nächsten Kapitel). Während die Vergleichseigenschaften hier grafisch dargestellt werden, ist in Anhang II eine tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse zu finden.

Systemperspektive

Zunächst können die Verkehrsmittelanteile analysiert werden (***Abb. 33***). Die Stadt Zürich zeigt bereits im Grundzustand einen hohen Anteil an öffentlichem Verkehr. Sollte nun der Preis für diesen um die Hälfte fallen zeigt die Simulation, dass der Anteil um fast 10% steigen würde und somit dominant gegenüber dem Individualverkehr wäre. Wie bereits erörtert, erlaubt dieses Ergebnis zwei Interpretationen: Sollten die Preise für den ÖV um 50% fallen, aber die Subventionen für den ÖV entfallen, wäre man wieder im Grundzustand, während eine 50% Preisreduktion mit Beibehaltung der Subventionen den Verkehrsmittelanteil des ÖV bedeutend steigern würde.

Für den Fall des automatisierten Taxis ergeben sich zwei Situationen: Auf der einen Seite würde eine Preisreduktion des ÖVs den Verkehrsmittelanteil trotz der Präsenz der Taxis im Vergleich zu heute erhöhen, auf der anderen Seite würde er sinken, wenn die Preise gleichblieben. Der Anteil an der Reisedistanz mit dem automatisierten Taxi würde in beiden Fällen rund 15% betragen, die grössten Verluste ergeben sich allerdings im Individualverkehr. Betrachtet man die automatisierten Taxis auch als Angebot des öffentlichen Verkehrs, beispielsweise, weil sie von einem ÖV Unternehmen unterhalten werden, so kann man hier von einem “A/ÖV” Anteil von über 60% ausgehen. Wahrscheinlich ist eine noch grössere Reduktion der Fahrten im Individualverkehr durch eine Flotte im Stadtgebiet nicht möglich, da viele der Fahrten durch den Durchgangsverkehr oder “Grenzverkehr” in die Stadt verursacht werden.

Schaut man sich die Szenarien der privaten automatisierten Fahrzeuge an, ändert sich das Bild: Durch den Komfort und die Flexibilität, die die automatisierten Fahrzeuge bieten, wird der ÖV zu grossen Teilen ersetzt, auch eine Preisreduktion kann nur schwer etwas dagegen aussetzen.

Ist es nun nicht nur den bisherigen Fahrzeugnutzern gestattet, ein automatisiertes Fahrzeug zu wählen, sondern allen Familienmitgliedern, ergibt sich die Situation oben in ***Abb. 33***. Der ÖV-Anteil sinkt noch einmal beträchtlich, was z.B. daran liegt, dass nun Kinder das private AV nutzen können. Es muss allerdings nochmals wiederholt werden, dass dies nur ein Anhaltspunkt für die Nachfrage ist. Jede Person im Haushalt bekommt hier in der Simulation ein Fahrzeug, d.h. Effekte die z.B. durch die Koordinierung entstehen (und viele Kombinationen von Reisen verbieten würden) sind nicht berücksichtigt. Dennoch ist der Wert ein Anhaltspunkt wie viel Nachfrage im Idealfall entstehen könnte.

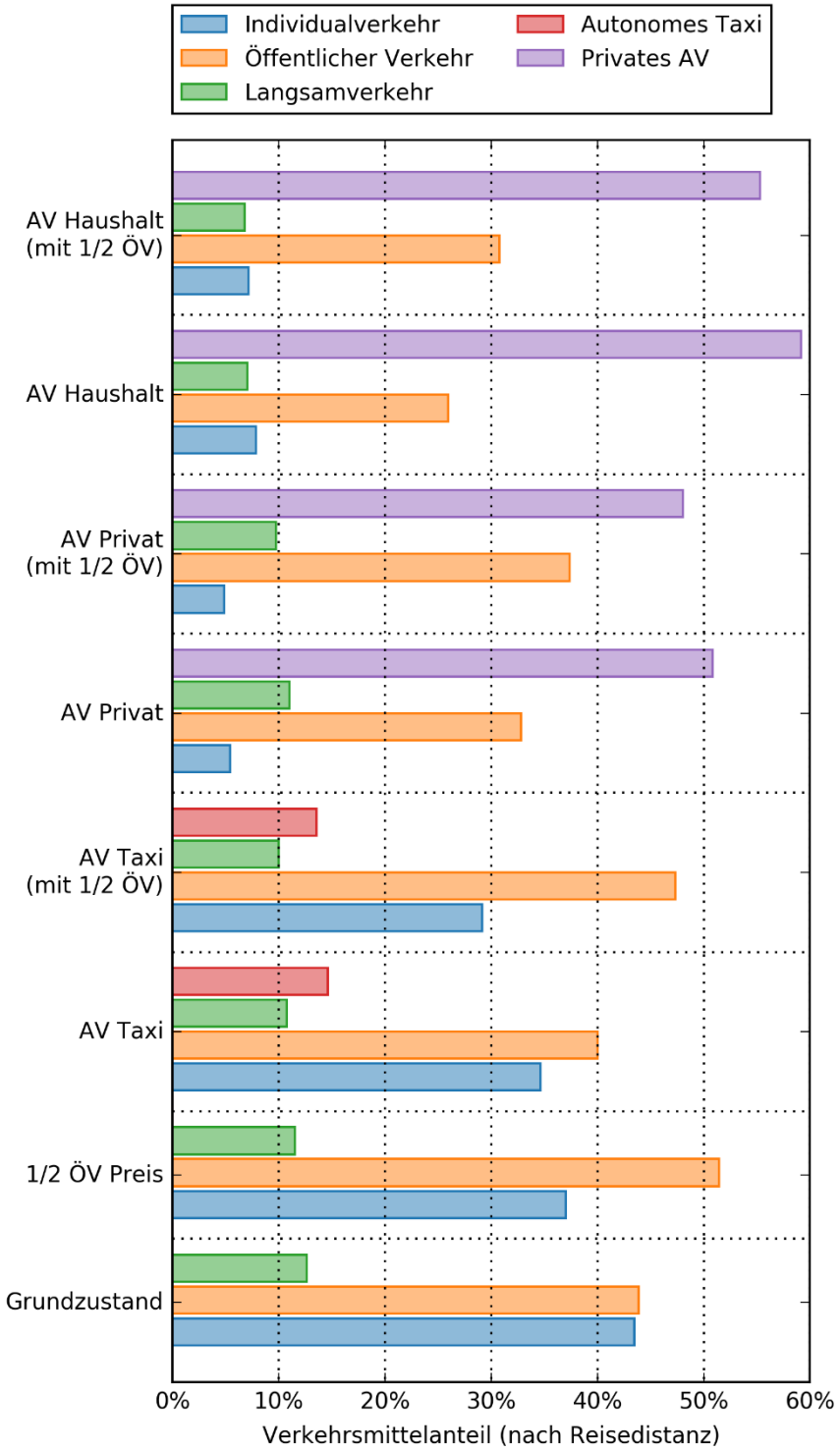


Abb. 33 *Verkehrsmittelwahl im Stadtgebiet*

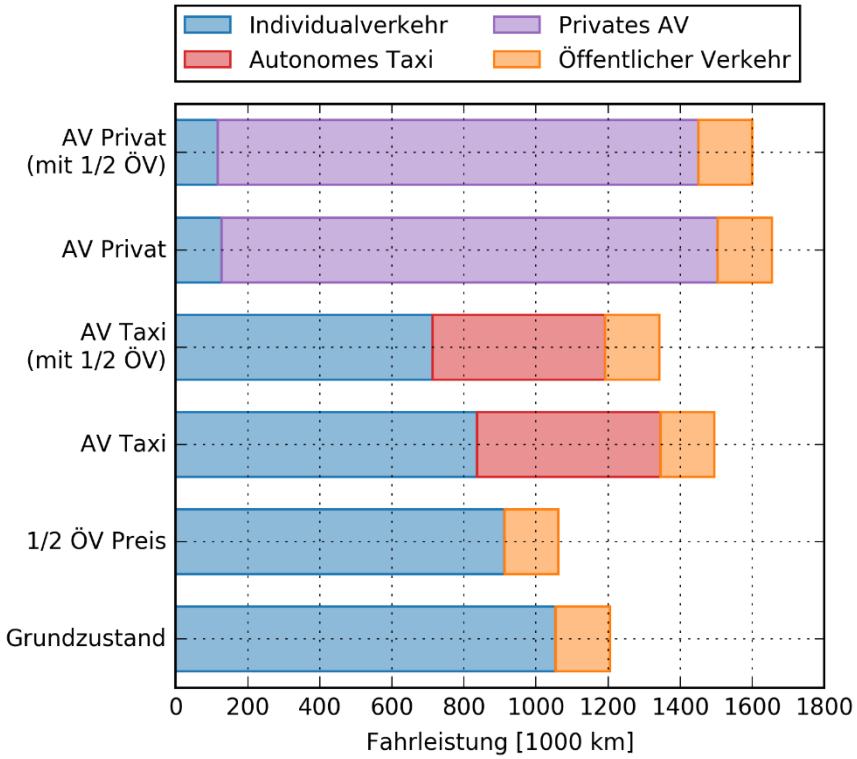


Abb. 34 *Fahrleistung im Stadtgebiet (Fahrzeugkilometer)*

Abb. 34 zeigt die Fahrleistung im Stadtgebiet für die unterschiedlichen Szenarien. Es ist klar zu sehen, dass eine Reduktion des Preises im ÖV zu weniger Distanz im IV führen würde. Allerdings ergibt sich ein negatives Bild für die automatisierten Taxis: Während mit Blick auf die Verkehrsmittelanteile es vom ÖV Preis abhängt in wie weit die Einführung einer Flotte vorteilhaft ist, so sieht man hier, dass immer grössere Distanzen entstehen als zuvor. Das heisst selbst wenn ein ÖV Betreiber einen Taxi-Service anbietet muss die Infrastruktur auf einen Anstieg der Fahrtkilometer ausgelegt werden. Noch mehr Fahrtleistung entsteht, wenn private automatisierte Fahrzeuge betrachtet werden. Die gefahrenen Kilometer könnten um bis zu +50% steigen, weitgehend ungeachtet der Verbilligung im ÖV.

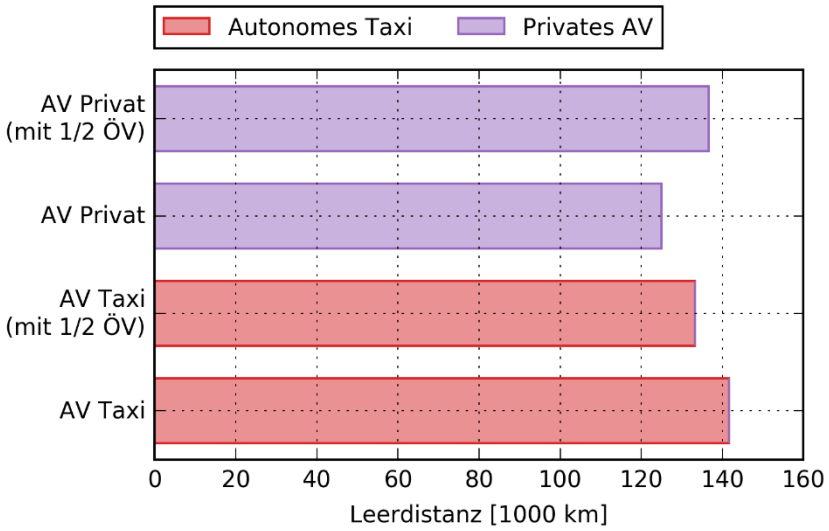


Abb. 35 *Leerdistanz im Stadtgebiet*

Schaut man sich an wie die entsprechenden Leerdistanzen für die automatisierten Verkehrsmittel aussehen (***Abb. 35***), sieht man dass der Unterschied zwischen den privaten AVs und Taxis nicht allzu gross ist. Jedoch gibt es einen qualitativen Unterschied zwischen ihnen: Während die Leerkilometer für die Taxis erbracht werden um ein bestimmtes Servicelevel (bzw. Wartezeiten) zu ermöglichen, resultieren die Leerkilometer für die privaten Fahrzeuge rein durch den Komfort, die sie dem Nutzer bieten. Insgesamt kann jedoch gesagt werden, dass die Leerkilometer nur einen kleinen Teil von max. 10% der Fahrtleistung ausmachen, während der Grossteil der gesamten Mehrkilometer schlicht durch den Verkehrsmittelwechsel vom ÖV zu den automatisierten Varianten entsteht.

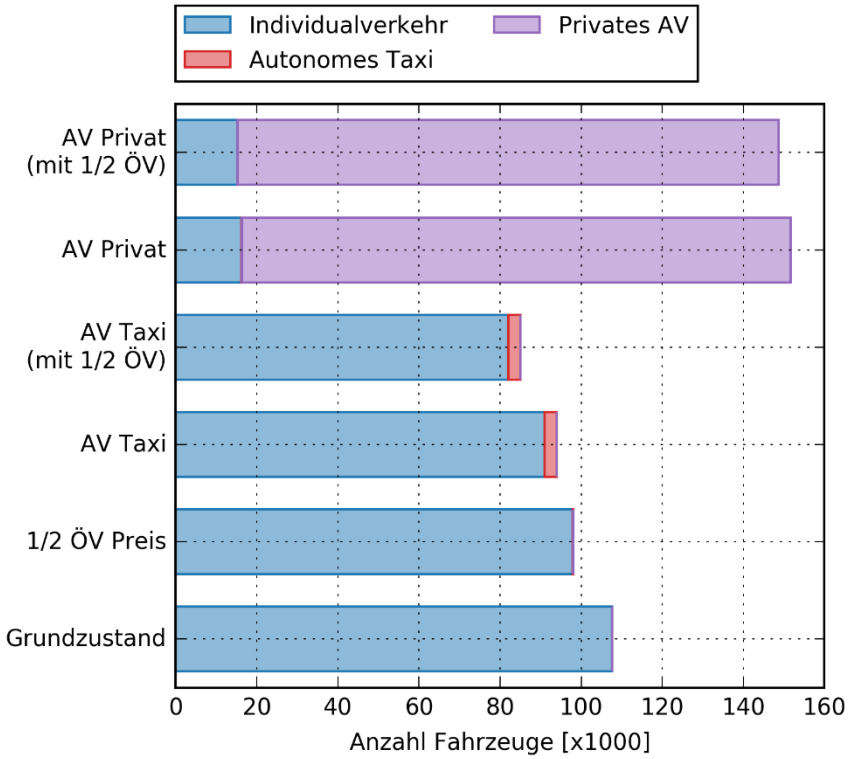


Abb. 36 *Anzahl der Fahrzeuge im Stadtgebiet*

Ebenfalls relevant um den Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf das Verkehrssystem zu bestimmten ist die Anzahl der Fahrzeuge im System. ***Abb. 36*** zeigt alle Fahrzeuge die über den Verlauf eines Tages mit dem Stadtgebiet von Zürich interagieren. Es ist klar zu sehen, dass, obwohl die Distanzen zwischen privaten AVs und Taxi-AVs ähnlich sind, die Anzahl der Fahrzeuge bedeutend niedriger ist für den Fall einer Taxiflotte. Während also in diesem Fall sehr wenige Fahrzeuge eine grosse Kilometerleistung erzielen, ist diese im Fall privater Fahrzeuge auf viele Einzelnutzer verteilt.

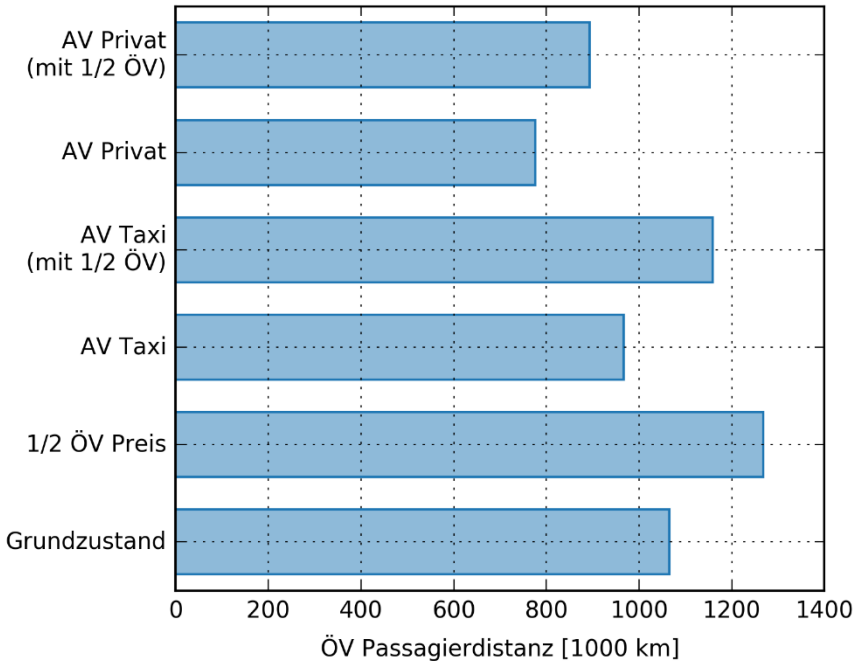


Abb. 37 *ÖV Passagierdistanz im Stadtgebiet (Personenkilometer)*

Ausschlaggebend für die Bereitstellung des ÖV Angebots ist die Passagierdistanz, die in ***Abb. 37*** abgebildet ist. Es ist erkennbar wie ein tieferer Preis die gefahrene Distanz um ca. 10% erhöht, während es bei den Taxis wiederum darauf ankommt, ob die Flotte im Kontext des halben ÖV Preises simuliert wird oder ohne. Schaut man auf die privaten AVs so lässt sich in beiden Fällen ein Rückgang der Personenkilometer verzeichnen.

Nutzerperspektive

Während die bisher getätigten Analysen hauptsächlich für die Planung der Infrastruktur und des öffentlichen Verkehrs interessant sind, soll nun betrachtet werden, wie sich die Szenarien auf die Nutzer auswirken.

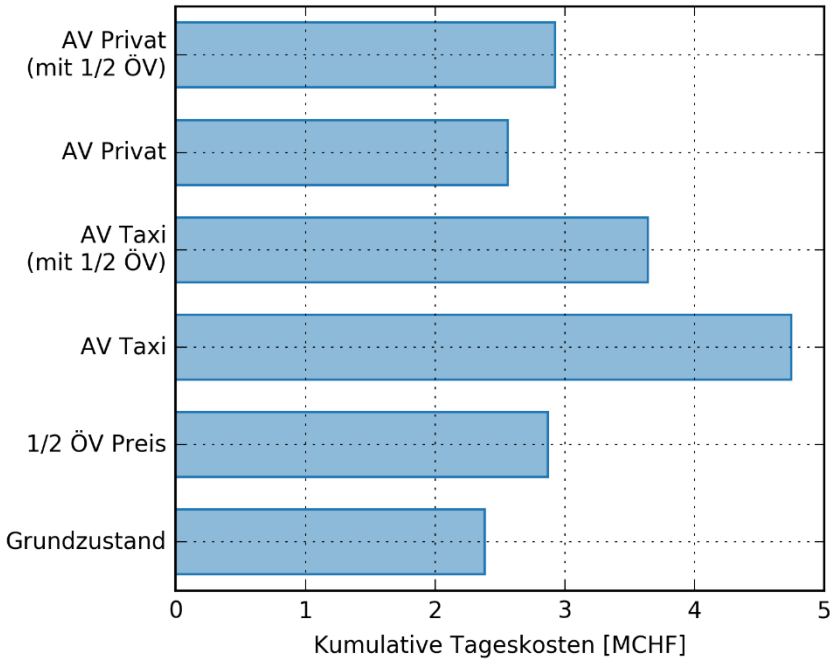


Abb. 38 *Tageskosten für die Nutzer im Stadtgebiet*

Abb. 38 zeigt die kumulativen Tageskosten im System. Das heisst insgesamt werden durch die Nutzung der Mobilitätsangebote ca. 2.5M CHF im Stadtgebiet umgesetzt. Interessanterweise steigen die Ausgaben bei halbem Preis für den ÖV. Man muss allerdings bedenken, dass dies nur für den lokalen Verkehr (Busse und Trams) gilt. Dennoch hat eine Verringerung des Preises für den lokalen Betrieb offenbar den Effekt, dass mehr Leute auf den ÖV wechseln, zwar etwas Mehrausgaben haben, aber dafür besseren Komfort geniessen als selbst mit dem Auto zu fahren.

Die höchsten kumulativen Kosten ergeben sich für die Taxis. Wiederum ist es wichtig, diese Zahlen im Kontext zu sehen: Dadurch, dass die Kunden einen besseren Komfort geniessen als mit dem ÖV oder dem privaten Fahrzeug sind sie bereit mehr zu zahlen. Zudem handelt es sich um variable Kosten, die hier dargestellt werden. Würde man beispielsweise die Vollkosten für die Privatfahrzeuge ansetzen, so würden sich die Nutzerkosten für private Fahrzeuge auf einem höheren Niveau befinden.

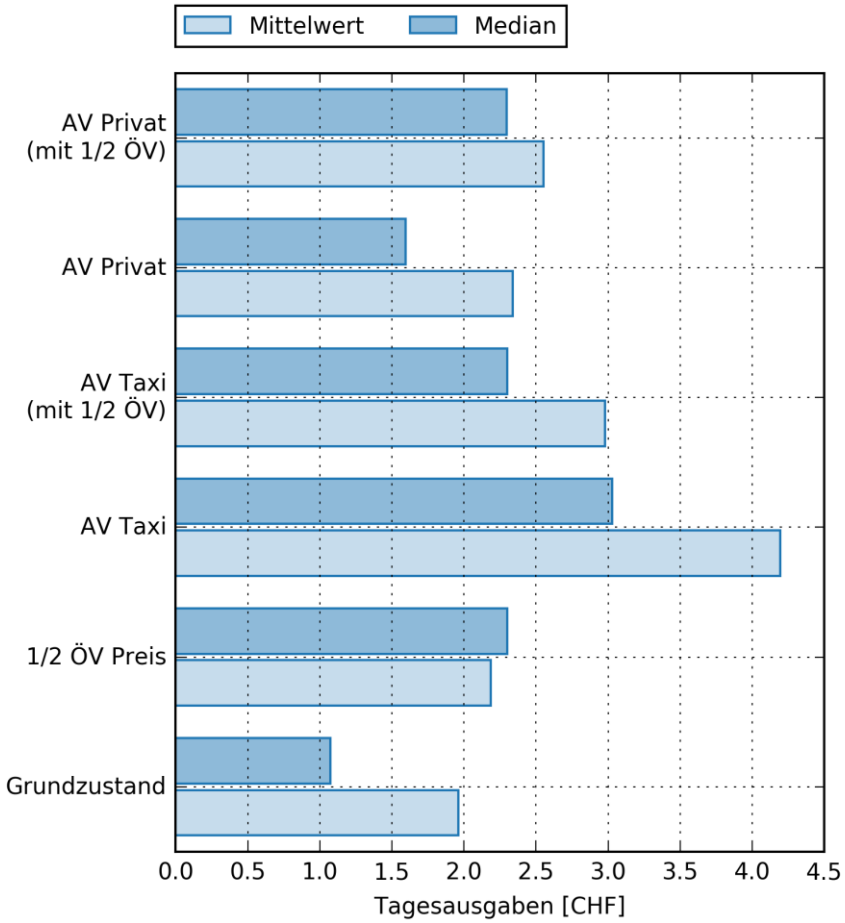


Abb. 39 *Tageskosten für die Nutzer im Stadtgebiet*

Eine andere Sicht auf die Kosten bildet ***Abb. 39***. Hier werden die durchschnittlichen Kosten, als auch die Median Kosten pro Tag für alle Reisende im Stadtgebiet angegeben. Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie im vorherigen Plot: Am meisten geben die Agenten im Szenario der automatisierten Taxis aus. Im Schnitt wird dabei doppelt so viel ausgegeben wie vorher, der Median liegt bei dem dreifachen Wert.

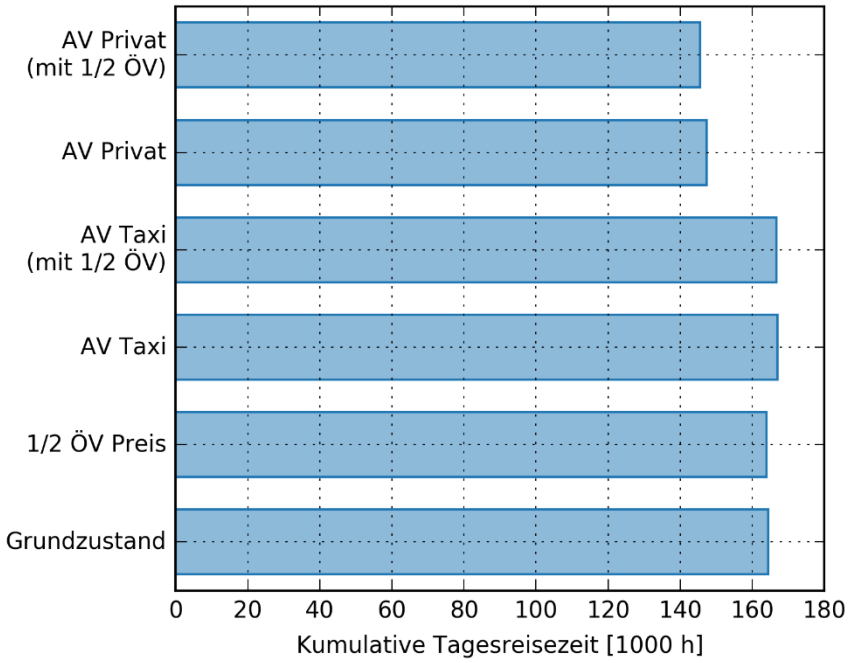


Abb. 40 *Kumulative Tagesreisezeit für alle Reisenden im Stadtgebiet*

Wie verhält es sich also mit den Gewinnen in den Reisezeiten? ***Abb. 40*** gibt Einblick dazu. Während die kumulative Reisezeit mit den Taxis leicht steigt, ist ein stärkerer Abfall mit den privaten Fahrzeugen zu sehen. Das heisst tatsächlich (obwohl mehr Nutzer auf die privaten Fahrzeuge umsteigen, beispielsweise vom ÖV) sinken die Reisezeiten, was den Effekt der angenommenen Kapazitätssteigerung abbildet.

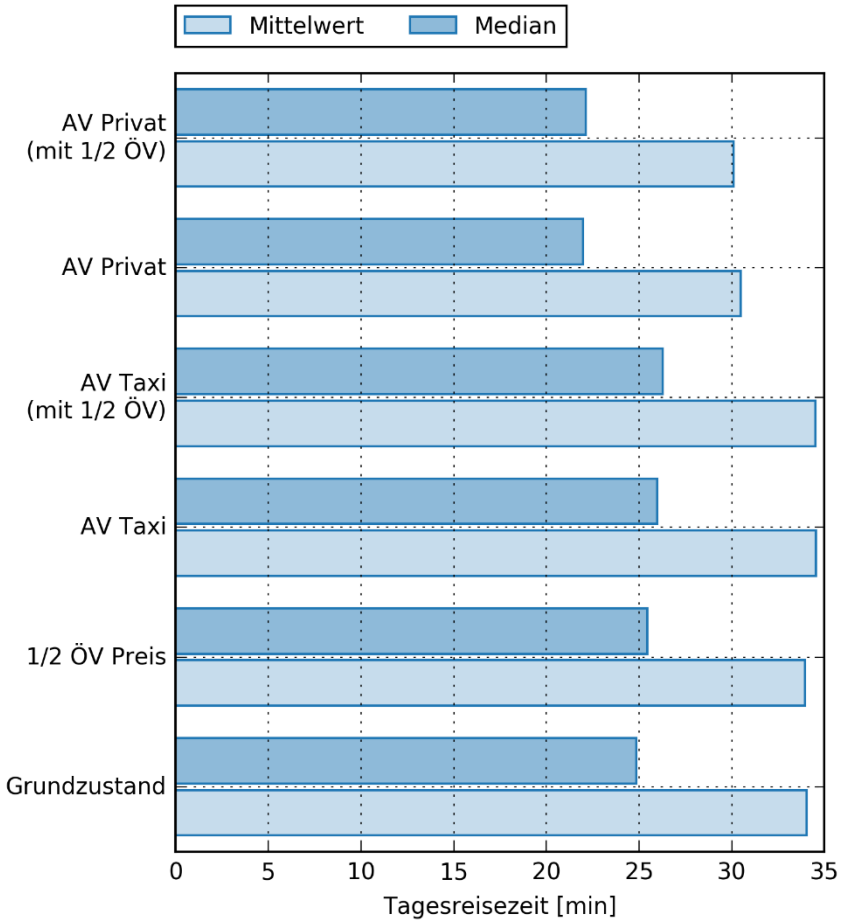


Abb. 41 *Tagesreisezeit für Reisende im Stadtgebiet*

Noch stärker ist der Effekt zu sehen, wenn man sich die durchschnittliche Reisezeit pro Tag und die Median Reisezeit anschaut (für Agenten, die im Stadtgebiet unterwegs sind). Während im Grundszenario die Agenten rund 35 Minuten pro Tag unterwegs sind, sind es mit den privaten automatisierten Fahrzeugen nur 30 Minuten. Für die Taxis bleibt die Reisezeit in etwa gleich (***Abb. 41***).

Induzierter Verkehr

Schliesslich soll die makroskopische Auswertung zum induzierten Verkehr durchgeführt werden. ***Abb. 42*** zeigt den induzierten Verkehr in Mehrdistanz für die jeweilige Szenarien. Es ist interessant zu sehen, dass durch die Reisezeitänderungen bei einem halben ÖV Preis Verkehr induziert wird. Nach Weis und Axhausen (2013) wird allerdings nur die Reisezeit im ÖV und auf der Strasse berücksichtigt. Da die Fahrpläne gleichbleiben, sind hauptsächlich die Reisezeitänderung durch die Verkehrsmittelwahleffekte weg von der Strasse in diesem Fall relevant. Diese sind am grössten für Gebiete fernab des Stadtzentrums, allerdings fliessen Gewinne in den Erreichbarkeiten hier ein (denn jede städtische Zone profitiert in Punkto Erreichbarkeit, wenn viele weiter entfernte Zonen leichter zu erreichen sind). Da hier lediglich die kumulative Mehrdistanz dargestellt ist, die sich aus der Erreichbarkeitsänderung der städtischen Zonen ergibt, ist also ein Effekt zu sehen.

Interessant ist weiterhin, dass es kaum induzierten Verkehr bei der Einführung der Taxi-AVs gibt. Die hängt damit zusammen, dass sich an den Reisezeiten in die Stadt hinein nichts ändert. Lediglich innerhalb der Stadt lassen sich die einzelnen städtischen Zonen etwas schneller erreichen, da auch Nutzer vom privaten Fahrzeug auf ein Taxi umsteigen, allerdings müssen diese Fahrzeuge auch das Strassennetzwerk nutzen. Reisezeitgewinne

durch die automatisierten Taxis selbst sind nicht zu erwarten, da auf die direkte Fahrtzeit, die mit einem automatisierten Taxi wie auch mit einem Auto überbrückt werden muss, noch zusätzlich die Wartezeit hinzukommt.

Für den Fall privater automatisierter Fahrzeuge sieht man, dass der induzierte Verkehr noch einmal deutlich steigt: Durch die Erreichbarkeitsgewinn bedingt durch den grossen Kapazitätsgewinn und den resultierenden Reisezeiten wird hier ein Anstieg von bis zu 60'000 km ausgehend von den Zonen des Stadtgebiets vorhergesagt.

Wie in Kapitel 6.1.3 ist jedoch anzumerken, dass der hier berechnete induzierter Verkehr in allen Fällen eine pessimistische Schätzung darstellt: Durch den Rückkopplungseffekte und die einhergehende Verlangsamung des Systems durch den Mehrverkehr würde man effektiv weniger Reisen bzw. Mehrkilometer erwarten.

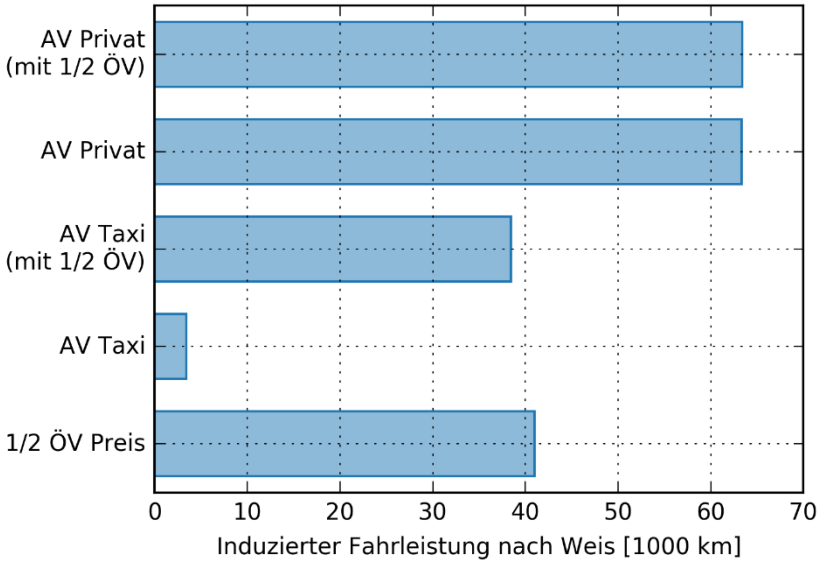


Abb. 42 *Induzierter Verkehr im Stadtbereich (Personenkilometer)*

6.4.3 Gesamtes Analysegebiet

Nicht nur die Stadt Zürich soll in den Abschätzungen eine Rolle spielen, sondern auch das Umland. Die folgenden Analysen beziehen sich auf das gesamte simulierte Gebiet (d.h. 30km Umkreis um Zürich). Da die Einführung der Taxiflotte im Stadtzentrum in den meisten Dimensionen nur zu marginalen Änderungen geführt hat, werden diese Szenarien in den entsprechenden Fällen hier nicht explizit dargestellt.

Systemperspektive

Schaut man sich den Verkehrsmittelanteil im Gesamtgebiet an (***Abb. 43***) sieht man zunächst, wie erwartet, dass die Einführung eines niedrigeren Preises für den Lokalverkehr nur einen marginalen Effekt auf die Verkehrsmittelwahl der Agenten hat. Ein deutlicher Rückgang des öffentlichen Verkehrs ist hingegen bei der Einführung automatisierter Privatfahrzeuge zu sehen. Der Rückgang ist allerdings nicht so stark wie im Stadtgebiet. Das lässt darauf schliessen, dass der öffentliche Fernverkehr trotzdem noch eine starke Anziehungskraft besitzt.

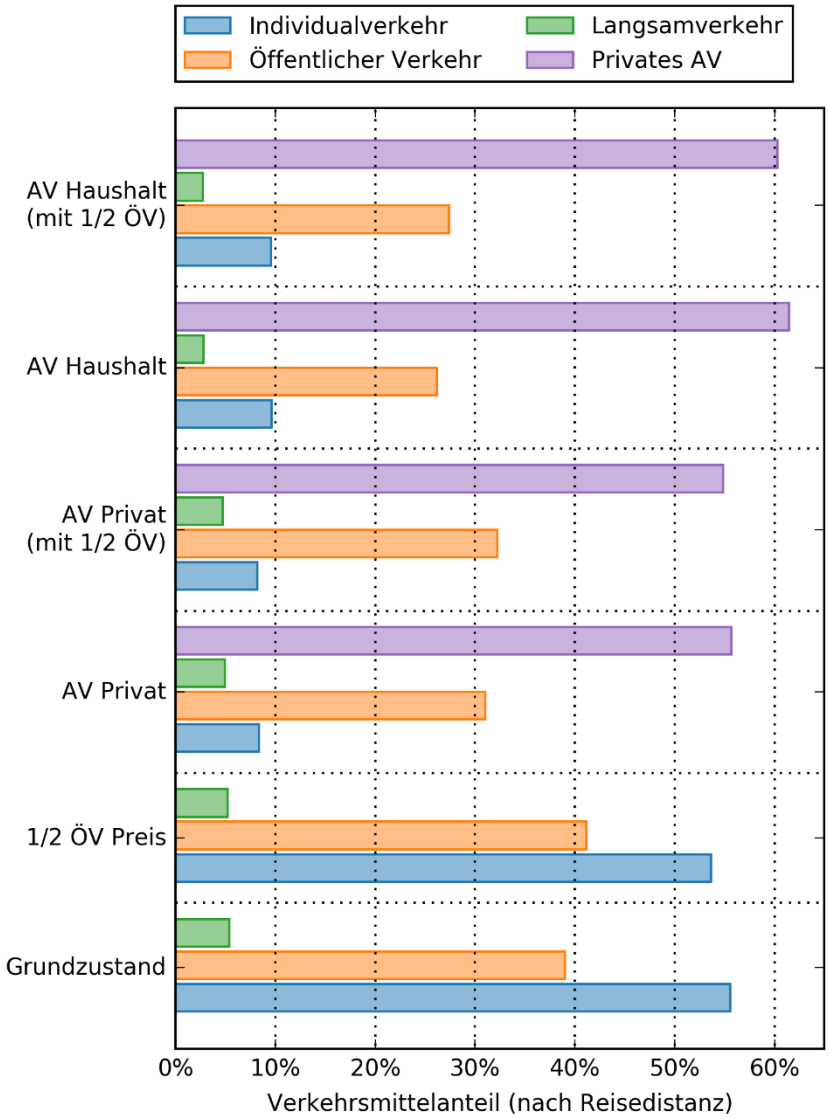


Abb. 43 *Verkehrsmittelwahl im Gesamtgebiet*

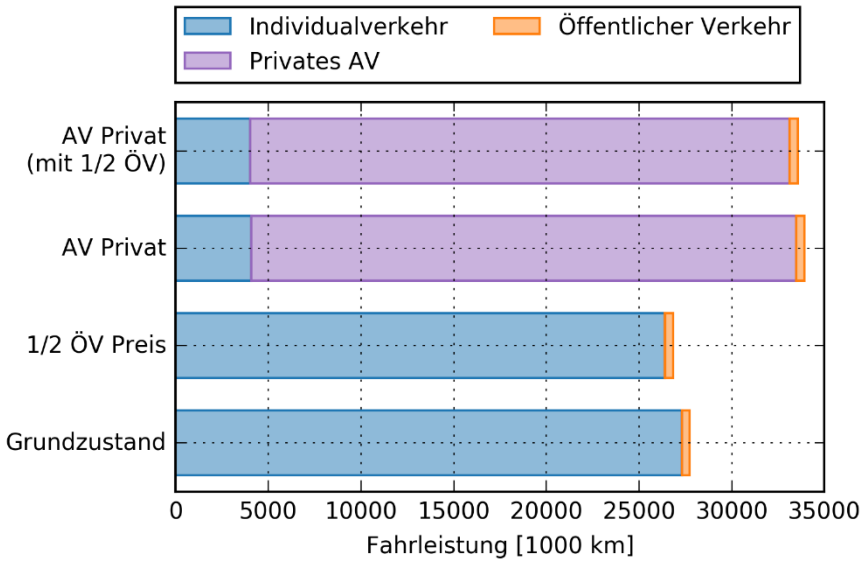


Abb. 44 *Fahrleistung im Gesamtgebiet (Fahrzeugkilometer)*

In ***Abb. 44*** ist nun wiederum die Fahrleistung abgebildet. Es ist klar zu sehen, wie diese um ca. 20% steigt, wenn private automatisierte Fahrzeuge zur Verfügung stehen.

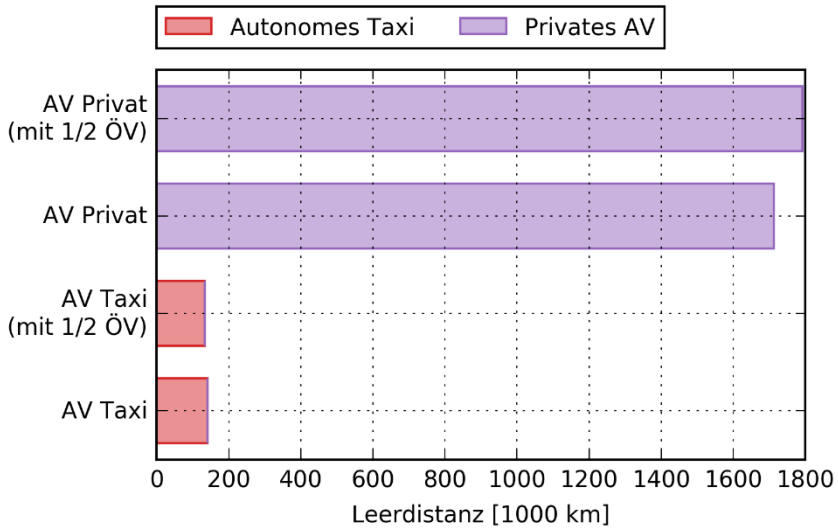


Abb. 45 *Leerkilometer im Gesamtgebiet*

Die Leerkilometer betragen bis zu 1750 km was nur ca. 5% der Fahrleistung entspricht. Wie im Fall des Stadtszenarios ist der Haupteffekt, der zu der Erhöhung der Fahrtkilometer führt, der Verkehrsmittelwahleffekt (***Abb. 45***).

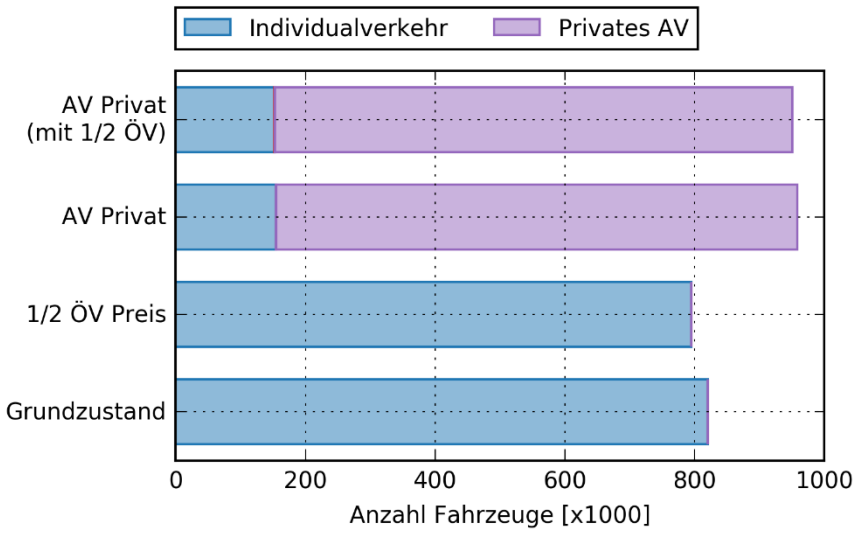


Abb. 46 *Anzahl der Fahrzeuge im Gesamtgebiet*

Schaut man sich die Anzahl der Fahrzeuge an, die mit dem Gebiet interagieren (***Abb. 46***), stellt man fest, dass diese steigt. Dies hängt damit zusammen dass Fahrten, die vorher z.B. mit dem ÖV durchgeführt wurden obwohl der Agent theoretisch ein Privatfahrzeug zur Verfügung hätte, nun definitiv mit durchgeführt werden, da der Komfort gestiegen ist.

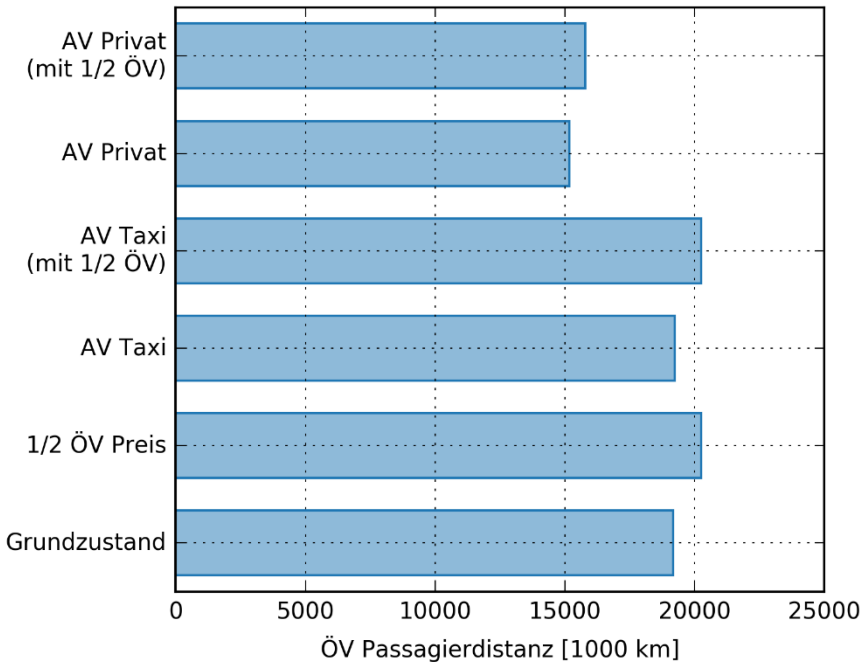


Abb. 47 *ÖV Passagierkilometer im Gesamtgebiet (Personenkilometer)*

Entsprechend nimmt die ÖV Passagierdistanz ab, wie in ***Abb. 47*** zu sehen ist.

Nutzerperspektive

Aus der Nutzerperspektive lässt sich feststellen, dass die Gesamtausgaben mit der Einführung privater automatisierter Fahrzeuge steigen. Zum Vergleich sind in ***Abb. 48*** auch noch einmal die Gesamtausgaben für die Taxi-Szenarien angegeben. Die Mehrkosten bei

Nutzung der privaten Fahrzeuge betragen demnach noch einmal ca. doppelt so viel als bei den Taxis. Dies ist ein interessantes Ergebnis, bedenkt man dass die Mehrkosten durch die Taxis hauptsächlich im Stadtgebiet Zürichs und nicht im Umland entstehen.

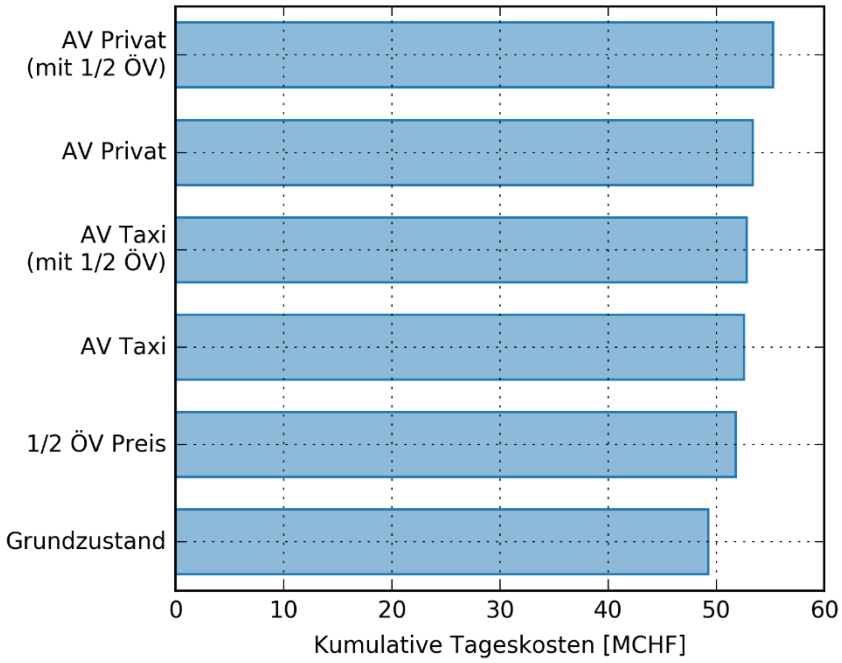


Abb. 48 *Kumulative Tageskosten der Nutzer im Gesamtgebiet*

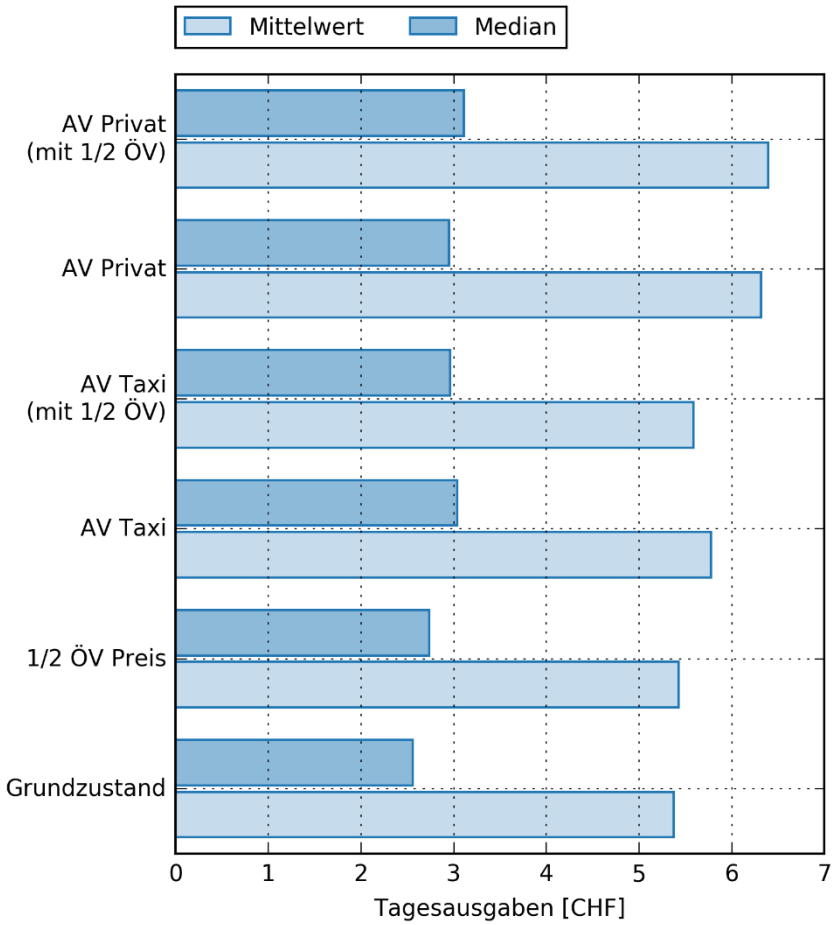


Abb. 49 *Tagesausgaben der Nutzer im Gesamtgebiet*

Im Tagesmittel (***Abb. 49***) sind die Ausgaben noch einmal deutlich höher als für die Taxis, wobei der Median in den dargestellten Szenarien stabil bleibt. Das lässt darauf schliessen, dass viele Reisen mit hohen Ausgaben, bzw. lange Reisen, ersetzt werden.

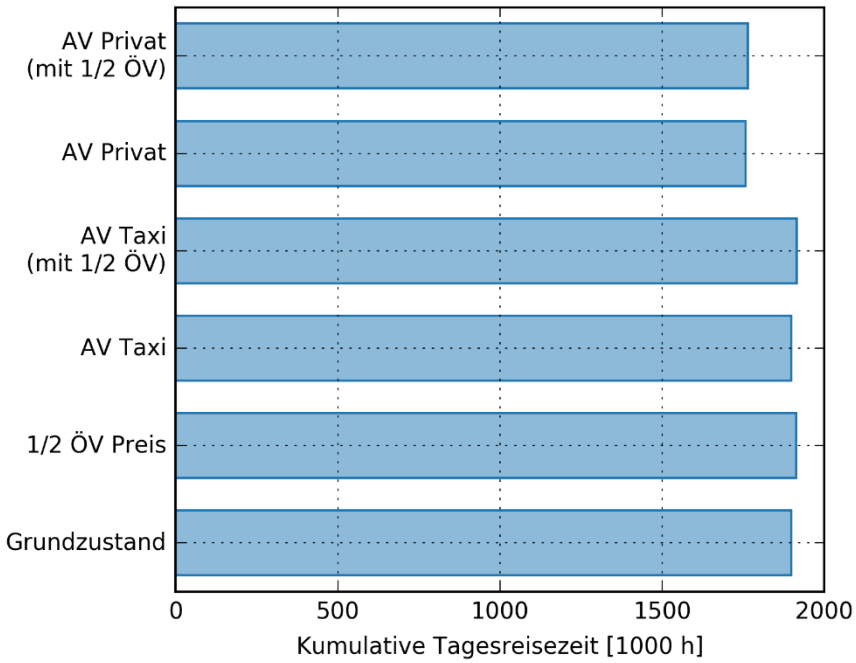


Abb. 50 *Kumulative Tagesreisezeit der Reisenden im Gesamtgebiet*

Der Grund dafür ist in ***Abb. 50*** zu sehen: Die kumulative Tagesreisezeit sinkt um ca. 200’000 Stunden, die Agenten sind also schneller unterwegs.

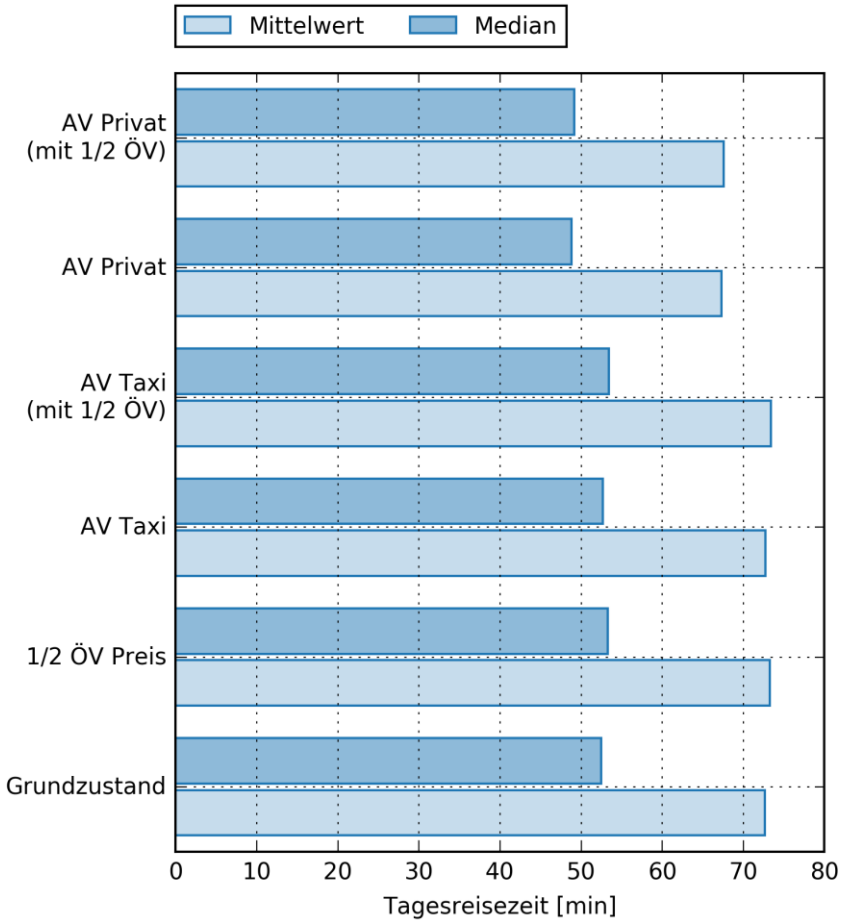


Abb. 51 *Reisezeiten der Reisenden im Gesamtgebiet*

Für den einzelnen Agenten bedeutet dies eine Verringerung der durchschnittlichen Tagesreisezeit von gut fünf Minuten (***Abb. 51***). Wiederum ist zu sehen dass, der Median relativ stabil ist, die Einführung der privaten automatisierten Fahrzeuge ist also insbesondere interessant für lange Fahrten, die nun durch den flüssigeren Verkehr die Überhand gewinnen in der Abwägung von Geschwindigkeit und Komfortabilität gegen die Preise des ÖV.

Induzierter Verkehr

Zuletzt soll wieder der induzierte Verkehr nach Weis analysiert werden. ***Abb. 52*** zeigt einen deutlichen Anstieg der zusätzlichen Fahrtleistung. Das heisst dass, vielleicht anders als bei den Taxis, der Effekt des induzierten Verkehres unbedingt beachtet werden sollte. Die Berechnungen liegen bei über 250’000km an Mehrdistanz in Personenkilometern, die im untersuchten Gebiet erzeugt wird.

Zusätzlich ist in dieser Abbildung der induzierte Verkehr im “unrealistischen” Szenario dargestellt, in dem alle Haushaltsmitglieder ein eigenes automatisiertes Fahrzeug nutzen können. Es ist interessant zu sehen, dass in diesem Fall die Erreichbarkeiten weniger stark ansteigen und somit weniger Verkehr induziert wird. Da im gleichen Zug mehr Fahrzeuge unterwegs sind, lässt sich also schlussfolgern, dass dies durch den Mehrverkehr verursacht wird, der in diesem Szenario beginnt die positiven Erreichbarkeitseffekte der Kapazitätssteigerung durch einen unverhältnismässig grossen Anstieg des Verkehrsaufkommens zu relativieren.

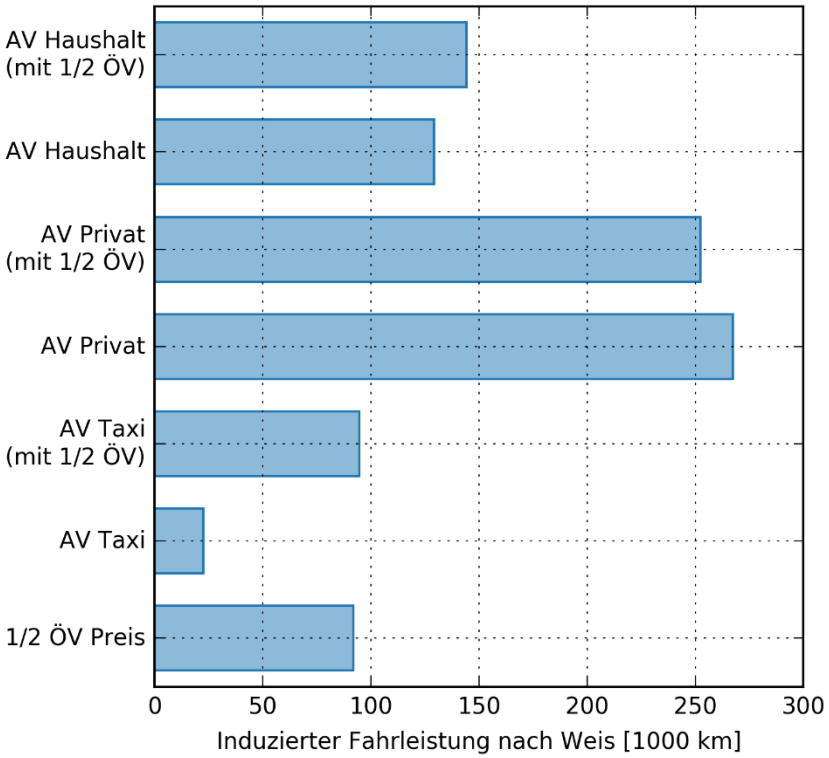


Abb. 52 *Induzierter Verkehr im Gesamtgebiet (Personenkilometer)*

6.4.4 Mischszenarien

Es wurden weiterhin Simulationen gerechnet, in denen automatisierte Taxis und automatisierte Privatfahrzeuge gleichzeitig existieren. Die Läufe kamen zu dem Ergebnis, dass eine automatisierte Taxiflotte praktisch nicht existieren kann, wenn private automatisierte Fahrzeuge zur Verfügung stehen. Das liegt daran, dass diese den gleichen Komfort bieten, aber keine Wartezeiten berücksichtigt werden müssen und eine höhere Flexibilität geboten wird.

6.5 Diskussion der Ergebnisse

Es konnte gezeigt werden, dass der gewählte Ansatz mit MATSim und direkter Implementierung eines Verkehrsmittelwahlmodells und eines endogenen Preismodells interessante und konsistente Ergebnisse erzielt. Im Folgenden sollen die im Projekt gewonnen Erkenntnisse mit den in der Literaturrecherche gefundenen Werten ins Verhältnis gesetzt werden, soweit es die unterschiedlichen Methodiken zulassen. Zudem sollen Schlussfolgerungen aus den gewonnen Zahlen gezogen werden und Wege für zukünftige Forschungsarbeiten aufgezeigt werden.

6.5.1 Vergleich mit der Literatur

Bei der Durchsicht der Literatur zu den Taxiflotten fällt auf, dass viele Studien zu dem Schluss kommen, dass eine automatisierte Taxiflotte in Ihrem Einsatzgebiet ca. 90% aller Fahrzeuge ersetzen könnte, während die Fahrtleistung um ca. 10% steigt. Diese Ergebnisse konnten in unseren Experimenten für Zürich so nicht reproduziert werden. ***Abb. 34*** zeigt auf, dass die zusätzliche Fahrtleistung ca. 25% entspricht, also deutlich mehr als in den Referenzstudien. Die kann einerseits daran liegen, dass der genutzte Algorithmus nicht 100%ig optimal ist (sondern nur eine Heuristik), der Hauptgrund ist aber vermutlich, dass hier nicht mit einem Idealfall der Flottennutzung gearbeitet wird. Vergleicht man beispielsweise die verschiedenen Basispreise in ***Abb. 32*** wird klar, dass das untersuchte

Taxi-Szenario (mit einem Basispreis von 3 CHF) die gegebene Flotte deutlich weniger nutzt als z.B. in dem Szenario ohne Basispreis. Das heisst obwohl für den Fall mit 3 CHF die Flottengrösse mit der höchsten Auslastung ausgewählt wurde, ist diese immer noch unter dem, was "möglich" wäre, wenn nicht explizit Nutzerpräferenzen eine Rolle spielen würden. Dies wurde in den bisherigen Studien nicht berücksichtigt. Es zeigt sich aber, dass dies ein sehr wichtiger Punkt ist.

Zudem zeigt ***Abb. 36***, dass sich mit der Einführung einer automatisierten Taxiflotte die Anzahl der Fahrzeuge um nur ca. 15% verringert. Wiederum muss dies unter der Prämisse betrachtet werden, dass hier die maximale Anzahl an Reisen mit dem Taxi unternommen werden unter Berücksichtigung der Nutzerpräferenzen. Es lässt sich also der Schluss ziehen, dass bisherige Studien eher den Idealfall beschreiben, wenn wirklich jeder, ungeachtet seiner Präferenzen und teils ungeachtet der Kosten, den Service nutzen möchte. Dann könnte laut den Literaturergebnissen eine Flotte von 10% der bisherigen Fahrzeuge den Bedarf decken, allerdings nur unter unrealistischen Verhaltensannahmen für die Reisenden.

Auf ähnliche Weise lässt sich ein Vergleich mit den Ergebnissen von Meyer *et al.* (2017) anstellen, wo mittels eines aggregierten Modells die Erreichbarkeitseffekte automatisierter Fahrzeuge gemessen wurden. Anders als in dieser Studie sind in den hier dargestellten Szenarien keine dramatischen Verringerungen der Erreichbarkeiten auszumachen (in Bezug auf den strassenbasierten Verkehr). Ein Grund dafür sind wiederum die Nutzerpräferenzen: Wenn die strassenbasierten Modi durch vermehrte Nutzung so langsam werden, dass die Agenten plötzlich "zurück" zum öffentlichen Verkehr tendieren, so stellt sich ein Gleichgewicht ein, in dem keine starken Veränderungen der Erreichbarkeiten zu erwarten sind. Aber auch generell scheinen die Präferenzen heute so zu sein, dass ein vollständiger Wechsel hin zum automatisierten Fahrzeug undenkbar ist. Lediglich im Szenario, in dem alle Haushaltsmitglieder ein privates automatisiertes Fahrzeug nutzen können (was allerdings unrealistisch ist), wird eine Kehrtwende festgestellt: Durch das vermehrte Verkehrsaufkommen werden die positiven Kapazitätseffekte abgeschwächt.

6.5.2 Schlussfolgerungen

Im Folgenden sollen nun einige Schlussfolgerungen aus den Simulationsergebnissen gezogen werden.

Schaut man sich vor allem die Ergebnisse zu den Taxiflotten an, so ist festzustellen, dass ein solcher Service sehr interessant für die Reisenden im Stadtgebiet ist. Zwar hat das Angebot weder die Macht den gesamten Individualverkehr zu verdrängen, noch hat er das Potential den öffentlichen Verkehr vollständig zu ersetzen. Nichtsdestotrotz ergeben sich starke Marktanteile, d.h. auf die Einführung solcher Taxiflotten muss sowohl auf Seiten der Infrastrukturplanung und auf Seiten der Angebotsplanung im ÖV reagiert werden.

Gerade das Verhältnis zum ÖV ist interessant: Sollten die Preise bei Einführung einer automatisierten Taxiflotte bleiben wie bisher, so gehen Marktanteile verloren. Sollten sich die Preise allerdings aufgrund der Automatisierung im aggregierten ÖV halbieren, so kann dieser sogar trotz der individuelleren Konkurrenz Marktanteile gewinnen.

Schliesslich ist eine interessante Überlegung, die automatisierten Taxis gar nicht als Konkurrenz zu betrachten, sondern als Ergänzung des klassischen ÖV Angebots. Geht man beispielsweise davon aus, dass der Service von einem Verkehrsunternehmen angeboten wird, mit entsprechender Regulierung und Steuerung, so zeigen unsere Simulationen einen Marktanteil von über 50% oder sogar 60%. Dies geht einher mit aktuellen Überlegungen, wie automatisierte Fahrzeuge am besten für den Transport auf der letzten Meile eingesetzt werden können.

In jedem Fall entstehen beim Betreiben einer Flotte automatisierter Fahrzeuge Leerkilometer. Unsere Studie hat jedoch gezeigt, dass diese im Verhältnis zur Verkehrsmittelwahl eher moderat ausfallen. Mit der Steigerung der Leerkilometer geht

zudem auch eine Verringerung der aktiven Fahrzeugflotte einher und die Gesamtflotte wird weitaus effektiver genutzt. Dies hat weitreichenden Einfluss auf das Leben in der Stadt, beispielsweise könnte sich der Bedarf an Parkplätzen reduzieren.

Generell haben die Simulationen gezeigt, dass das volle Potential der Flotte noch nicht ausgenutzt wurde. Durch weitere Massnahmen, die die Nutzung der Taxis erhöhen (beispielsweise Park & Ride, Subventionen auf den Fahrtpreis, o.ä.) könnte die Flotte noch besser ausgenutzt werden, was wiederum den Preis drücken würde und somit ein besseres Mobilitätserlebnis für alle ermöglichen könnte. Es kann also durchaus sinnvoll sein, die Entwicklung dieser Angebote explizit zu fördern und zielgerichtet zu entwickeln.

Stellt man sich die Taxiflotte so vor, dass sie von einem privaten Anbieter gestellt wird, lässt sich feststellen, dass ein, wie hier kostendeckender, Anbieter das Potential seiner Flotte nicht voll ausschöpfen kann. Vermutlich würde es zu einer Verlagerung des Angebots auf einzelne Hauptachsen kommen, um den maximalen Ertrag zu ermöglichen.

Während sich also ein hauptsächlich positives Bild aus den Simulationen der automatisierten Taxis auf das städtische Verkehrssystem abzeichnet, gehen die Szenarien zu privaten automatisierten Fahrzeugen in eine andere Richtung. In allen Szenarien mit privaten AVs ist zu sehen, wie die Fahrtleistung extrem anstiegt. Wiederum sind die Leerkilometer nur ein kleiner Teil der Masse, allerdings zieht der erhöhte Komfort, die kürzeren Reisezeiten und die hohe Individualität der privaten AVs einen grossen Marktanteil auf sich.

Soll weiterhin ein flüssiger Verkehr ermöglicht werden, ist ein hoher Investitionsbedarf in die Verkehrsinfrastruktur zu erwarten. Während eine Regulierung im Falle der Taxi-Anbieter also sinnvoll ist, ist sie im Falle privater automatisierter Fahrzeuge geboten. Ein Ansatz, der oft vorgeschlagen wird, ist die Bepreisung der Leerkilometer. Allerdings haben unsere Simulationen gezeigt, dass diese gar nicht den Hauptteil der Fahrtleistung darstellen und diese Massnahme somit relativ ineffektiv wäre. Weitere Möglichkeiten wären dann ein “klassisches” *Mobility Pricing*, evtl. unterstützt durch obligatorische Tracking-Systeme in den Fahrzeugen, oder eine direkte Besteuerung der Fahrzeuge, sodass es gar nicht erst zu einem Aufbau einer zu grossen Flotte automatisierter Fahrzeuge kommt.

Aus der Nutzerperspektive haben unsere Simulationen gezeigt, dass das Reisen generell teurer wird, die Reisenden allerdings bereit dazu sind, diesen Aufpreis zu zahlen, wenn sich die Zeit im automatisierten Fahrzeug besser nutzen lässt. Zudem muss man sich vor Augen führen, dass für die Reiseentscheidungen in den Simulationen nur die kurzfristigen, variablen Kosten eine Rolle spielen. Für die meisten Reisenden entfallen bei der Nutzung der Taxiflotte die jährlichen Fixkosten, sodass sich der gezahlte Preis direkt auf die Fahrten selbst zurückführen lässt. Dies kann einen weiteren qualitativen Entscheidungsvorteil für die AVs darstellen.

Weiterhin ist erkennbar, dass sich durch eine automatisierte Taxiflotte kaum Reisezeitgewinne in der Stadt ergeben. Dies könnte allerdings der Fall sein, wenn grössere und damit flexiblere Flotten möglich wären, dies dann aber nur wenn die Betreiber durch regulatorische Massnahmen unterstützt werden. Anders ist es im Fall der privaten automatisierten Fahrzeuge. Hier ist, vor allem im ländlichen Raum und für lange Strecken, ein nicht unerheblicher Reisezeitgewinn zu verzeichnen. Die Ergebnisse zum induzierten Verkehr zeigen jedoch, dass diese Gewinne durch den entstehenden Neuverkehr kompensiert werden könnten.

6.6 Forschungs- und Arbeitsbedarf

Obwohl die Simulationsstudien in der vorliegenden Forschungsarbeit einen interessanten Einblick geben, wie sich das Verkehrssystem der Zukunft entwickeln könnte, ist der entwickelte Ansatz nur ein erster Schritt hin zu einer allumfänglichen Simulationssoftware für eine Zukunft geteilter bzw. automatisierter Verkehrsangebote.

Die folgenden Abschnitte sollen auf Komponenten eingehen, die einerseits aufgrund der Komplexität der Probleme nur auf einfache Weise im Projekt umgesetzt wurden, die meisten der Komponenten waren jedoch nicht konzipiert und haben sich während der Arbeit am Projekt als wichtige Bausteine zu erkennen gegeben, die in zukünftigen Entwicklungen der Software eine Rolle spielen sollten.

Während jeweils ein Plan aufgezeigt wird, wie die jeweiligen Elemente in Zukunft in die Simulation einfliessen könnten, soll zudem darauf eingegangen werden, wie das Fehlen dieser die Simulationsergebnisse beeinflusst, bzw. wie die vorgestellten Ergebnisse entsprechend interpretiert werden müssen. Zunächst wird ein genauerer Blick auf das Verhalten der Agenten und den Aufbau der Population geworfen, danach wird die Simulation der automatisierten Fahrzeuge analysiert. Als dritten Punkt wird die Simulation des ÖVs untersucht, gefolgt von einer Reihe genereller Arbeitspakete, die in der Zukunft durchgeführt werden sollten.

6.6.1 Verhalten, Population und Nachfrage

Auf der Nachfrageseite gibt es in der vorgestellten MATSim Simulation noch einige Punkte, die ergänzt werden sollten, um ein noch besseres Bild des Verkehrsgeschehens darstellen zu können.

Der erste Punkt ist der **Verkehrswerkzeugbesitz**. Momentan wird die Agentenpopulation so generiert, dass anhand der statischen Merkmale den Agenten bestimmte Verkehrswerkzeuge (d.h. Fahrzeugbesitz, Besitz eines GA oder Halbtax) möglichst deckungsgleich mit dem Mikrozensus Mobilität und Verkehr zugewiesen werden. Dieser sollte sich allerdings in Zukunft ändern. Während die Daten der Befragungen grundsätzlich ein detaillierteres Modell für den Verkehrsmittelbesitz, auch in der Zukunft, erlauben würden, so ist diesen in der gewählten Methodik doch mit Skepsis zu begegnen: Die Ergebnisse haben gezeigt, dass sich die Befragten nur schwer vorstellen können, wie sich z.B. private automatisierte Fahrzeuge auf ihre Kaufentscheidung auswirken würden. In Zukunft sollten einerseits gezieltere Befragungen durchgeführt werden, auf der anderen Seite sollte für MATSim die Möglichkeit geschaffen werden, solche detaillierten Verkehrswerkzeugbesitzmodelle zu integrieren. Allein dies würde es, auch ohne gute Datengrundlage, bereits ermöglichen, Sensitivitätsstudien durchzuführen. In den bestehenden Simulationen wurden die Fälle getestet, in denen nur die Agenten Zugang zu einem privaten automatisierten Fahrzeug haben, die bereits vorher Zugang zu einem Auto hatte, oder alle Haushaltsmitglieder durften ein solches Fahrzeug nutzen. Insofern bilden die Simulationsläufe die Bandbreite des möglichen zusätzlichen Verkehrs ab.

Zweitens wird die Nachfrage stark von den **Tagesplänen der Agenten** beeinflusst. Im vorliegenden Projekt, wurden diese allerdings nicht angepasst. Viele der Vorteile, die automatisierte Fahrzeuge versprechen, z.B. eine höhere Mobilität der älteren Bevölkerung oder ein erhöhter Anteil an Arbeit im *Home Office* werden somit nicht abgebildet. Während eine Anpassung der Tagespläne durchaus möglich ist und die Methodik bereits besteht (Hettinger, 2008), fehlt leider die Datengrundlage für ein solches Vorgehen. Im Projekt wäre lediglich eine stark auf Heuristiken basierende Vorgehensweise möglich gewesen, die allerdings aufgrund der hohen Unsicherheiten verworfen wurde. Prinzipiell wäre es allerdings möglich in Zukunft solche Anpassungen vorzunehmen. Dazu bedarf es einer detaillierten Studie, die den qualitativen Neuverkehr durch die Anpassung der Tagespläne spezifischer Nutzergruppen beschreibt. Erste Ansätze dazu bestehen bereits, siehe z.B. Truong *et al.* (2017). Für die vorgelegten Ergebnisse bedeutet dies, dass der Verkehr noch einmal unterschätzt wird. Gerade für die städtische Taxiflotte könnte durch eine genauere Anpassung der Tagespläne noch einmal ein grosser Zuwachs der Fahrten entstehen.

Ein ähnliches Problem ist das Fehlen eines genauen **Zielwahlmodells**, bzw. eines Modells zur **Wohnortwahl**. Während diese Entscheidungen klar über den Umfang des vorliegenden Projektes hinausgehen, würden sie sehr interessante Analysen in Kombination mit unserer Software ermöglichen. Am interessantesten wäre es dabei wohl zu untersuchen, wie sich die Anwesenheit automatisierter Fahrzeuge auf den "*Urban*

Sprawl" auswirkt, als wie weit sich die Städte auffächern, da die Erreichbarkeiten im Umland steigen.

Als letzter Punkt soll auf den **Grenzverkehr** und auf den **Frachtverkehr** eingegangen werden. Diese Komponenten fehlen in der aktuellen Version des Simulationsszenarios. Zwar sind die Daten vorhanden, allerdings wurde der Mehrwert für das vorliegende Projekt als eher gering eingeschätzt, da es sich hauptsächlich auf die Nachfrageeffekte der Reisenden bezieht. Einzig eine realistischere Darstellung des Hintergrundverkehrs wäre möglich gewesen, eine gezielte Betrachtung, beispielsweise der Entwicklung des Logistiksektors wäre ebenfalls über den Projektrahmen hinausgegangen. In Zukunft sollen diese speziellen Agentenpopulation allerdings wieder in der Simulation integriert werden.

Im Projekt wurden keine **nutzerspezifischen Präferenzen** verwendet. Dies ist vordergründig dem Umstand geschuldet, dass die entsprechenden detaillierten Modelle zur Verkehrsmittelwahl zum Zeitpunkt der Simulationen noch nicht vorlagen. Die Entwicklung der Wahlmodelle erfolgte im weiteren Verlauf des Projekts parallel. Die Berücksichtigung individueller von der Soziodemographie abhängigen Modellparameter würde eine weitaus detailliertere Analyse der Simulationen ermöglichen, beispielsweise welche Einkommensgruppen am meisten von der Einführung automatisierter Fahrzeuge profitieren, oder ob sie unterschiedliche Einflüsse auf das geschlechterspezifische Reiseverhalten der Bevölkerung hat.

6.6.2 Automatisierte Fahrzeuge

Die automatisierten Fahrzeuge im Projekt haben schon eine hohe Funktionalität, allerdings fehlen noch einige Komponenten, um wirklich ein komplettes Bild des Betriebs einer Flotte abzugeben.

Der erste Punkt ist der **Platzbedarf** und die damit verbundenen Probleme des Parkens und der Warteschlagen. Die automatisierten Fahrzeuge benötigten momentan in der Simulation keinen Parkplatz (so wie die Privatfahrzeuge auch). Um jedoch einen genauen Vergleich zwischen automatisierten Fahrzeugen und klassischen Privatwagen zu ermöglichen, sollte für beide Verkehrsmodi das Parken explizit simuliert werden. Für die konventionellen Fahrzeuge existieren bereits Erweiterungen für MATSim, die allerdings noch mit dem vorgestellten Szenario integriert werden müssen, für die automatisierten Fahrzeuge müssen noch entsprechende Erweiterungen entwickelt werden. Das Problem ist allerdings ungleich komplexer: Während für die Autos eine Suchdynamik definiert werden kann, nach der die Agenten im Strassensystem umherfahren, bis sie einen Parkplatz gefunden haben, ist diese Annahme für automatisierte Fahrzeuge nicht realistisch: Sie sollten gezielt einen Parkplatz finden und zwar so, dass sie sich dort aufhalten, wo tatsächlich etwas später Nachfrage erwartet wird. Diese Fragestellung eröffnet ein eigenes, komplexes Forschungsthema, welches hier nicht bearbeitet werden konnte. Gleichsam stellt sich die Frage wo z.B. eine automatisierte Taxiflotte tatsächlich parkt: Ist die Stadt bereit dazu, diese den vorhandenen Platz in der Stadt nutzen zu lassen, oder würden die Fahrzeuge in grossen Hallen am Stadtrand abgestellt werden? Zukünftige Erweiterungen der Simulation werden es ermöglichen, solche Fragen in Zukunft zu beantwortet.

Eng verwandt mit diesem Problem sind **Warteschlangen**, bzw. die Dynamik des Aufsammelns und Absetzen der Kunden. Kommt es z.B. zu einer grossen Nachfrage an spezifischen Punkten in der Stadt, so werden die automatisierten Fahrzeuge momentan nur durch die Netzwerkdynamik selbst ausgebremst. Auf dem Strassenabschnitt, wo die Kunden aufgesammelt werden kommt es allerdings selbst zu keinem Stau. Um die Simulation realistischer zu machen sollten hier allerdings die Ein- und Ausstiegsvorgänge simuliert werden, sodass sich die Fahrzeuge in das Netzwerk zurückstauen können. Dies spielt auch eine grosse Rolle, wenn intermodale Reisen (siehe nächstes Kapitel) betrachtet werden. Sollen beispielsweise die Reisenden aus einem vollbesetzten Zug am HB Zürich durch automatisierte Fahrzeuge abgefertigt werden, müsste dies unweigerlich zu Staus und zu einer Überlastung der heutigen Strassenkapazität führen.

Die automatisierten Fahrzeuge in der Simulation müssen momentan noch nicht "**aufladen**" bzw. "**tanken**". Sie sind die gesamte Tageszeit über in Betrieb, was unter genauerer Betrachtung nicht realistisch erscheint. Bereits von den Autoren durchgeführte Teststudien haben gezeigt, dass der Zwang die Flotte auf einem gewissen Ladestand zu halten durchaus einen grossen Einfluss auf die Rentabilität hat. Die Integration einer Ladedynamik, die allerdings bereits am IVT implementiert wurde, in das vorliegende hätte allerdings einen grossen Mehraufwand erfordert. Es hätten Studien durchgeführt werden müssen, wo die Ladestationen optimaler Weise in der Stadt stehen sollen (vereinzelt oder grosse Anlagen am Stadtrand?) und wie diese gestaltet sein sollen (Fahrzeuge pro Ladestation). Zudem hätten einerseits Algorithmen entwickelt werden müssen, die anhand des Ladezustands (und anhand der Tageszeit bzw. der Nachfrage und der Verkehrslage) entscheiden können, wann ein Fahrzeug geladen werden soll. Auf der anderen Seite bräuchte es dann Algorithmen, die entscheiden, welche Ladestation ein Fahrzeug anfahren sollte, abhängig vom Ladezustand des Fahrzeugs selbst und der Auslastung der Station. Die Integration und genaue Studie der Effekte des Ladeverhaltens auf eine automatisierte Fahrzeugflotte ist also ein weitreichendes Forschungsthema in sich selbst. Die bisherigen Teststudien haben zudem gezeigt, dass sich gerade bei elektrischen automatisierten Fahrzeugen eine starke Jahreszeitabhängigkeit zeigt: Durch die schnelle Entladung der Fahrzeuge bei niedrigen Temperaturen muss eine um einiges grössere Flotte bereitgestellt werden als im Sommer.

Eine Komponente die ebenfalls nicht simuliert wurde ist das ***Pooling*** der Taxis. Dabei soll ein Taxi mehrere Kunden gleichzeitig bedienen, wenn diese für einen tieferen Preis eine erhöhte Reisezeit in Kauf nehmen. Es wurde im Projekt allerdings auf diese Angebotsform aus einer Reihe von Gründen verzichtet: Erstens gibt es bisher noch keine Standardalgorithmen, die ein gute Laufzeit aufweisen, auf die man einfach zurückgreifen könnte. Ähnlich wie im Fall der "Taxi-Algorithmen" hätte also zunächst eine detaillierte Studie durchgeführt werden müssen, die die wenigen existierenden Algorithmen auf ihre Anwendbarkeit (in Punkte Rechenzeit) auf unsere Simulationen ermöglicht. Weiterhin hätte es das Projektteam vor die Herausforderung gestellt, dynamische Preisesysteme zu entwickeln. Die Taxi-AVs haben in jeder Iteration einen statischen Preis, z.B. 60 Rp/km, während dies bei PAVs unrealistisch erscheint. Überhaupt werden Angebote, in denen es "nur" *Pooling* gibt als unrealistisch erachtet. Dementsprechend würde wohl jeder Anbieter eine Preisstruktur entwerfen, die mit günstigen Angeboten Kunden zu Nebenzeiten lockt und diese Ermässigungen durch höhere Preise in den Hauptverkehrszeiten kompensiert. Während ein *Pooling*-Service ohne diese Preisstruktur undenkbar ist, kann es für den Taxi-Service, so wie er im Projekt simuliert wurde Sinn machen um den Kunden (z.B. aus Sicht eines klassischen Verkehrsbetreibers) Planungssicherheit zu geben.

6.6.3 Öffentlicher Verkehr

Für den öffentlichen Verkehr ist wohl das Fehlen **intermodaler Reisen** der grösste Kritikpunkt am aktuellen Simulationsaufbau. Jede Reise kann nur mit einem Verkehrsmittel durchgeführt werden (abzüglich der Ab- und Zugangswege zu Fuss). Idealerweise sollten die Agenten aber beispielsweise mit dem Privatfahrzeug bis zum Stadtrand fahren können, dort das Fahrzeug an einer P&R Station abstellen können um dann mit dem ÖV in die Stadt hineinzufahren. Eine entsprechende Erweiterung, aufbauend auf der vorgestellten Methodik zur Verkehrsmittelwahl, ist momentan in Entwicklung und hat bereits vielversprechende Ergebnisse gezeigt. Für das vorliegende Projekt wäre diese Erweiterung bereits interessant gewesen. In den Ergebnissen fehlen momentan all die Reisenden, die evtl. auf ihr Privatfahrzeug im Stadtzentrum verzichten würden, wenn der Preis um die Hälfte fällt. Allerdings hätten zu diesem Zweck zusätzlich alle möglichen P&R Stationen modelliert werden müssen, bzw. hätten neue Konzepte wie Mobilitätshubs entwickelt werden müssen, was den Projektrahmen gesprengt hätte. Die Analyse solcher Szenarien wird aber ein sehr interessanter zukünftiger Anwendungsfall für die Simulationssoftware sein.

Gerade für Studien rund um automatisierte Fahrzeuge (oder auch *Mobility Pricing*) sind die intermodalen Reisen extrem wichtig. Beispielsweise wäre es interessant ein radikales Szenario zu untersuchen, bei dem Privatfahrzeuge in der Innenstadt Zürichs komplett

verboten werden und dort nur noch der ÖV bzw. eine automatisierte Taxiflotte existieren. Ohne intermodale Wegeketten kann allerdings eine solche Simulation als nicht realistisch angesehen werden, denn viele Agenten müssen aus dem Umland anreisen. Aufgrund einer fehlenden Alternative *müssten* sie also für den gesamten Weg den ÖV nutzen, obwohl dies vielleicht für einen nachmittäglichen Teil der Pläne extrem hinderlich ist. Entsprechend würde die Nutzung des ÖVs extrem überbewertet werden.

Weiterhin wird der ÖV selbst in der aktuellen Version sehr vereinfacht simuliert. Alles geschieht genau nach Fahrplan, sodass Busse, Trams und Züge nicht im Netzwerk simuliert werden müssen. Einerseits fehlen die Fahrzeuge in der Verkehrsdynamik (und erzeugen somit keinen Stau), andererseits werden so bedeutend kürzere Simulationszeiten ermöglicht. Zudem bedeutet eine netzgenaue Simulation des ÖVs auch einen extra Modellierungsaufwand. Es muss genau nachgestellt werden, welchen Routen im Netzwerk die einzelnen Fahrzeuge folgen, diese Information ist für gewöhnlich nicht in GTFS Fahrplänen oder ähnlichen Formaten enthalten. Eine Simulation der Fahrzeuge selbst im Netzwerk ist allerdings nur vonnöten, wenn tatsächlich relevante Effekte erwartet werden, beispielsweise starke Verspätungen aufgrund eines erhöhten Verkehrsaufkommens oder ähnlich Effekte. Um diese dennoch abbilden zu können, soll in Zukunft der ÖV wieder detailliert in die Simulation eingebunden werden. Im vorliegenden Projekt standen die Geschwindigkeitsvorteile im Vordergrund, die Methodik und Simulationskomponenten für einen netzgenauen ÖV sind allerdings bereits vorhanden.

Eine detaillierte Simulation der ÖV-Fahrzeuge hat zudem den Vorteil, dass Kapazitäten im ÖV direkt durch die Fahrzeuggrössen modelliert werden können. Momentan werden keine Kapazitätrestriktionen beachtet. Die vorgestellten Ergebnisse gehen also davon aus, dass der jeweilige Anstieg der Reisen durch den bestehenden Fahrplan gedeckt werden kann. Dies ist natürlich eine optimistische Annahme, die ggf. in Folgeuntersuchungen verifiziert werden sollte. Um einen Kompromiss zwischen vollständiger Simulation der ÖV Fahrzeuge im Netzwerk und Kapazitätsbeschränkungen zu finden, könnte in einem ersten Schritt die bestehende Simulation des ÖVs so angepasst werden, dass für jede ÖV Route die zugestiegenen Passagiere gezählt werden und entsprechend Reisen mit späteren Verbindungen durchgeführt werden müssen, wenn die Limite überschritten sind.

Für die **Preise des ÖV** wurde im Projekt ein vereinfachtes Modell angenommen, bei dem Anhand der Antworten aus den Befragungen Kilometerpreise für bestimmte Distanzklassen zugewiesen wurden. Diese wurden noch einmal entsprechend dem Besitz eines GA, eines Halbtax oder eines Streckenabos angepasst. Eine genauere Bestimmung war leider nicht möglich, da beispielsweise der Mikrozensus Mobilität und Verkehr keine Angaben zu den tatsächlich gezahlten Preisen macht. Für die Zukunft wird es daher wichtig sein, ein genaues Preismodell für den ÖV in MATSim zu schaffen. Dieses sollte beispielsweise die Konzepte eines Tagestickets oder einer Kurzstrecke kennen, sowie realistische Preise für den Fernverkehr liefern.

6.6.4 Konvergenz

Methodisch besteht Bedarf für eine theoretische Analyse des Simulationsansatzes, der in dieser Studie gewählt wurde. Wie bereits in den entsprechenden Kapiteln angesprochen, stellt der Zusammenschluss der verschiedenen Modelle ein interessantes systemtheoretisches Problem dar: Da ist auf der einen Seite MATSim, das selbst eine sehr interessante Dynamik aufweist, auf der anderen Seite befindet sich der Kostenrechner, der durch die Flottencharakteristiken gespeist wird. Diese ergeben sich aus der Nachfrage, die wiederum stark von den Schätzungen der Reisezeiten und Wartezeiten abhängen, die direkt aus MATSim stammen. Eine genauere Untersuchung der Stabilität und Konvergenz dieses Aufbaus sollte in zukünftigen Studien vorgenommen werden.

7 Fazit

Die vorliegende Studie legt eine erste Abschätzung zur Attraktivität automatisierter Fahrzeuge in der Schweiz vor. Dabei wurde einerseits auf die Nutzung automatisierter Taxi-Flotten, als auch auf die Nutzung der Technologie im Privatfahrzeug eingegangen. Die im Projekt dokumentierten Überlegungen, Modelle, Berechnungen und Simulationen können als wertvolle Quelle dienen, um als Grundlage für weitere Projekte in diesem Rahmen zu dienen.

7.1 Schlussfolgerungen für die Verkehrsplanung

Die Literaturrecherche zu Beginn des Projekts hat gezeigt, dass die Einführung automatisierter Fahrzeuge nicht nur ein verkehrsspezifisches Thema ist. Durch die erhöhte Automatisierung wird praktisch jeder Lebensbereich der Menschen verändert werden und speziell automatisierte Mobilität wird einen grossen Einfluss darauf haben, wie wir in Zukunft reisen, unsere Zeit nutzen, Städte planen und uns im Strassenverkehr zu verhalten haben. Insofern stellt eine Analyse zu den Effekten des automatisierten Fahrens auf das Strassensystem nur einen kleinen Teil der umfangreichen benötigten Analysen dar, welche allerdings im Schweizer Kontext im Rahmen eines aktuellen Projektzyklus vom ASTRA lanciert werden.

Die Analyse der Kostenstrukturen ergab, dass die Unterschiede der Kosten pro Passagierkilometer zwischen den Verkehrsmitteln durch deren Automatisierung deutlich kleiner werden. So sind das Taxi und das gepoolte Taxis derzeit deutlich teurer als Massenverkehrsmittel und private Personenwagen. Sobald alle Verkehrsmittel automatisiert sind, ist jedoch das Taxi marginal günstiger als das Privatfahrzeug. Gleichzeitig ist das automatisierte Taxi nur 18 Rp./Passagierkilometer teurer als ein Stadtbus und 8 Rp./Passagierkilometer billiger als ein Regionalbus. Im Vergleich zu konventionellen Bussen hingegen, ist das automatisierte Taxi in beiden Fällen substantiell günstiger.

Die Analyse bestätigt damit, dass automatisierte Taxis für eine deutlich grössere Kundengruppe für den Alltagsgebrauch erschwinglich werden. Zudem stellen die deutlich geringeren Kosten als Regionalbusse deren konventionellen Betrieb in Frage. Gleichzeitig kommt die Studie jedoch nicht zu dem Ergebnis, dass automatisierte Taxis substantiell günstiger sind als das Privatfahrzeug. Dies ist insbesondere dem hohen Anteil an Overhead- und Fahrzeugmanagement-Kosten geschuldet.

Die Befragungen haben ergeben, dass der Besitz an Personenwagen sich nur dann reduziert, wenn selbstfahrende Fahrzeuge privat nicht erworben werden können. Sollten private selbstfahrende Fahrzeuge zur Verfügung stehen, ändert sich die Besitzrate gemäss den Ergebnissen der Umfrage nicht. Des Weiteren konnte kein signifikanter Effekt auf den ÖV-Zeitkarten-Besitz festgestellt werden. Für die Entscheidung des Besitzes an Mobilitätswerkzeugen sind insbesondere die ÖV-Güteklassen entscheidend. Der Preis von Taxi-AVs und gepoolten AVs, welcher in einer Bandbreite von +/-30% der Ergebnisse des Kostenrechners präsentiert wurde, hatte hingegen keinen Einfluss auf die Wahl der Mobilitätswerkzeuge.

Die Modellierung der Verkehrsmittelwahl hat ergeben, dass vor allem der konventionelle Personenwagen durch automatisierte Alternativen ersetzt wird. Die Auswirkungen auf den Anteil zurückgelegter Wege mittels öffentlichen Verkehrs sind dagegen minimal. Dies ist auch dadurch verursacht, dass der Value of Time Travel Savings (VTTS) für den konventionellen ÖV weiterhin am niedrigsten ist. Des Weiteren überwiegen die Preisvorteile *gepoolter* automatisierter Taxis den geringeren Komfort gegenüber Einzeltaxis für die meisten der Befragten. In Bezug auf das Alter der Befragten ist hervorzuheben, dass ältere Befragte eine zurückhaltendere Meinung gegenüber AVs als junge Befragte haben. Gleichwohl können sie sich eher vorstellen automatisierte Fahrzeuge für ihre gewöhnlichen Wege zu nutzen.

Mit Blick auf die Simulationen konnte festgestellt werden, dass es einen qualitativen Unterschied zwischen der Einführung einer Taxiflotte im Stadtgebiet Zürichs gibt oder der flächendeckenden Verfügbarkeit privater automatisierter Fahrzeuge im weiträumigen Umland. Während die Simulationen zum ersten Fall weitgehend bisherige Studien bestätigen im Sinne, dass eine automatisierte Taxiflotte eine gute Ergänzung des bestehenden ÖV-Netzes bilden könnten, zeigen die Studien zu privaten Fahrzeugen, dass dem ÖV eine schwere Zeit bevorsteht, wenn nicht die Einführung automatisierter Fahrzeuge durch entsprechende Regelungen und Restriktionen von administrativer Seite begleitet wird.

Die Simulationsstudie hat aber auch gezeigt, dass es wichtig ist, die Forschung zum Thema der automatisierten Fahrzeuge, aber insbesondere auch im Bereich der Simulationstools voranzutreiben. Viele bisherige Studien kommen beispielsweise zu dem Schluss, dass geteilte Verkehrsangebote ca. 90% aller Fahrzeuge in Städten vermeiden könnten, ein Argument welches gern von den etablierten und aufkommenden *Ridesharing* Unternehmen wie z.B. Uber in den USA oder MOIA und Allygator in Deutschland genutzt wird. Allerdings liegen diesen Studien oftmals Annahmen unter Idealbedingungen zugrunde, beispielsweise, dass tatsächlich jeder Nutzer bereit wäre den Service zu nutzen, einmal ungeachtet bestimmter Wartezeiten oder ein anderes Mal ungeachtet der entstehenden Preise. Die vorliegende Studie zeigt jedoch erstmals, dass eine realistische Analyse unter Einbezug der Nutzerpräferenzen mit sinnvollen Preisen und Wartezeiten heute technisch möglich ist (wenn auch mit weitaus grösserem Arbeitsaufwand verbunden). Dementsprechend kommt unsere Studie zu einem im Vergleich interessanten Ergebnis: Auf der einen Seite können die weit verbreiteten Resultate nicht bestätigt werden, nämlich, dass das Gros der Reisen durch automatisierte Taxis ersetzt werden kann, und zweitens, dass entsprechend des geringeren zusätzlichen Verkehrsaufkommens Bedenken zum Zusammenbruch des Verkehrssystems deutlich abgeschwächt werden können.

Die Simulationen zu den Anpassungen der ÖV-Preise haben zudem gezeigt, dass die Entwicklung der automatisierten Fahrzeuge nicht losgelöst vom Einzug der Automatisierung in den ÖV betrachtet werden kann. Können, wie angenommen, dessen Preise auf die Hälfte reduziert werden, bietet dies einen enormen Marktvorteil für die bestehenden Verkehrsbetriebe, die im Gegensatz zu dem aufkommenden Start-Ups bereits über eine grosse Infrastruktur verfügen, mit Hinblick auf *Mobility-as-a-Service* bereits weitgehend Strukturen aufgebaut haben und bereits heute eine grosse Nutzergruppe ansprechen.

7.2 Zielerreichung der Forschungsarbeit

Das vorliegende Projekt hat den Stand der Forschung zu automatisierten Fahrzeugen, vor allem, aber nicht nur im Schweizer Kontext, voranbringen können. Erstmals wurden Kostenstrukturen automatisierter Mobilität für die Schweiz erarbeitet, die im internationalen Vergleich einen neuen Massstab im Detailgrad der Analyse setzen. Die Umfragen ermöglichen es erstmals, die Attraktivität bestimmter Angebotsformen für die Schweiz mit dem Beispiel der Stadt Zürich abzuschätzen. Auf Seite der Simulationen wurde eine Reihe neuer und innovativer Komponenten entwickelt, die es nun ermöglichen (nicht nur automatisierte) Verkehrsangebote mit dynamischer Nutzernachfrage deutlich einfacher und schneller zu simulieren als zuvor. Natürlicherweise haben sich die Themenschwerpunkte während der Arbeit am Projekt verschoben, von denen, die ursprünglich definiert waren. Die geplanten Ziele (entsprechend den Zielen im Projektantrag) wurden wie folgt erreicht:

- Erfassung und Systematisierung der heutigen Diskussion und Ergebnisse zu den erwarteten Kosten und Kapazitäten des Verkehrs mit automatisierten Fahrzeugen

Die umfangreiche Literaturanalyse des Projekts hat gezeigt, dass es Mitte 2016, aber auch heute noch grossen Forschungsbedarf zu den zukünftigen Kosten und Kapazitätsveränderungen automatisierter Fahrzeuge gibt. Insbesondere zeigt die

Literaturanalyse, dass es weitgefächerte Annahmen gibt, die zumindest zum heutigen Zeitpunkt nur eine grobe Tendenz erkennen lassen, vor allem im Bereich der Kapazitäten.

In den Bereich der Kostenschätzungen wurde aufgrund der lückenhaften Darstellung in der existierenden Literatur zusätzlicher Arbeitsaufwand investiert. Dies war für das vorliegende Projekt nicht vorgesehen, stellt nun jedoch einen Hauptteil der Studie dar. Die Ergebnisse waren eine wichtige und unerlässliche Vorstufe um sinnvolle Preise in den Umfragen zu verwenden und vor allem um konsistente Simulationsszenarien, insbesondere mit dem Hintergrund unterschiedlicher Flottengrössen und Nachfragemuster, erstellen zu können.

- Akzeptanz möglicher neuer Angebote mit automatisierten Fahrzeugen im Kanton Zürich

Die Akzeptanz verschiedener Angebotsformen automatisierter Mobilität wurde im Projekt mit der Durchführung der Befragungen untersucht. Dabei wurden erstmals die Auswahl an Mobilitätswerkzeugen als auch die Nutzung automatisierter Verkehrsmittel gemeinsam untersucht. Im Gegensatz zu US-amerikanischen Publikationen wurde dies als kritisch für eine Untersuchung in der Schweiz auf Grund der weiten Verbreitung von ÖV-Abonnementen angesehen. Die Unterscheidung zwischen den beiden Szenarien, Flotte automatisierter Taxis (1) und Flotte automatisierter Taxis samt der Möglichkeit ein privates automatisiertes Fahrzeug zu erwerben (2) hilft aus zweierlei Hinsicht. Erstens ist es möglich Rückschlüsse über die Übergangsphase, in welcher selbstfahrende Fahrzeuge nicht erworben werden können, zu ziehen. Des Weiteren erlaubt die Aufteilung Hinweise auf die Effekte eines Ausschlusses privater automatisierter Fahrzeuge in bestimmten Gebieten.

- Simulation der Nachfrage für diese Angebote in einem städtisch-ländlichen Kontinuum in der Schweiz unter Berücksichtigung der Heterogenität der Nutzerpräferenzen und unter besonderer Berücksichtigung induzierter Verkehre

Die Simulationsumgebung wurde aufgebaut und erlaubt es nun detaillierte Simulationen automatisierter Mobilität in der Schweiz durchzuführen. Es hat sich allerdings herausgestellt, dass der Arbeitsaufwand, vor allem bei der Weiterentwicklung des Simulationsszenarios, bzw. bei der Vorbereitung der Datenbasis, höher war als ursprünglich geschätzt. Anders als geplant konnten darum verschiedene Komponenten nicht mehr berücksichtigt werden, teils aber auch weil sich herausgestellt hat, dass die jeweiligen Fragestellungen eine eigene, detaillierte Untersuchung erfordern: die Verschiebung von Aktivitätenketten, die mit der bisherigen Datenlage (nicht nur für automatisierte Fahrzeuge) nicht zufriedenstellend durchgeführt werden kann; die Simulation von PAVs, für die bis dato noch keine rechenzeiteffizienten Algorithmen existieren, die für unseren Simulationsaufbau notwendig sind. Zudem konnte keine soziodemographische Analyse der Effekte automatisierter Mobilität durchgeführt werden, da die entsprechenden Modelle aus den Umfragen zum Zeitpunkt der Simulationen nicht zur Verfügung standen. Allerdings konnten erstmals Simulationen vorgestellt werden, in denen geteilte Mobilität (in Form der Taxi-AVs) mit dynamischer Nachfrage und dynamischer Preisanpassung simuliert wurde. Die vielversprechenden Ergebnisse zeigen, dass eine solche Methodik in Zukunft unverzichtbar sein wird, wenn nicht nur erste Abschätzungen durch Extremfälle bestimmter Angebotsformen, sondern realistische Verhaltens- und Nutzungsmuster vorhergesagt werden sollen.

Im Projekt wurde erstmals die Methode einer makroskopischen Regression der Erreichbarkeitsänderung zur Bestimmung des Neuverkehrs erfolgreich angewendet. Der Ansatz wurde jedoch nur in erster (pessimistischer) Näherung verwendet, da der iterative Einsatz der Methode die Rechenzeiten gesprengt hätte.

- Implikationen der Vollautomation des öffentlichen Schienen- und Strassenverkehrs für die langfristige Planung im ÖV und MIV.

Die entwickelten Kostenschätzungen zeigen, dass der lokale ÖV durch die Automatisierung deutlich günstiger angeboten werden kann, während die Effekte auf die

Fernverbindungen eher gering sind. Mit Hilfe der Umfragen lässt sich zudem nun das Potential verschiedener Mischformen der Automatisierung, beispielsweise einer automatisierten Taxiflotte als Zubringer, abschätzen. In den Simulationen konnte der Effekt der Automatisierung auf den ÖV auf Angebotsseite leider nur preislich betrachtet werden, indem die Kosten für die Nutzer entsprechend dem Kostenrechner angepasst wurden. Eine zusätzliche Anpassung der Taktraten oder des Netzes selbst hätte den Rechen- und Forschungsaufwand deutlich erhöht.

- Synthese der Ergebnisse und Entwicklung der Empfehlungen

Die Ableitung von Schlussfolgerungen entsprechend der Forschungsergebnisse erfolgt mit der Abgabe des vorliegenden Projektberichts. Während die Kostenschätzungen, als auch die Umfrageergebnisse eine Reihe direkter Erkenntnisse bringen, sind die Simulationsergebnisse noch als grobe Abschätzungen zu sehen. Auf den grossen Fortschritten, die das Projekt im simulationstechnischen Bereich erzeugt hat, können in Zukunft weitaus detaillierte und grösser dimensionierte Untersuchungen folgen.

Anhänge

I Kostenrechner 167
I.1 Ermittlung der Overheadkosten 167
I.2 Kostenparameter 168
I.3 Nutzungsparameter 171
I.4 Detaillierte Kosten für verschiedene Modi 174

II Simulationen 179
II.1 Stadtgebiet 179
II.2 Gesamtgebiet 181

I Kostenrechner

I.1 Ermittlung der Overheadkosten

In Anbetracht ihres Wettbewerbsumfelds behandeln Ride Hailing- und Car-Sharing-Dienste alle Informationen über ihre Overheadkosten und Fahrzeugmanagementkosten als Betriebsgeheimnisse. Eine Quelle liefert jedoch Daten über den Finanz-, den Betriebs- und Vermögenszustand von 660 Transitanbietern in den USA (Federal Transit Administration, 2016). Overheadkosten werden als allgemeine Verwaltung bezeichnet und beinhalten: Verkehrsentwicklung, Unfälle und Schäden, Sicherheit, Personalverwaltung, Rechtsberatung, Versicherung, Datenverarbeitung, Finanz- und Rechnungswesen, Einkauf und Lager, Maschinenbau, Immobilienmanagement, Büromanagement und Dienstleistungen, Kundenbetreuung, Promotion, Marktforschung und Planung. Das Fahrzeugmanagement wird als Fahrzeugbetrieb bezeichnet und umfasst: Transportverwaltung und -betreuung, Steuerung der Fahrzeugbewegungen, Disposition der Transportvorgänge, Betrieb der Fahrzeuge, Ticketing und Fahrgeldmanagement sowie Systemsicherheit. Detaillierte Informationen sind nur für eine Teilmenge aller Agenturen (sog. "Full Reporter") verfügbar. Um die Kosten für die On-Demand-Dienste von Flotten abzuleiten, konzentrierte sich die Analyse nur auf vollständige Reporter, die Van-*Pooling* und bedarfsgerechte Transportdienste anbieten, wobei es sich bei letzteren um Transitdienste mit einer flexiblen Route und Fahrplan von handelt. Die resultierende Stichprobe besteht aus 527 Dienstleistungen von 430 Agenturen. Die Flottengrösse (Anzahl der im jährlichen Maximalbetrieb eingesetzten Fahrzeuge) reicht von 1 bis 1840.

Die Analyse begann mit der Darstellung der Overheadkosten pro Fahrzeug und Tag im Vergleich zur Flottengrösse Es wurde festgestellt, dass diese Kosten pro Fahrzeug und Tag erheblich variieren (zwischen 0,60 USD und 311,44 USD) bei Flotten mit bis zu 150 Fahrzeugen. Wenn man sich auf diese Daten konzentriert und die Grösse von Flotten auf die Overheadkosten pro Fahrzeug und Tag zurückführt, zeigt sich, dass die Grösse von Flotten in diesem Bereich keinen signifikanten Einfluss hat (p-Wert gleich 0,14). Oberhalb einer Schwelle von 150 Fahrzeugen liegen die Overheadkosten pro Fahrzeug und Tag zwischen 1,39 USD und 15,47 USD, mit Ausnahme von zwei Agenturen, und die Daten zeigen weder einen positiven noch einen negativen Trend (p-Wert der Flottengrösse entspricht 0,53). Es wurde daher angenommen, dass die Komposition der Flotten eine Schlüsselrolle bei der Erklärung dieser Variationen spielt. Wenn jedoch die durchschnittliche Fahrzeugkapazität und die Grösse von Flotten auf die Overheadkosten pro Fahrzeug und Tag unter Verwendung des gesamten Datensatzes zurückgehen, hat die durchschnittliche Fahrzeugkapazität keinen signifikanten Effekt (p-Wert gleich 0,62). Interessanterweise ergibt sich ein ähnliches Bild bei der Analyse der Abhängigkeit der Fahrzeugbetriebskosten pro Fahrzeug und Tag von der Grösse der Flotte, sowie der durchschnittlichen Fahrzeugsitzkapazität. Auch hier variieren die Betriebskosten pro Fahrzeug und Tag erheblich (zwischen 4,70 USD und 623,06 USD) und entsprechen der Flottengrösse von bis zu 150 Fahrzeugen. Mit Ausnahme von zwei Agenturen liegt diese Zahl zwischen 1,79 USD und 1,79 USD. 23,97 USD für Flotten mit einer Grösse über 150.

Die Ergebnisse zeigen, dass entweder wichtige Daten fehlen, um das Verhältnis zwischen der Zusammensetzung der Flotten und den Overheadkosten und den Betriebskosten zu bestimmen, oder dass die Agenturen mit sehr unterschiedlichen Kostenstrukturen arbeiten. Wie bereits erwähnt, weisen jedoch Unternehmen mit Flottengrössen ab 150 Fahrzeugen stabile Zahlen für beide Kostenstrukturen auf. Daher werden entsprechende Medianwerte als Schätzungen für Overhead (10,24 USD pro Fahrzeugtag) und Fahrzeugbetriebskosten pro Fahrzeug und Tag (8,39 USD pro Fahrzeugtag) verwendet. Die Anpassung dieser Zahlen an die Lohnstückkosten in der Schweiz (Neff et al., 2015) ergibt ca. 14 CHF pro Fahrzeugtag für Overheadkosten und 10 CHF pro Fahrzeugtag für Betriebskosten.

I.2 Kostenparameter

Tab. 26 *Kosten der Fahrzeuge*

Fahrzeugtyp	Solo	Midsize	Van	Minibus
Kapazität [Sitzplätze für Pass.]	1	4	8	20
Anschaffung [CHF]	13000[a]	35000[b]	66000[c]	70000[d]
Jahresversicherung[CHF/y]	500[e]	1000[e]	1200[e]	1400[e]
Jährliche Steuer [CHF/y]	120[f]	250[f]	700[f]	1100[f]
Jährliches Parken [CHF/y]	1500[g]	1500[g]	1500[g]	1500[g]
Jährliche Mautgebühr [CHF/y]	40[h]	40[h]	40[h]	2200[i]
Wartung [CHF/km]	0.02[j]	0.06[j]	0.12[j]	0.13[j]
Reinigung [CHF/km]	0.02[k]	0.03[k]	0.04[k]	0.05[k]
Reifen [CHF/km]	0.02[l]	0.02[l]	0.02[l]	0.02[l]
Treibstoff [CHF/km]	0.06[m]	0.08[m]	0.13[m]	0.2[m]

a) Daten: http://www.renault.ch/, letzer Zugriff 01.02.2017
b) Daten: http://www.volswagen.ch/, letzter Zugriff 01.02.2017
c) Daten: http://www.volkswagen-nutzerfahrzeuge.ch/, letzter Zugriff 01.02.2017
d) Daten: http://www.mercedes-benz.ch/, letzter Zugriff 01.02.2017
e) Quelle: Comparis AG (2016)
f) Quelle: Strassenverkehrsamt Kanton Zürich (2017)
g) Quelle: TCS (2016)
h) Quelle: Eidgenössische Zollverwaltung (2017b)
i) Quelle: Eidgenössische Zollverwaltung (2017a)
j) Daten: TCS (2016)
k) Daten: Autop (2016)
l) Annahme: Zwei Reifensätze (je 300CHF) und zweijährliche Reifenwechsel (je 100CHF) würden eine Fahrleistung von 50‘000km ermöglichen
m) Quellen: Treibstoffpreis – (Shell, 2016); Verbrauch – Webseite des jeweiligen Herstellers – Solo: 4.3L/100km; Midsize 5.7L/100km, Van 9.3L/100km, Minibus 14.2L/100km

Tab. 27 *Kostenanpassungen*

Position	Elektrisch	Automatisiert	Flotte	MwSt Abzug
Anschaffung	-	+20%[a]	-30%[b]	Ja
Jährliche Versicherung	-35%[c]	-50%[d]	-20%[e]	Ja
Jährliche Steuern	-100%[f]	-	-	Nein
Jährliches Parken	-	-	+133%[g]	Ja
Jährliche Mautgebühr	-	-	-	Ja
Wartung	+28%[h]	-	-25%[i]	Ja
Reinigung	-	Siehe Kostenparameter		Nein
Reifen	-	-10%[j]	-25%[i]	Ja
Treibstoff	-50%[k]	-10%[d]	-5%[l]	Ja

a) Quelle: IHS (2014)
b) Daten: Blens (2015)
c) Daten: Comparis AG (2016)
d) Quelle: Stephens *et al*. (2016)
e) Quelle: Helvetia (2016)
f) Quelle: http://www.stva.zh.ch/internet/sicherheitsdirektion/stva/de/StVAgeb/ GEBva14.html, letzter Zugriff 01.02.2017
g) Daten: Schlesiger (2014)
h) Daten: Diez (2016), Saxton (2013), McKinsey (2017)
i) Annahme: In-Haus Wartung
j) Annahme: Ähnlicher Effekt wie bei Treibstoffkonsum
k) Daten: Treibstoffpreis – (Shell, 2016); Strompreis - https://www.ewz.ch/de/private.html, letzter Zugriff 01.02.2017; Verbrauch – http://www.volswagen.ch/, letzter Zugriff 01.02.2017
l) Quelle: Migrol (2016)

Tab. 28 *Kosten ÖV*

Transportart	Stadtbus	Regionalbus	Zug
Kapazität	60[a]	60[a]	297[b]
Kosten pro Fahrzeugkilometer (CHF/km)	7.14[c]	6.7[c]	31.4[d]
Effekt elektrisch	-5.5%[e]	-5.5%[e]	-
Effekt automatisiert	-55%[e]	-55%[e]	-2.5%[d]

a) Daten: https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/die_vbz/fahrzeuge/autobusse.html, 01.02.2017
b) Quelle: SBB AG (2016)
c) Daten: Frank *et al.* (2008), Verkehrsbetriebe Zürich (2016), Bundesamt für Verkehr (2011)
d) Daten: SBB AG (2016)
e) Daten: Frank *et al.* (2008)

Tab. 29 *Allgemeine Kostenparameter*

Kostenparameter	Wert
Fahrzeuglebensdauer kommerziell	300000km[a]
Fahrzeuglebensdauer privat	10 Jahre
Reinigungskosten	15 CHF[b]
Jährliche Reinigungshäufigkeit privat	8[c]
Jährliche Reinigungshäufigkeit kommerziell	183[d]
Reinigungsfrequenz AV	0.025[e]
Stundenlohn des Fahrers	35 CHF[f]
Tägliche Overheadkosten pro Fahrzeug	14 CHF/d[g]
Tägliche Fahrzeugverwaltungskosten pro Fahrzeug	10 CHF/d[g]
Jahreszins Privatkunde	0.079[h]
Jahreszins gewerbliche Kunden	0.015[i]
Kreditlaufzeit Privatkunden	5 Jahe[h]
Kreditlaufzeit gewerbliche Kunden	3 Jahre
Mehrwertsteuer in der Schweiz	0.08[j]
Profitmarge	0.03[k]
Zahlungsverkehrsgebühr	0.0044[l]

a) Daten: Klose (2012)
b) Quelle: Autop (2016)
c) Daten: abh Market Research (2007)
d) Annahme: Reinigung an jedem zweiten Tag
e) Quelle: Private Kommunikation mit dem Carsharing-Betreiber
f) Daten: Lohnanalyse (2016), Braendle (2013)
g) Daten: Federal Transit Administration (2016)
h) Quelle: Migrosbank (2017)
i) Daten: Sixt SE (2016)
j) Quelle: https://www.ch.ch/en/vat-rates-switzerland/, letzter Zugriff 01.02.2017
k) Daten: SCI Verkehr (2016)
l) Quelle: Wettbewerbskommission WEKO (2014)

I.3 Nutzungsparameter

Tab. 30 *Durchschnittliche Nutzung des Privateigentums und des dynamischen öffentlichen Flottenverkehrs*

Transportart											
Bereich	*	*	*	Urban	Urban	Urban	Urban	Regional	Regional	Regional	Regional
Fahrzeugtyp	Solo	Midsize	Van	Solo	Midsize	Midsize	Van	Solo	Midsize	Midsize	Van
Bedienung	Priv	Priv	Priv	PT-NP	PT-NP	PT-P	PT-P	PT-NP	PT-NP	PT-P	PT-P
Peak Zeiten											
Betriebsstunden_AV [h]	0.32 [a]	0.32 [a]	0.32 [a]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]
Betriebsstunden [h]	0.32 [a]	0.32 [a]	0.32 [a]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]
relAktiveZeit [%]	100.00	100.00	100.00	57.00 [c]	57.00 [c]	57.00 [c]	57.00 [c]	57.00 [c]	57.00 [c]	57.00 [c]	57.00 [c]
avBelegung [%]	100.00	33.50 [a]	16.75 [a]	100.00	33.50 [a]	65.00 [d]	32.50 [d]	100.00	33.50 [a]	65.00 [d]	32.50 [d]
avGeschwindigkeit [km/h]	32.40 [a]	32.40 [a]	32.40 [a]	20.60 [a]	20.60 [a]	20.60 [a]	20.60 [a]	31.30 [a]	31.30 [a]	31.30 [a]	31.30 [a]
avWeglängePass [km]	15.00 [a]	15.00 [a]	15.00 [a]	3.40 [a]	3.40 [a]	3.40 [a]	3.40 [a]	8.00 [a]	8.00 [a]	8.00 [a]	8.00 [a]
relLeerfahrten [%]	0.00	0.00	0.00	8.00 [e]	8.00 [e]	8.00 [e]	8.00 [e]	15.00 [c]	15.00 [c]	15.00 [c]	15.00 [c]
relWartungsfahrten [%]	0.00	0.00	0.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Off-Peak Zeiten											
Betriebsstunden_Av [h]	0.67 [a]	0.67 [a]	0.67 [a]	7.60 [b]	7.60 [b]	7.60 [b]	7.60 [b]	7.60 [b]	7.60 [b]	7.60 [b]	7.60 [b]
Betriebsstunden [h]	0.67 [a]	0.67 [a]	0.67 [a]	7.60 [b]	7.60 [b]	7.60 [b]	7.60 [b]	7.60 [b]	7.60 [b]	7.60 [b]	7.60 [b]
relAktiveZeit [%]	100.00	100.00	100.00	59.00 [c]	59.00 [c]	59.00 [c]	59.00 [c]	59.00 [c]	59.00 [c]	59.00 [c]	59.00 [c]
avBelegung [%]	100.00	36.50 [a]	18.25 [a]	100.00	36.50 [a]	60.00 [d]	30.00 [d]	100.00	36.50 [a]	60.00 [d]	30.00 [d]
avGeschwindigkeit [km/h]	34.00 [a]	34.00 [a]	34.00 [a]	21.90 [a]	21.90 [a]	21.90 [a]	21.90 [a]	32.20 [a]	32.20 [a]	32.20 [a]	32.20 [a]
avWeglängePass [km]	10.50 [a]	10.50 [a]	10.50 [a]	3.00 [a]	3.00 [a]	3.00 [a]	3.00 [a]	5.90 [a]	5.90 [a]	5.90 [a]	5.90 [a]
relLeerfahrten [%]	0.00	0.00	0.00	8.00 [e]	8.00 [e]	8.00 [a]	8.00 [e]	15.00 [c]	15.00 [c]	15.00 [c]	15.00 [c]
relWartungsfahrten [%]	0.00	0.00	0.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00

Transportart											
Bereich	*	*	*	Urban	Urban	Urban	Urban	Regional	Regional	Regional	Regional
Fahrzeugtyp	Solo	Midsize	Van	Solo	Midsize	Midsize	Van	Solo	Midsize	Midsize	Van
Bedienung	Priv	Priv	Priv	PT-NP	PT-NP	PT-P	PT-P	PT-NP	PT-NP	PT-P	PT-P
Nachtstunden											
Betriebsstunden_AV [h]	0.32 [a]	0.32 [a]	0.32 [a]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]
Betriebsstunden [h]	0.32 [a]	0.32 [a]	0.32 [a]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]	3.80 [b]
relAktiveZeit [%]	100.00	100.00	100.00	57.00 [c]	57.00 [c]	57.00 [c]	57.00 [c]	57.00 [c]	57.00 [c]	57.00 [c]	57.00 [c]
avBelegung [%]	100.00	33.50 [a]	16.75 [a]	100.00	33.50 [a]	65.00 [d]	32.50 [d]	100.00	33.50 [a]	65.00 [d]	32.50 [d]
avGeschwindigkeit [km/h]	32.40 [a]	32.40 [a]	32.40 [a]	20.60 [a]	20.60 [a]	20.60 [a]	20.60 [a]	31.30 [a]	31.30 [a]	31.30 [a]	31.30 [a]
avWeglängePass [km]	15.00 [a]	15.00 [a]	15.00 [a]	3.40 [a]	3.40 [a]	3.40 [a]	3.40 [a]	8.00 [a]	8.00 [a]	8.00 [a]	8.00 [a]
relLeerfahrten [%]	0.00	0.00	0.00	8.00 [e]	8.00 [e]	8.00 [e]	8.00 [e]	15.00 [c]	15.00 [c]	15.00 [c]	15.00 [c]
relWartungsfahrten [%]	0.00	0.00	0.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00

Abkürzungen:
*: Allgemein
Priv.: Privateigentum
PT-P: ÖV mit Pooling
PT-NP: ÖV nicht gepoolt, besonders relevant für Mittelklasse Taxis
av…: durchschnittlich
rel…: relativ

a) Daten: Swiss Federal Statistical Office (BFS) and Swiss Federal Office for Spatial Development (ARE) (2012)
b) Annahme: Definierte Dauer, abzüglich der Wartung
c) Daten: Bösch *et al.* (2016)
d) Daten: International Transport Forum (2015)
e) Quelle: Fagnant *et al.* (2015)

Tab. 31 *Durchschnittliche Nutzung des Linienverkehrs*

Transportart			
Bereich	Urban	Regional	Regional
Fahrzeugtyp	Stadtbus	Regionalbus	Zug
Bedienung	PT	PT	PT
Betriebsstunden_AV [h]	19 [a]	19 [a]	19 [a]
Betriebsstunden [h]	19 [a]	19 [a]	19 [a]
relAktivzeit [%]	85 [b]	85 [b]	85 [b]
avBelegung [%]	22.42 [c]	12.6 [c]	22.7 [d]
avGeschwindigkeit [km/h]	21.31 [c]	20.89 [c]	37.82 [c]
avWeglängepPass [km]	–	–	–
relLeerfahrten [%]	0	0	0
relWartungsfahrten [%]	5	5	5

a) Annahme: 24h minus Nachruhe
b) Daten: Zürcher Verkehrsverbund (2017)
c) Daten: Bundesamt für Verkehr (2011)
d) Quelle: SBB AG (2016)

I.4 Detaillierte Kosten für verschiedene Modi

Tab. 32 *Detaillierte Kosten für verschiedene Modi*

Fahrzeugtyp	Bereich	Betrieb	Lenkung	Antrieb	KostFzgKM [CHF]	KostSitzKM [CHF]	KostPassKM [CHF]
Bus	Reg	PT-P	Aut	Elec	–	0.05	0.38
Bus	Reg	PT-P	N. aut	Elec	–	0.11	0.84
Bus	Reg	PT-P	Aut	N. elec	–	0.05	0.40
Bus	Reg	PT-P	N. aut	N. elec	–	0.11	0.89
Bus	Urb	PT-P	Aut	Elec	–	0.05	0.23
Bus	Urb	PT-P	N. aut	Elec	–	0.11	0.50
Bus	Urb	PT-P	Aut	N. elec	–	0.05	0.24
Bus	Urb	PT-P	N. aut	N. elec	–	0.12	0.53

Fahrzeugtyp	Bereich	Betrieb	Lenkung	Antrieb	KostFzgKM [CHF]	KostSitzKM [CHF]	KostPassKM [CHF]
Midsize	*	Priv	Aut	Elec	0.67	0.17	0.47
Midsize	*	Priv	N. aut	Elec	0.63	0.16	0.44
Midsize	*	Priv	Aut	N. elec	0.72	0.18	0.50
Midsize	*	Priv	N. aut	N. elec	0.69	0.17	0.48
Midsize	Reg	PT-NP	Aut	Elec	0.35	0.09	0.31
Midsize	Reg	PT-NP	N. aut	Elec	2.16	0.54	1.90
Midsize	Reg	PT-NP	Aut	N. elec	0.37	0.09	0.32
Midsize	Reg	PT-NP	N. aut	N. elec	2.19	0.55	1.92
Midsize	Reg	PT-P	Aut	Elec	0.39	0.10	0.20
Midsize	Reg	PT-P	N. aut	Elec	2.16	0.54	1.12
Midsize	Reg	PT-P	Aut	N. elec	0.41	0.10	0.21
Midsize	Reg	PT-P	N. aut	N. elec	2.19	0.55	1.13
Midsize	Urb	PT-NP	Aut	Elec	0.48	0.12	0.39
Midsize	Urb	PT-NP	N. aut	Elec	3.35	0.84	2.70
Midsize	Urb	PT-NP	Aut	N. elec	0.51	0.13	0.41
Midsize	Urb	PT-NP	N. aut	N. elec	3.38	0.85	2.73
Midsize	Urb	PT-P	Aut	Elec	0.58	0.15	0.28
Midsize	Urb	PT-P	N. aut	Elec	3.35	0.84	1.60
Midsize	Urb	PT-P	Aut	N. elec	0.61	0.15	0.29
Midsize	Urb	PT-P	N. aut	N. elec	3.38	0.85	1.61

Fahrzeugtyp	Bereich	Betrieb	Lenkung	Antrieb	KostFzgKM [CHF]	KostSitzKM [CHF]	KostPassKM [CHF]
Minibus	Reg	PT-P	Aut	Elec	0.61	0.03	0.31
Minibus	Reg	PT-P	N. aut	Elec	2.37	0.12	1.23
Minibus	Reg	PT-P	Aut	N. elec	0.67	0.03	0.35
Minibus	Reg	PT-P	N. aut	N. elec	2.44	0.12	1.26
Minibus	Urb	PT-P	Aut	Elec	0.98	0.05	0.24
Minibus	Urb	PT-P	N. aut	Elec	1.89	0.09	0.46
Minibus	Urb	PT-P	Aut	N. elec	1.04	0.05	0.25
Minibus	Urb	PT-P	N. aut	N. elec	1.96	0.10	0.47
Zug	Reg	PT-P	Aut	Elec	–	0.10	0.44
Zug	Reg	PT-P	N. aut	Elec	–	0.11	0.47
Zug	Reg	PT-P	Aut	N. elec	–	0.10	0.44
Zug	Reg	PT-P	N. aut	N. elec	–	0.11	0.47
Solo	*	Priv	Aut	Elec	0.35	0.35	0.35
Solo	*	Priv	N. aut	Elec	0.33	0.33	0.33
Solo	*	Priv	Aut	N. elec	0.38	0.38	0.38
Solo	*	Priv	N. aut	N. elec	0.38	0.38	0.38
Solo	Reg	PT-NP	Aut	Elec	0.23	0.23	0.28
Solo	Reg	PT-NP	N. aut	Elec	2.07	2.07	2.59
Solo	Reg	PT-NP	Aut	N. elec	0.25	0.25	0.31
Solo	Reg	PT-NP	N. aut	N. elec	2.09	2.09	2.62
Solo	Urb	PT-NP	Aut	Elec	0.34	0.34	0.39
Solo	Urb	PT-NP	N. aut	Elec	3.26	3.26	3.74
Solo	Urb	PT-NP	Aut	N. elec	0.36	0.36	0.41
Solo	Urb	PT-NP	N. aut	N. elec	3.28	3.28	3.77

Fahrzeugtyp	Bereich	Betrieb	Lenkung	Antrieb	KostFzgKM [CHF]	KostSitzKM [CHF]	KostPassKM [CHF]
Van	*	Priv	Aut	Elec	1.14	0.14	0.80
Van	*	Priv	N. aut	Elec	1.04	0.13	0.73
Van	*	Priv	Aut	N. elec	1.22	0.15	0.86
Van	*	Priv	N. aut	N. elec	1.14	0.14	0.80
Van	Reg	PT-P	Aut	Elec	0.55	0.07	0.28
Van	Reg	PT-P	N. aut	Elec	2.31	0.29	1.19
Van	Reg	PT-P	Aut	N. elec	0.58	0.07	0.30
Van	Reg	PT-P	N. aut	N. elec	2.35	0.29	1.21
Van	Urb	PT-P	Aut	Elec	0.74	0.09	0.35
Van	Urb	PT-P	N. aut	Elec	3.49	0.44	1.66
Van	Urb	PT-P	Aut	N. elec	0.77	0.10	0.37
Van	Urb	PT-P	N. aut	N. elec	3.54	0.44	1.69

Abkürzungen:
Reg: Regional (Vorstadt und Ausserorts)
Urb: Urban
*: Allgemein
Priv: Privateigentum (Für Privateigentum wurde das Gebiet nicht differenziert (siehe durchschnittlicher Gebrauch), sodass sich für beide Regionen die gleichen Werte ergeben)
PT-P: PT mit Pooling
PT-NP: PT Non-Pooling, besonders relevant für Mittelklasse Taxis
Aut: Automatisiert
N. aut: Nicht automatisiert
Elec: Elektrifiziert
N. elec: Nicht elektrifiziert

II Simulationen

II.1 Stadtgebiet

Tab. 33 *Simulationsergebnisse (Stadt)*

Gebiert			**Stadt**				
Szenario	*Grundszenario*		*Taxi-AVs*		*Private AVs*		
ÖV-Preis	Voll	1/2	Voll	1/2	Voll	1/2	Abb.
Reisen							
Reisen nach Verkehrsmittel							
Individualverkehr [x1000]	270.48	239.30	215.41	186.95	35.93	33.98	
Offentlicher Verkehr [x1000]	179.04	218.68	161.78	200.15	136.67	161.64	
Fahrrad [x1000]	66.81	60.24	52.24	48.11	61.20	53.07	
Zu Fuss [x1000]	348.95	346.95	336.78	334.12	301.68	297.25	
Taxi-AV [x1000]	0.00	0.00	99.10	95.96	0.00	0.00	
Privates AV [x1000]	0.00	0.00	0.00	0.00	329.92	319.49	
Verkehrsmittelanteil (Reisen)							
Individualverkehr [%]	31.26	27.66	24.89	21.61	4.15	3.93	
Offentlicher Verkehr [%]	20.69	25.28	18.70	23.13	15.79	18.68	
Fahrrad [%]	7.72	6.96	6.04	5.56	7.07	6.13	
Zu Fuss [%]	40.33	40.10	38.92	38.61	34.86	34.35	
Taxi-AV [%]	0.00	0.00	11.45	11.09	0.00	0.00	
Privates AV [%]	0.00	0.00	0.00	0.00	38.12	36.92	
Reisedistanz nach Verkehrsmittel							
Individualverkehr [1000 km]	1054.84	911.95	835.80	712.70	127.77	116.18	
Offentlicher Verkehr [1000 km]	1065.75	1267.70	966.60	1158.58	776.20	893.63	37
Fahrrad [1000 km]	117.70	95.62	80.82	69.42	105.73	82.41	
Zu Fuss [1000 km]	189.42	187.90	178.86	174.85	154.14	150.77	
Taxi-AV [1000 km]	0.00	0.00	353.21	331.33	0.00	0.00	
Privates AV [1000 km]	0.00	0.00	0.00	0.00	1202.30	1149.80	
Gesamt [1000 km]	*2427.71*	*2463.17*	*2415.29*	*2446.88*	*2366.14*	*2392.79*	
Verkehrsmittelanteil (Reisedistanz)							33
Individualverkehr [%]	43.45	37.02	34.60	29.13	5.40	4.86	
Offentlicher Verkehr [%]	43.90	51.47	40.02	47.35	32.80	37.35	
Fahrrad [%]	4.85	3.88	3.35	2.84	4.47	3.44	
Zu Fuss [%]	7.80	7.63	7.41	7.15	6.51	6.30	
Taxi-AV [%]	0.00	0.00	14.62	13.54	0.00	0.00	
Privates AV [%]	0.00	0.00	0.00	0.00	50.81	48.05	
Reisezeit nach Verkehrsmittel							
Individualverkehr [kh]	50.81	39.39	38.72	29.84	5.33	4.58	
Offentlicher Verkehr [kh]	64.15	77.87	58.24	71.01	47.36	55.38	
Fahrrad [kh]	11.76	9.55	8.07	6.94	10.56	8.23	
Zu Fuss [kh]	37.84	37.53	35.73	34.92	30.79	30.11	
Taxi-AV [kh]	0.00	0.00	26.46	24.29	0.00	0.00	
Privates AV [kh]	0.00	0.00	0.00	0.00	53.25	47.11	
Gesamt [kh]	*164.56*	*164.34*	*167.22*	*167.00*	*147.29*	*145.41*	

Gebiet			**Stadt**				
Szenario	*Grundszenario*		*Taxi-AVs*		*Private AVs*		
ÖV-Preis	Voll	1/2	Voll	1/2	Voll	1/2	Abb.
Verkehrsmittelanteil (Reisezeit)							
Individualverkehr [%]	30.88	23.97	23.15	17.87	3.62	3.15	
Offentlicher Verkehr [%]	38.98	47.38	34.83	42.52	32.16	38.08	
Fahrrad [%]	7.15	5.81	4.83	4.15	7.17	5.66	
Zu Fuss [%]	22.99	22.84	21.37	20.91	20.90	20.71	
Taxi-AV [%]	0.00	0.00	15.82	14.55	0.00	0.00	
Privates AV [%]	0.00	0.00	0.00	0.00	36.15	32.40	
Fahrzeugdistanz							
nach Verkehrsmittel							34
Individualverkehr [1000 km]	1054.84	911.95	835.80	712.70	127.77	116.18	
Offentlicher Verkehr [1000 km]	150.09	150.09	150.09	150.09	150.09	150.09	
Taxi-AV [1000 km]	0.00	0.00	509.40	478.60	0.00	0.00	
Privates AV [1000 km]	0.00	0.00	0.00	0.00	1376.20	1333.97	
Gesamt [1000 km]	*1204.93*	*1062.05*	*1495.30*	*1341.39*	*1654.07*	*1600.24*	
Anteil							
Individualverkehr [%]	87.54	85.87	55.90	53.13	7.72	7.26	
Offentlicher Verkehr [%]	12.46	14.13	10.04	11.19	9.07	9.38	
Taxi-AV [%]	0.00	0.00	34.07	35.68	0.00	0.00	
Privates AV [%]	0.00	0.00	0.00	0.00	83.20	83.36	
Leerdistanz							
nach Angebot							35
Taxi-AV [1000 km]	0.00	0.00	141.70	133.22	0.00	0.00	
Privates AV [1000 km]	0.00	0.00	0.00	0.00	125.05	136.63	
im Angebot							
Taxi-AV [%]	-	-	27.82	27.84	-	-	
Privates AV [%]	-	-	-	-	9.09	10.24	
im System							
Taxi-AV [%]	0.00	0.00	9.48	9.93	0.00	0.00	
Privates AV [%]	0.00	0.00	0.00	0.00	7.56	8.54	
Anzahl Fahrzeuge							36
Individualverkehr [x1000]	107.60	97.87	91.02	82.08	16.21	15.20	
Taxi-AV [x1000]	0.10	0.10	3.00	3.00	0.10	0.10	
Privates AV [x1000]	0.00	0.00	0.00	0.00	135.31	133.43	
Gesamt [x1000]	107.70	97.97	94.02	85.08	151.62	148.73	
Nutzerperspektive							
Tageskosten							
Kumulativ [MCHF]	2.38	2.87	4.75	3.64	2.56	2.92	38
Durchschnitt [CHF]	1.96	2.19	4.19	2.98	2.34	2.55	39
Median [CHF]	1.07	2.30	3.03	2.30	1.59	2.29	
Tagesreisezeit							
Kumulativ [kh]	164.41	163.90	166.92	166.74	147.29	145.42	40
Durchschnitt [min]	34.04	33.94	34.56	34.52	30.49	30.10	41
Median [min]	24.87	25.45	25.98	26.28	21.97	22.12	
Induzierte Reisen							
Reisen [1]	0.00	1710.03	164.98	1598.12	2617.46	2606.84	
Distanz [1000 km]	0.00	41.00	3.43	38.46	63.36	63.38	42

II.2 Gesamtgebiet

Tab. 34 *Simulationsergebnisse (Gesamtgebiet)*

Gebiet	**Gesamt**						
Szenario	*Grundszenario*		*Taxi-AVs*		*Private AVs*		
ÖV-Preis	Voll	1/2	Voll	1/2	Voll	1/2	Abb
Reisen							
Reisen nach Verkehrsmittel							
Individualverkehr [x1000]	2590.63	2477.10	2522.31	2419.84	390.58	384.90	
Offentlicher Verkehr [x1000]	1197.18	1331.12	1187.77	1318.10	976.17	1064.36	
Fahrrad [x1000]	523.32	495.90	510.20	483.27	482.13	452.54	
Zu Fuss [x1000]	1625.39	1631.75	1617.43	1618.96	1438.62	1433.13	
Taxi-AV [x1000]	0.00	0.00	99.10	95.96	0.00	0.00	
Privates AV [x1000]	0.00	0.00	0.00	0.00	2651.05	2603.67	
Verkehrsmittelanteil (Reisen)							
Individualverkehr [%]	43.64	41.73	42.49	40.76	6.58	6.48	
Offentlicher Verkehr [%]	20.17	22.43	20.01	22.20	16.44	17.92	47
Fahrrad [%]	8.82	8.35	8.59	8.14	8.12	7.62	
Zu Fuss [%]	27.38	27.49	27.24	27.27	24.23	24.13	
Taxi-AV [%]	0.00	0.00	1.67	1.62	0.00	0.00	
Privates AV [%]	0.00	0.00	0.00	0.00	44.64	43.84	
Reisedistanz nach Verkehrsmittel							43
Individualverkehr [1000 km]	27305.79	26403.52	26933.01	26105.36	4079.15	4014.28	
Offentlicher Verkehr [1000 km]	19172.29	20250.57	19226.95	20246.20	15165.12	15777.73	
Fahrrad [1000 km]	1481.64	1393.14	1452.41	1366.74	1401.41	1295.41	
Zu Fuss [1000 km]	1171.93	1174.59	1162.84	1164.49	1021.80	1018.27	
Taxi-AV [1000 km]	0.00	0.00	353.21	331.33	0.00	0.00	
Privates AV [1000 km]	0.00	0.00	0.00	0.00	27209.71	26840.21	
Gesamt [1000 km]	*49131.65*	*49221.82*	*49128.42*	*49214.12*	*48877.19*	*48945.90*	
Verkehrsmittelanteil (Reisedistanz)							
Individualverkehr [%]	55.58	53.64	54.82	53.04	8.35	8.20	
Offentlicher Verkehr [%]	39.02	41.14	39.14	41.14	31.03	32.24	
Fahrrad [%]	3.02	2.83	2.96	2.78	2.87	2.65	
Zu Fuss [%]	2.39	2.39	2.37	2.37	2.09	2.08	
Taxi-AV [%]	0.00	0.00	0.72	0.67	0.00	0.00	
Privates AV [%]	0.00	0.00	0.00	0.00	55.67	54.84	
Reisezeit nach Verkehrsmittel							
Individualverkehr [kh]	644.59	602.22	623.17	586.70	84.09	81.74	
Offentlicher Verkehr [kh]	978.66	1045.20	979.74	1044.09	802.90	842.50	
Fahrrad [kh]	148.09	139.25	145.17	136.61	140.07	129.48	
Zu Fuss [kh]	234.17	234.70	232.35	232.68	204.17	203.46	
Taxi-AV [kh]	0.00	0.00	26.46	24.29	0.00	0.00	
Privates AV [kh]	0.00	0.00	0.00	0.00	631.49	612.06	
Gesamt [kh]	*2005.51*	*2021.37*	*2006.89*	*2024.37*	*1862.72*	*1869.24*	
Verkehrsmittelanteil (Reisezeit)							
Individualverkehr [%]	32.14	29.79	31.05	28.98	4.51	4.37	
Offentlicher Verkehr [%]	48.80	51.71	48.82	51.58	43.10	45.07	
Fahrrad [%]	7.38	6.89	7.23	6.75	7.52	6.93	
Zu Fuss [%]	11.68	11.61	11.58	11.49	10.96	10.88	
Taxi-AV [%]	0.00	0.00	1.32	1.20	0.00	0.00	
Privates AV [%]	0.00	0.00	0.00	0.00	33.90	32.74	

Gebiet	**Stadt**						
Szenario	*Grundszenario*		*Taxi-AVs*		*Private AVs*		
ÖV-Preis	Voll	1/2	Voll	1/2	Voll	1/2	Abb
Fahrzeugdistanz							
nach Verkehrsmittel							44
Individualverkehr [1000 km]	27305.7	26403.5	26933.0	26105.3	4079.15	4014.28	
Offentlicher Verkehr [1000 km]	424.56	424.56	424.56	424.56	424.56	424.56	
Taxi-AV [1000 km]	0.00	0.00	509.40	478.60	0.00	0.00	
Privates AV [1000 km]	0.00	0.00	0.00	0.00	29409.8	29113.0	
Gesamt [1000 km]	*27730.3*	*26828.0*	*27866.9*	*27008.5*	*33913.5*	*33551.9*	
Anteil							
Individualverkehr [%]	98.47	98.42	96.65	96.66	12.03	11.96	
Offentlicher Verkehr [%]	1.53	1.58	1.52	1.57	1.25	1.27	
Taxi-AV [%]	0.00	0.00	1.83	1.77	0.00	0.00	
Privates AV [%]	0.00	0.00	0.00	0.00	86.72	86.77	
Leerdistanz							
nach Angebot							45
Taxi-AV [1000 km]	0.00	0.00	141.70	133.22	0.00	0.00	
Privates AV [1000 km]	0.00	0.00	0.00	0.00	1711.82	1791.73	
im Angebot							
Taxi-AV [%]	-	-	27.82	27.84	-	-	
Privates AV [%]	-	-	-	-	5.82	6.15	
im System							
Taxi-AV [%]	0.00	0.00	0.51	0.49	0.00	0.00	
Privates AV [%]	0.00	0.00	0.00	0.00	5.05	5.34	
Anzahl Fahrzeuge							46
Individualverkehr [x1000]	820.37	794.94	804.02	780.62	154.46	152.53	
Taxi-AV [x1000]	0.10	0.10	3.00	3.00	0.10	0.10	
Privates AV [x1000]	0.00	0.00	0.00	0.00	803.73	797.78	
Gesamt [x1000]	820.47	795.04	807.02	783.62	958.29	950.41	
Nutzerperspektive							
Tageskosten							
Kumulativ [MCHF]	49.28	51.79	52.55	52.82	53.39	55.28	48
Durchschnitt [CHF]	5.37	5.43	5.78	5.59	6.32	6.39	49
Median [CHF]	2.56	2.74	3.04	2.96	2.95	3.11	
Tagesreisezeit							
Kumulativ [kh]	1897.16	1912.32	1897.64	1915.14	1757.44	1764.28	50
Durchschnitt [min]	72.68	73.27	72.70	73.37	67.32	67.58	51
Median [min]	52.45	53.25	52.65	53.43	48.80	49.15	
Induzierte Reisen							
Reisen [1]	0.00	3637.44	794.86	3537.17	9591.48	9216.03	
Distanz [1000 km]	0.00	91.89	22.61	94.75	267.39	252.46	52

Literaturverzeichnis

[1]	2025AD (2016) Mitsubishi boosts driverless cars, https://www.2025ad.com/in-thenews/news/mitsubishi-boosts-driverless-cars/, April 2016.
[2]	abh Market Research (2007) Autowäsche in Deutschland, Ein Markt mit Potenzial, Technischer Bericht.
[3]	Abhishek, V., Guajardo, J.A. und Zhang, Z. (2016) Business Models in the Sharing Economy: Manufacturing Durable Goods in the Presence of Peer-to-peer Rental Markets, https://ssrn.com/abstract=2891908, März 2017.
[4]	Abutaleb, Y. (2016) Renault-Nissan alliance plans self-driving cars over next four years,
[5]	http://www.reuters.com/article/us-autos-nissan-autonomousidUSKBN0UL23F20160107, Januar 2016.
[6]	Ackerman, E. (2017) Hail, robo-taxi![top tech 2017]. *IEEE Spectrum*, **54**, 26–29.
[7]	Ackerman, E. (2016) Ford and Baidu Invest $150 Million in Velodyne for Affordable Lidar for
[8]	Self-Driving Cars, http://spectrum.ieee.org/cars-that-think/transportation/sensors/ford-and-baidu-invest-150-million-invelodyne-for-affordable-automotive-lidar, August 2016.
[9]	Adell, E. (2009) Driver Experience and Acceptance of Driver Support Systems—A Case of Speed Adaptation, Lund University, Lund.
[10]	Agarwal, P. und Varadarajan, K. (2004) A near-linear constant-factor approximation for euclidean bipartite matching? *Proceedings of the twentieth annual symposium on Computational geometry*, 247–252.
[11]	Alessandrini, A., A. Campagna, P. D. Site, F. Filippi und L. Persia (2015) Automated vehicles and the rethinking of mobility and cities, Transportation Research Procedia, 5, 145–160.
[14]	Ambühl, L., F. Ciari und M. Menendez (2016) What about space? A simulation based assessment of AVs impact on road space in urban areas, Bericht präsentiert an der *16th Swiss Transport Research Conference*, Ascona, Mai 2016.
[15]	Amirtha, T. (2016) Forget self-driving cars: What about self-flying drones?, http://www.zdnet.com/article/forget-self-driving-cars-what-aboutself-flying-drones/, Mai 2016.
[16]	Anders, G. (2016) Toyota Makes a U-Turn on Autonomous Cars, https://www.technologyreview.com/s/601504/toyota-makes-a-u-turn-on-autonomous-cars/, Juni 2016.
[17]	Anderson, J., N. Kalra, K. Stanley, P. Sorensen, C. Samaras und O. Oluwatola (2016) *Autonomous Vehicle Technology: A Guide for Policymakers*, RAND Corporation, Santa Monica.
[18]	Aria, E., J. Olstam und C. Schwietering (2016) Investigation of Automated Vehicle Effects on Driver's Behavior and Traffic Performance, *Transportation Research Procedia*, **15**, 761–770, ISSN 23521465.
[19]	Atra (2008) Stadsregio Rotterdam Business Park Rivium, http://www.advancedtransit.org/advanced-transit/applications/rivium/.
[20]	Auld, J., M. Hope, H. Ley, V. Sokolov, B. Xu und K. Zhang (2016) Polaris: Agent-based modeling framework development and implementation for integrated travel demand and network and operations simulations, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **64**, 101 – 116.
[21]	Autop (2016) Preisliste Richterswil, http://autop.ch/dienstleistungen/waschstrassen, November 2016.
[22]	Azmat, M., C. Schuhmayer und S. Kummer (2016) Innovation in mobility: Austrian Expert's Perspective on the future of urban mobility with self-driving cars, Bericht präsentiert an der *Quality and Business Management Conference*, 142–160, Dubai.
[23]	Baines, T., H. Lightfoot, O. Benedettini und J. Kay (2009) The servitization of manufacturing, *Journal of Manufacturing Technology Management*, **20** (5) 547–567.
[24]	Baldwin, R. (2016a) BMW's autonomous luxury car will launch in 2021, https://www.engadget.com/2016/05/12/bmws-autonomous-luxury-car-willlaunch-in-2021/, Dezember 2016.
[25]	Baldwin, R. (2016b) Inside Honda's ghost town for testing autonomous cars, https://www.engadget.com/2016/06/02/inside-honda-gomentum-station/, Februar 2016.
[26]	Bansal, P. und K. M. Kockelman (2016) Forecasting Americans' Long-Term Adoption of Connected and Autonomous Vehicle Technologies,Bericht präsentiert an *Transportation Research Board 95th Annual Meeting*, vol. **16**-1871.
[27]	Bansal, P. und K. M. Kockelman (2016) Are We Ready To Embrace Connected And Self-Driving Vehicles? A Case Study of Texans, *Transportation*, **40**, 1-35.
[28]	Bansal, P., K. M. Kockelman und A. Singh (2016) Assessing public opinions of and interest in new vehicle technologies: An Austin perspective, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **67**, 1–14.
[29]	Barlow, G., I. Isukapati, S. Smith, S. Dey, S. Dock, B. Perez und A. Pochowski (2018) Measuring Cruising for Parking in Washington, DC Using Dense, Ubiquitous AVI Sensor Networks, Bericht präsentiert an *97st Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., Januar 2018.
[30]	Barter, P. A. (2012) Off-street parking policy surprises in Asian cities, *Cities*, **29**, 23-31.
[31]	Barter, P. A. (2011) Parking requirements in some major Asian cities, Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, **2245**, 79-86.

[32]	Bazilinskyy, P., M. Kyriakidis und J. de Winter (2015) An International Crowdsourcing Study into People's Statements on Fully Automated Driving, *Procedia Manufacturing*, **3** (3) 2534–2542, ISSN 23519789.
[33]	Becker, F. und K. W. Axhausen (2017) Predicting the use of automated vehicles. [Erste Resultate der Pilotstudie], in: *17th Swiss Transport Research Conference*, Ascona, Mai 2017.
[34]	Becker, F., K.W. Axhausen (2017) Literature review on surveys investigating the acceptance of automated vehicles, Transportation, **44** (6), 1293-1306.
[35]	Becker, H., F. Becker, R. Abe, S. Bekhor, P. F. Belgiawan, J. Compostella, E. Frazzoli, L. M. Fulton, N. Garrick, D. Guggisberg Bicudo, K. Murthy Gurumurthy, D. A. Hensher, J. W. Joubert, K. M. Kockelman, L. Kröger, T. Kuhnimhof, S. Le Vine, J. Malike, K. Marczuk, R. Ashari Nasution, J. Rich, A. Papu Carrone, D. Shen, Y. Shiftan, A. Tirachini, D. Verdis, Y. Z. Wong, M. Zhang, P. M. Bösch und K. W. Axhausen (2018) Impact of vehicle automation and electric propulsion on production costs for mobility services worldwide, *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, **1371**, IVT, ETH Zurich, Zurich.
[36]	Becker, H., F. Ciari und K. W. Axhausen (2016) Comparing Car-Sharing Schemes in Switzerland: User Groups and Usage Patterns, in *95th Annual Meeting of the Transportation Research Board,* **16**–3277, Washington D.C., Januar 2016.
[37]	Becker, H., F. Ciari und K. W. Axhausen (2017) Empirical analysis of free-floating car-sharing usage patterns in Switzerland, *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, **1226**, IVT, ETH Zurich, Zurich.
[38]	Behrmann, E. (2016) Continental AG Working on Self-Driving Partnerships to Rival BMW, *Bloomberg*, https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-08-03/continental-ag-working-on-self-driving-partnerships-to-rival-bmw, August 2016.
[39]	Bell, L. (2016) Mercedes-Benz unveils 'public transport of the future': a self-driving city bus, http://www.wired.co.uk/article/mercedes-benz-unveils-a-selfdriving-city-bus, Juli 2016.
[40]	Bernhart, W., I. Olschewski, C. Burkard und S. Galander (2016) Automated Vehicles Index, *Study*, **Q1 2016**, Roland Berger GmbH - Automotive Competence Center & fka Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen.
[41]	Berrada, J. und F. Leurent (2017) Modeling Transportation Systems involving Autonomous Vehicles: A State of the Art, *Transportation Research Procedia*, **27**, 215-221.
[42]	Bertoncello, M. und D. Wee (2015) Ten ways autonomous driving could redefine the automotive world, *Article*, McKinsey&Company
[43]	Bierstedt, J., A. Gooze, C. Gray, J. Peterman, L. Raykin und J. Walters (2014) Effects of next-generation vehicles on travel demand and highway capacity, *White Paper*
[44]	Bischoff, J. und K. Nagel (2017) Integrating explicit parking search into a transport simulation, *Procedia Computer Science*, **109**, 881-886.
[45]	Bischoff, J. und M. Maciejewski (2016a) Autonomous taxicabs in Berlin – a spatiotemporal analysis of service performance, paper presented at the *International Scientific Conference on Mobility and Transport Transforming Urban Mobility*, München, Juni 2016.
[46]	Bischoff, J. und M. Maciejewski (2016b) Simulation of City-wide Replacement of Private Cars with Autonomous Taxis in Berlin, *Procedia Computer Science*, **83**, 237–244.
[47]	Blens, S. (2015) 30 beliebte Firmenwagen im Rabattcheck, *Presseinformation*, MeinAuto.de, Köln, Juli 2015.
[48]	Bösch, P.M., F. Becker, H. Becker und K.W. Axhausen (2018) Cost-based analysis of autonomous mobility services, *Transport Policy*, **64**, 76-01.
[49]	Bösch, P.M., K. Müller und F. Ciari (2016) The ivt 2015 baseline scenario. *16th Swiss Transport Research Conference*, Ascona, Mai 2016.
[50]	Boesch, P.M., Ciari und F., Axhausen, K.W., 2016. Autonomous vehicle fleet sizes required to serve different levels of demand. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* , 111–119.
[51]	Boesch, P. M. und F. Ciari (2015) Agent-based simulation of autonomous cars, Artikel präsentiert an der *2015 American Control Conference (ACC)*, Chicago, Juli 2015.
[52]	Boesch, P. M., F. Ciari und K. W. Axhausen (2015) Required autonomous vehicle fleet sizes to serve different levels of demand, Transport Research Record, **2542**, 111 - 119.
[53]	Bonnefon, J.-F., A. Shariff und I. Rahwan (2016) The social dilemma of autonomous vehicles, *Science*, **352** (6293) 1573–1576.
[54]	Braendle, T. (2013) Wie viel kostet ein Mitarbeiter wirklich? https://www.runmyaccounts.ch/2013/07/wie-viel-kostet-einmitarbeiter-wirklich/, Oktober 2016.
[55]	Braess, D. (1968) Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung, *Unternehmensforschung*, **12**, 258–268.
[56]	Brewster, S. (2016) Uber starts self-driving car pickups in Pittsburgh, https://techcrunch.com/2016/09/14/1386711/, September 2016.
[57]	Brown, B., M. Drew, C. Erenguc, M. Hasegawa, R. Hill, S. Schmith, und B. Ganula (2014) Global Automotive Consumer Study: The Changing Nature of Mobility—Exploring Consumer Preferences in Key Markets around the World, Bericht, http://www2.deloitte.com/au/en/pages/manufacturing/articles/2014-globalautomotive-consumer-study.html.
[58]	Buhr, S. (2016) Uber and Toyota confirm strategic investment and auto leasing deal, https://techcrunch.com/2016/05/24/uber-and-toyota-confirm-strategicdeal, Mai 2016.
[59]	Bundesamt für Raumentwicklung (2014) SP-Befragung 2015 zum Verkehrsverhalten, *Zwischenbericht*.
[60]	Bundesamt für Statistik (2016) Statistik der Bevölkerung und der Haushalte (STATPOP)

[61]	Bundesamt für Verkehr (2011) Kennzahlen Regionaler Personenverkehr mit Erschliessungsfunktion, https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/das-bav/aufgaben-des-amtes/finanzierung/finanzierungverkehr/personenverkehr/rpv-mit-erschliessungsfunktion/rpv-kennzahlen.html, November 2016.
[62]	Burmeister, G., S. Engels, B. Hamm und A. Kraus (2014) Automated Vehicles for a Sustainable City, *White Paper*, University of Michigan, Ann Arbor.
[63]	Burns, L.D. (2013) Sustainable mobility: a vision of our transport future. *Nature* **497**, 181–182.
[64]	Burns, L.D., W. Jordan, B. Scarborough (2013) Transforming Personal Mobility, *Technical Report*. The Earth Institute, Columbia University.
[65]	Canella, O., G. Flötteröd und J. Thelin (2017) IHOP3 – Economically consistent simulation of travel behavior with MATSim. *Technical Report*, KTH, Sweco, WSP.
[66]	Canzler, W. und A. Knie (1994). Das Ende des Automobils: Fakten und Trends zum Umbau der Autogesellschaft, 1 edn., C.F. Müller, Heidelberg.
[67]	Cao, J. (2016) Effects of parking on urban traffic performance, *Dissertation*, ETH Zürich, Zürich.
[68]	Chakirov, A. und P. J. Fourie (2015) Enriched Sioux Falls Scenario with Dynamic And Disaggregate Demand, *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, **978**, IVT, ETH Zurich, Zurich.
[69]	Chen, T. D. und K. M. Kockelman (2016) Management of a Shared Autonomous Electric Vehicle Fleet: Implications of Pricing Schemes, *Transportation Research Record*, **2572**, 37-46.
[70]	Chen, T.D., K. M. Kockelman und J.P. Hanna (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.
[71]	Chen, T. D. (2015) Management of a Shared, Autonomous, Electric Vehicle Fleet: Vehicle Choice, Charging Infrastructure & Pricing Strategies, *Dissertation*, University of Texas at Austin.
[72]	Childress S, B. Nichols, B. Charlton et al.(2015) Using an activity-based model to explore the potential impacts of automated vehicles. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2493**, 99-106.
[73]	Christie, D., A. Koymans, T. Chanard, J.-M. Lasgouttes und V. Kaufmann (2016) Pioneering Driverless Electric Vehicles in Europe: The City Automated Transport System (CATS), *Transportation Research Procedia*, **13**, 30–39.
[74]	City of Gothenburg (2016) DriveME self driving cars for sustainable mobility, http://international.goteborg.se/smart-cities-and-sustainablesolutions/driveme-self-driving-cars-sustainable-mobility.
[75]	Clark, B., G. Parkhurst und M. Ricci (2016) Understanding the Socioeconomic Adoption Scenarios for Autonomous Vehicles: A Literature Review, *Project Report*, University of the West of England, Bristol.
[76]	Continental (2014) Motorists Worldwide Open to Automated Driving, *Presseerklärung,* https://www.continental-corporation.com/en/press/motorists-worldwide-open-to-automated-driving-7460, Hannover, Januar, 2014.
[77]	Continental (2013) German Motorists Want Automated Freeway Driving, *Presseerklärung*, https://www.continental-corporation.com/en/press/german-motorists-want-automated-freeway-driving-7398, Hannover, Dezember 2013.
[78]	Comparis AG (2016) http://www.comparis.ch/, November 2016.
[79]	Cremer, A. und J. Schwartz (2016) VW eyes transportation deals to boost self-driving car plans, http://www.reuters.com/article/us-volkswagen-strategyidUSKCN10U130, August 2016.
[80]	Cyganski, R., E. Fraedrich und B. Lenz (2015) Travel-Time Valuation for Automated Driving: A Use-case-driven study, Bericht des *94th Annual Meeting of the TRB*, Washington D.C., Januar 2015.
[81]	Dandl, F., B. Bracher, und K. Bogenberger (2017) Microsimulation of an autonomous taxi-system in Munich, präsentiert an der *5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems*, Naples, June 2017.
[82]	DARPA (2014) The DARPA Grand Challenge: Ten Years Later, http://www.darpa.mil/news-events/2014-03-13, März 2014.
[83]	Davies, A. (2017) Paris Launches a Self-Driving Shuttle Service, WIRED, https://www.wired.com/2017/01/tres-dinky-self-driving-shuttle-nudgesparis-future/, Februar 2018.
[84]	Davis, A. Y., B. C. Pijanowski, L. Robinson und B. Engel (2010) The environmental and economic costs of sprawling parking lots in the United States, *Land Use Policy*, **27** (2) 255-261.
[85]	Delhomme, P. (2002) : Croyances Des Jeunes Automobilistes En Matière de Vitesse, *Schlussbericht*, Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité, Paris, Dezember 2002.
[86]	Delling, D., T. Pajor und R.F. Werneck (2015) Round-Based Public Transit Routing, *Transportation Science*, **49** (3), 433-719.
[87]	Deloitte (2014) Global Automotive Consumer Study. Exploring consumers' mobility choices and transportation decisions, Deloitte Development LLC.
[88]	Dey, S., S. Dock, A. Pochowski, M. Sanders, M. Darst, E. Cardenas und B. Perez (2018) If You Price It, Will They Change? Assessing the Effects of Demand-Based Parking Pricing on Customer Behavior in Washington, D.C., präsentiert am *97st Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., January 2018.

[89] DHL Trend Research (2014) Self-Driving Vehicles in Logistics. A DHL perspective on implications and use cases for the logistics industry, DHL Customer Solutions & Innovation, Troisdorf.

[90] Diels, C. und J. E. Bos (2016) Self-driving carsickness, *Applied Ergonomics*, **53**, 374–382.

[91] Diez, W. (2016) Elektroautos mit deutlich niedrigeren Unterhaltskosten, http://www.ifa-info.de/downloads/3241%2FPresseinformation%2520Elektromobilit%25C3%25A4t%252020.11.12.pdf, November 2016.

[92] Dijk, M. und C. Montalvo (2011). Policy frames of Park-and-Ride in Europe. *Journal of Transport Geography*, **19** (6) 1106-1119.

[93] Dinham, P. (2016) Amazon Flex allows drivers to deliver packages within just half an hour of ordering, http://www.dailymail.co.uk/news/article-3700819/Amazon-Flexallows-drivers-deliver-packages-just-half-hour-ordering.html, Juli 2016.

[94] D'Onfro, J. (2016) Google autonomous delivery platform patent, http://uk.businessinsider.com/google-autonomous-delivery-platform-patent-2016-2?r=US{&}IR=T, Februar 2016.

[95] Dubernet, T. J. P. (2017) Explicitly Correlating Agent's Daily Plans in a Multiagent Transport Simulation: Towards the Consideration of Social Relationships, *Docotral Thesis*, ETH Zurich, Zurich.

[96] Eidgenössische Zollverwaltung (2017a) Pauschale Schwerverkehrsabgabe (PSVA) für Schweizer Fahrzeuge, https://www.ezv.admin.ch/ezv/de/home/information-firmen/transport–reisedokument–strassenabgaben/schwerverkehrsabgaben–lsva-und-psva-/pauschale-schwerverkehrsabgabe–phtml#681554958, Januar 2017.

[97] Eidgenössische Zollverwaltung, 2017b. Vignette (Autobahngebühren), https://www.ezv.admin.ch/ezv/de/home/informationprivate/reisedokumente-und-strassenabgaben/vignette–autobahngebuehren-.html, Februar 2017.

[98] Elsevier (2016) Sciencedirect, http://www.sciencedirect.com/.

[99] Enoch, M. P. (2015) How a rapid modal convergence into a universal automated taxi service could be the future for local passenger transport, *Technology Analysis & Strategic Management*, **27** (8) 910–924.

[100] Etherington, D. (2016) Volvo and Autoliv launch joint venture to create self-driving software, https://techcrunch.com/2016/09/06/volvo-and-autoliv-launchjoint-venture-to-create-self-driving-software/, September 2016.

[101] EV Volumes (2016) The Electric Vehicle World Sales Database, http://www.evvolumes.com/country/total-euefta-plug-in-vehicle-volumes-2/.

[102] Fagnant, D. J. und K. M. Kockelman (2018) Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas, *Transportation*, **45**, 143–158.

[103] Fagnant, D. J. und K. M. Kockelman (2015) Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **77**, 167–181.

[104] Fagnant, D. J. und K. M. Kockelman (2014) The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **40**, 1–13, ISSN 0968090X.

[105] Fagnant, D. J., K. M. Kockelman und P. Bansal (2015) Operations of Shared Autonomous Vehicle Fleet for Austin, Texas, Market, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2536**, 98–106.

[106] Federal Transit Administration (2016) National Transit Database - Urbanized Area,, http://www.apta.com/resources/statistics/Pages/NTDDataTables.aspx, Januar 2017

[107] Fernandes P. und U. Nunes (2012) Platooning with IVC-enabled autonomous vehicles: Strategies to mitigate communication delays, improve safety and traffic flow. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **13**(1), 91- 106.

[108] Fingas, J. (2016) Russia's search giant is making a self-driving shuttle bus, https://www.engadget.com/2016/08/28/yandex-teams-on-self-drivingshuttle-bus/, August 2016.

[109] Flämig, H. (2016) Autonomous Vehicles and Autonomous Driving in Freight Transport, in *Autonomous Driving*, 365–385, Springer Berlin Heidelberg, Berlin.

[110] Flötteröd, G., und B. Kickhöfer (2016) Choice models in matsim. In The Multi-Agent Transport Simulation MATSim, A. Horni, K. Nagel, und K. Axhausen, Eds., Ubiquity Press, London, 337 – 346.

[111] Fortune (2016) Uber Debuts Self-Driving Cars in Pittsburgh, http://fortune.com/2016/09/14/uber-self-driving-carspittsburgh/, September 2016.

[112] Fourie, P., S. Ordoñez, T. Maheshwari, B. Wang, A. Erath, S. Cairns und K.W. Axhausen (2018) Urban planning for autonomous vehicles, präsentiert an der *Swiss Transport Research Conference 2018*, Ascona, May 2018.

[113] Fraedrich, E., S. Beiker und B. Lenz (2015) Transition pathways to fully automated driving and its implications for the sociotechnical system of automobility, *European Journal of Futures Research*, **3**(1), 11.

[114] Fraedrich, E. und B. Lenz (2014) Automated Driving, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2416**, 64–72.

[115] Frank, P., M. Friedrich und J. Schlaich (2008) Betriebskosten von Busverkehren schnell und genau ermitteln, *Der Nahverkehr*, **26** (11), 15–22.

[116] Friedrich, B. (2016) The Effect of Autonomous Vehicles on Traffic, in M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz und H. Winner (Hgg.) *Autonomous Driving*, Springer-Verlag, Berlin.

[117]	Friedrich, B. (2015) Verkehrliche Wirkung Automatisierter Fahrzeuge, in M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz und H. Winner (Hgg.) *Automatisiertes Fahren*, 331-350, Springer-Verlag, Berlin.
[118]	Friedrich, M., M. Hartl und T. Ackermann (2017) Automatisierte Fahrzeugflotten in der Stadt: Wunsch oder Albtraum, *Der Nahverkehr*, **5**, 16-22, Alba Fachmedien ÖV, Hamburg.
[119]	Friedrich, M. und M. Hartl (2016) MEGAFON - Modellergebnisse geteilter Automatisierter Fahrzeugflotten des öffentlichen Nahverkehrs. *Research report*. Universität Stuttgart, Institut für Strassen- und Verkehrswesen, Stuttgart.
[120]	Gächter, S., B. Herrmann and C. Thöni (2004) Trust, voluntary cooperation, and socio-economic background: Survey and experimental evidence, *Journal of Economic Behavior and Organization*, **55** (4 SPEC.ISS.) 505–531.
[121]	German Aerospace Center (2018) Institute of Transportation systems, Simulation of Urban MObility, http://sumo.dlr.de, Januar 2018.
[122]	Ghent, P. (2015) Optimizing performance objectives for projects of congestion pricing for parking, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2530**, 101-105.
[123]	Goodall, N. J. (2014a) Ethical Decision Making During Automated Vehicle Crashes, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2424** (2424) 58–65.
[124]	Goodall, N. J. (2014b) Vehicle automation and the duty to act, Bericht präsentiert am *21st World Congress on Intelligent Transport Systems*, Detroit, September 2014.
[125]	Greenblatt, J. B. und S. Shaheen (2015) Automated Vehicles, On-Demand Mobility, and Environmental Impacts, *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, **2** (3) 74–81.
[126]	Gruel, W. und J. M. Stanford (2016) Assessing the Long-term Effects of Autonomous Vehicles: A Speculative Approach, *Transportation Research Procedia*, **13**, 18–29.
[127]	Guerra, E. (2016) Planning for Cars That Drive Themselves: Metropolitan Planning Organizations, Regional Transportation Plans, and Autonomous Vehicles, *Journal of Planning Education and Research*, **36** (2) 210–224.
[128]	Halpin, N. (2015) Expect your Amazon deliveries within 30 minutes via drones next year, http://uk.businessinsider.com/expect-your-amazon-deliveries-within30-minutes-via-drones-next-year-2015-6?r=US{&}IR=T, Juni 2015.
[129]	Harb, M., Y. Xiao, G. Circella, P. Moktharian und J. Walker (2018) Projecting Travelers into a World of Self-Driving Vehicles: Estimating Travel Behavior Implications via a Naturalistic Experiment, *Working Paper*, University of California - Berkeley, Berkeley.
[130]	Hawkins, A. J. (2017) Lyft is now offering self-driving car trips in Boston, The Verge, https://www.theverge.com/2017/12/6/16742924/lyft-nutonomy-boston-self-driving-car, Februar 2018.
[131]	Hawkins, A. J. (2016a) Amazon and Microsoft will reportedly invest in Here, the self-driving car mapping unit, The Verge, http://www.theverge.com/2016/4/1/11346710/amazonmicrosoft-here-autonomous-car-tech-investment, Mai 2016.
[132]	Hawkins, A. J. (2016b) Baidu gets the green light to test self-driving cars on Google's turf, The Verge, http://www.theverge.com/2016/9/1/12748992/baidu-self-drivingcar-california-dmv-testing-permit-google, September 2016.
[133]	Hawkins, A. J. (2016c) Delphi and Mobileye are teaming up to build a self-driving system by 2019, The Verge, http://www.theverge.com/2016/8/23/12603624/delphimobileye-self-driving-autonomous-car-2019, August 2016.
[134]	Hazan, J., N. Lang, P. Ulrich, J. Chua, X. Doubara und T. Steffens (2016) Will autonomous Vehicles Derail Trains?, bcg.Perspectives https://www.bcg.com/publications/2016/transportation-travel-tourism-automotive-will-autonomous-vehicles-derail-trains.aspx, September 2016.
[135]	Heilig, M., N. Mallig, O. Schröder, M. Kagerbauer und P. Vortisch (2018) Implementation of free-floating and station-based carsharing in an agent-based travel demand model, *Travel Behaviour and Society*, **12**, 151 – 158.
[136]	Heinrichs, D. und R. Cyganski (2015) Automated Driving: How It Could Enter Our Cities and How This Might Affect Our Mobility Decisions, *disP - The Planning Review*, **51** (2) 74–79.
[137]	Helvetia (2016) Die Mitarbeitendenrabatte auf Helvetia Versicherungen, https://www.helvetia.com/ch/content/de/landingpages/rabatt/mitarbeitendenrabatte.html, November 2016.
[138]	Hess, S. und J. W. Polak (2004) An analysis of parking behaviour using discrete choice models calibrated on SP datasets, *ERSA conference papers*, European Regional Science Association.
[139]	Hettinger, T. (2008) Konsistenz von Entscheidungsmodellen, *Masterarbeit*, IVT, ETH Zürich, Zürich.
[140]	Hevelke, A. und J. Nida-Rümelin (2015) Responsibility for Crashes of Autonomous Vehicles: An Ethical Analysis, *Science and Engineering Ethics*, **21** (3) 619–630.
[141]	Hörl, S. (2017) Agent-based simulation of autonomous taxi services with dynamic demand responses, *Procedia Computer Science*, **109**, 899–904.
[142]	Hörl, S. (2016) Implementation of an autonomous taxi service in a multi-modal traffic simulation using MATSim, *Master thesis*, Chalmers University of Technology.
[143]	Hörl, S., A. Erath und K. W. Axhausen (2016) Simulation of autonomous taxis in a multimodal traffic scenario with dynamic demand, *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, **1184**, IVT, ETH Zürich, Zürich.
[144]	Hörl, S., F. Ciari und K.W. Axhausen (2016) Recent perspectives on the impact of autonomous vehicles, *Arbeitsberichte Verkehrsplanung und Raumplanung*, **1216**, IVT, ETH Zürich, Zürich.

[145]	Hörl, S., M. Balac und K.W. Axhausen (2019) Pairing discrete mode choice models and agent-based transport simulation with MATSim, eingereicht für *98th Annual Meeting of the Transport Research Board*, Washington D. C., Januar 2019.
[146]	Hörl, S., M. Balac und K. W. Axhausen (2018) A first look at bridging discrete choice modeling and agent-based microsimulation in MATSim, *Procedia Computer Science*, **130**, 900–907.
[147]	Hörl, S., R. Ruch, F. Becker, E. Frazzoli und K.W. Axhausen (2018) Fleet control algorithms for automated mobility: A simulation assessment for Zurich, in Überprüfung für *Transportation Research: Part C*.
[148]	Horni (2013) Destination choice modeling of discretionary activities in transport microsimulations, *Doctoral Thesis*, ETH Zurich, Zurich.
[149]	Horni, A., K. Nagel und K. W. Axhausen (2015) The Multi-Agent Transport Simulation MATSim, Ubiquity, London.
[150]	Horni, A., D. Scott, M. Balmer, und K. W. Axhausen (2009) Location choice modeling for shopping and leisure activities with matsim: combining microsimulation and time geography. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2135** (2009), 87–95.
[151]	Howard, D. und D. Dai (2014) Public Perceptions of Self-driving Cars: The Case of Berkeley, California, Bericht präsentiert an *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*, Washington D. C., Januar 2014.
[152]	IHS Markit (2014) Emerging Technologies: Autonomous Cars – Not if, but when, *Technischer Bericht*, Englewood, Colorado.
[153]	IHS Markit (2014) Self-Driving Cars Moving into the Industry's Driver's Seat, http://news.ihsmarkit.com/press-release/automotive/self-driving-cars-moving-industrys-drivers-seat, Januar 2014.
[154]	Imhoff, M. L., C. J. Tucker, W. T. Lawrence und D. C. Stutzer (2000) The use of multisource satellite and geospatial data to study the effect of urbanization on primary productivity in the United States, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **38** (6) 2549–2556.
[155]	International Transport Forum (2015) Urban Mobility System Upgrade: How Shared Selfdriving Cars Could Change City Traffic, *Technischer Bericht*, OECD.
[156]	Ipsos MORI (2014) Ipsos MORI Loyalty Automotive Survey, Bericht, https://www.ipsos.com/ipsos-mori/en-uk/only-18-cent-britons-believe-driverless-cars-be-important-development-car-industry-focus, London, Juli 2014.
[157]	J. D. Power (2012) Vehicle Owners Show Willingness to Spend on Automotive Infotainment Features, http://www.jdpower.com/sites/default/files/2012049-uset.pdf ,Westlake Village.
[158]	Jamson, A. H., N. Merat, O. M. Carsten und F. C. Lai (2013) Behavioural changes in drivers experiencing highly-automated vehicle control in varying traffic conditions, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **30**, 116–125.
[159]	Janin, L., M. Nemri und C. Raynard (2016) La voiture sans chauffeur, bientôt une réealité, *France Stratégie*, Paris.
[160]	Johnson, B. (2015) Disruptive Mobility, *Forschungsbericht*, Barclays.
[161]	Johnson, C. und J. Walker (2016) Peak Car Ownership, *Forschungsbericht*, Rocky Mountain Institute.
[162]	Kang, N., F. M. Feinberg und P. Y. Papalambros (2015) Autonomous Electric Vehicle Sharing System Design, Bericht präsentiert an *ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Boston, September 2015.
[163]	Kanton Zürich (2017) ÖV-Güteklassen Infoblatt, *Bericht*, Zürich, April 2017.
[164]	Katzev, R. (2003) Car sharing: A new approach to urban transportation problems, *Analyses of Social Issues and Public Policy*, **3**, 65–86.
[165]	Kell, J. (2015) Amazon's unlikely secret to delivering so fast, http://fortune.com/2015/05/18/amazon-deliveries-subway/, Mai 2015.
[166]	Kim, K.-H., D.-H. Yook, Y.-S. Ko und D.-H. Kim (2015) An Analysis of Expected Effects of the Autonomous Vehicles on Transport and Land Use in Korea, *Arbeitsbericht*, Marron Institute of Urban Management.
[167]	King, C., D. Klinedinst, T. Lewellen und G. Wassermann (2016) 2016 Emerging Technology Domains Risk Survey, *Technischer Bericht*, Carnegie Mellon University.
[168]	Klose, R. (2012) BMW gibt Seinen Autos Nur 150'000 Kilometer, http://www.spiegel.de/auto/aktuell/bmw-setztmaximal-laufleistung-von-150-000-km-voraus-a-855355.html, Januar 2017.
[169]	Korosec, K. (2016a) Baidu and Nvidia Partner to Build AI Platform for Self-Driving Cars, http://fortune.com/2016/09/01/baidu-nvidia-ai-self-driving-cars/, September 2016.
[170]	Korosec, K. (2016b) Baidu Wants to Bring Self-Driving Cars to the Masses by 2021, http://fortune.com/2016/06/03/baidu-autonomous-cars-production/, Juni 2016.
[171]	Krause, S., N. Motamedidehkordi, S. Hoffmann, F. Busch, M. Hartmann, und P. Vortisch (2017) Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstrasseninfrastruktur, *FAT-Schriftenreihe*, **296**, Berlin.
[172]	Krause, S., N. Motamedidehkordi, S. Hoffmann, F. Busch (2017) Mikroskopische Simulation von automatisierten Fahrzeugen zur Ermittlung der Wirkungen auf die Kapazität von Autobahnen, *Strassenverkehrstechnik*, **12.2017**, Köln.
[173]	Krueger, R., T. H. Rashidi und J. M. Rose (2016) Preferences for shared autonomous vehicles, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **69**, 343–355.
[174]	Kyriakidis, M., R. Happee und J. de Winter (2015) Public opinion on automated driving: Results of an international questionnaire among 5000 respondents, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, **32**, 127–140.

[175] Laesser, C. und S. Reinhold (2013) Finanzierung des OeV in der Schweiz: Was zahlt der Nutzer, was die Allgemeinheit?, *Arbeitsbericht*, Schriftenreihe SBB Lab, St. Gallen: SBB Lab.

[176] LaMondia J. J, D. J. Fagnant, H. Qu, J. Barrett und K. Kockelman (2016) Shifts in Long-Distance Travel Mode Due to Automated Vehicles: Statewide Mode-Shift Simulation Experiment and Travel Survey Analysis, T*ransportation Research Record*, **2566**, 1-11.

[177] Lamotte, R., A. D. Palma und N. Geroliminis (2016) Sharing the road: the economics of autonomous vehicles, https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01281425.

[178] Lavasani, M., X. Jin und Y. Du (2016) Market Penetration Model for Autonomous Vehicles Based on Previous Technology Adoption Experiences, Bericht präsentiert an *Transportation Research Board 95th Annual Meeting*, Washington D. C., Januar 2016.

[179] Le Monde (2016) Les voitures Automatisiertes en voie d'être testées sur les routes de France, http://www.lemonde.fr/automobile/article/2016/08/03/les-voitures-Automatisiertes-bientot-testees-sur-les-routes-de-france{˝4978091{˝1654940.html, August 2016.

[180] Le Vine, S., Y. Kong, X. Liu und J. Polak (2016) Vehicle Automation, Legal Standards of Care, and Freeway Capacity, *Working Paper*, SSRN.

[181] Le Vine, S., A. Zolfaghari und J. Polak (2015) Autonomous cars: The tension between occupant experience and intersection capacity, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **52**, 1–14.

[182] Lederman, J., M. Garrett und B. D. Taylor (2016) Faulty Reasoning: Navigating the Liability Terrain in *Intelligent Transportation Systems, Public Works Management & Policy*, **21** (1), 5–27.

[183] Lee, H. L., Y. Chen, B. Gillai und S. Rammohan (2016) Technological Disruption and Innovation in Last-Mile Delivery, *Report*, United States Postal Service.

[184] Levin, M.W. (2017) Congestion-aware system optimal route choice for shared autonomous vehicles, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **82**, 229 – 247.

[185] Levin, M. W., T. Li, S. D. Boyles und K. M. Kockelman (2016) A general framework for modeling shared autonomous vehicles, Bericht präsentiert an *95th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington D. C., Januar 2016.

[186] Levina, E., und P. Bickel (2001) The earth mover's distance is the mallows distance: Some insights from statistics, Bericht des *Eighth IEEE International Conference on Computer Vision*, 251–256, Vancouver, Juli 2001.

[187] Lim, A. (2017) Driverless vehicle rides in three new towns from 2022, The Straits Times, http://www.straitstimes.com/singapore/transport/driverless-vehicle-rides-in-three-new-towns-from-2022, Februar 2018.

[188] Litman, T. (2000) Evaluating Carsharing Benefits, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1702**, 31–35.

[189] Litman, T. (2014) Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning, Aufsätz präsentiert am 93. *Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington D.C., Januar 2014.

[190] Litman, T. (2016) Generated traffic and induced travel, Victoria Transport Policy Institute, *ITE Journal*, **71** (4), 33-47.

[191] Loeb, B., K. M. Kockelman und J. Liu (2018) Shared autonomous electric vehicle (saev) operations across the Austin, Texas network with charging infrastructure decisions, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **89**, 222 – 233.

[192] Lohnanalyse (2016a) Lohnanalyse für Taxifahrer/in in der Schweiz, http://www.lohnanalyse.ch/ch/loehne/details/taxifahrerin.html, Oktober 2016.

[193] Lohnanalyse (2016b) Lohnanalyse für Lokführer/in in der Schweiz, http://www.lohnanalyse.ch/ch/loehne/details/lokfuehrerin/sql-administrator-it-operationskonzern-it-385943.html, Oktober 2016.

[194] Louw, T., N. Merat und H. Jamson (2015) Engaging with highly automated driving. To be or not to be in the loop, Bericht präsentiert an *8th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, Salt Lake City, Juni 2015.

[195] Lunden, I. (2016) VW invests $300M in Uber rival Gett in new ride-sharing partnership, https://techcrunch.com/2016/05/24/vw-invests-300m-in-uberrival-gett-in-new-ride-sharing-partnership/, Mai 2016.

[196] Ma, J., X. Li, F. Zhou und W. Hao (2017) Designing optimal autonomous vehicle sharing and reservation systems: A linear programming approach. T*ransportation Research Part C: Emerging Technologies* **84**, 124 – 141.

[197] Maciejewski, M. (2015) Dynamic Transport Services, in A. Horni, K. Nagel and K. W. Axhausen (Hgg.) *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*, Kap. **23**, 145-152, Ubiquity, London.

[198] Maciejewski, M. und J. Bischoff (2016) Congestion effects of autonomous taxi fleets, *Pre-Print*, eingereicht an TRANSPORT.

[199] Maciejewski, M. und J. Bischoff (2015) Large-scale microscopic simulation of taxi services, *Procedia Computer Science*, **52**, 358–364.

[200] Maciejewski M., J. Bischoff, S. Hörl und K. Nagel (2017) Towards a Testbed for Dynamic Vehicle Routing Algorithms, Highlights of Practical Applications of Cyber-Physical Multi-Agent Systems, PAAMS 2017, *Communications in Computer and Information Science*, **722**, Springer, Cham.

[201] Manville, M. und D. Shoup (2005) Parking, people, and cities, J*ournal of Urban Planning and Development*, **131** (4), 233-245.

[202] Martínez, L. M., G. H. de Almeida Correia, F. Moura und M. M. Lopes (2017) Insights into carsharing demand dynamics: Outputs of an agent-based model application to Lisbon, Portugal, *International Journal of Sustainable Transportation*, **11** (2), 148–159.

[203] Martínez, L. M. und J. M. Viegas (2017) Assessing the impacts of deploying a shared self-driving 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.

[204] Maunsell, D., P. Tanguturi und J. Hogarth (2014) Realising the benefits of autonomous vehicles in Australia, *Accenture*.

[205] McCahill, C. und N. Garrick (2014) Parking Supply and Urban Impacts, In S. Ison, C. Mulley (Hgg.) *Parking Issues and Policies*, **5**, 33-55, Emerald Group Publishing Limited, Bingley.

[206] McCahill, C. T., N. Garrick, C. Atkinson-Palombo und A. Polinski (2016) Effects of parking provision on automobile use in cities: inferring causality, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2543**, 159-165.

[207] McKinsey, 2017. Electrifying Insights: How Automakers Can Drive Electrified Vehicle Sales and Profitability. Technical Report.

[208] Merat, N. und A. H. Jamson (2009) Is drivers' situation awareness influenced by a highly automated driving scenario?, Bericht präsentiert an *Human Factors, Security and Safety. Human Factory and Ergonomics Society Europe Chapter Conference*, San Antonio, Oktober 2009.

[209] Merchán, D. und E. Blanco (2015) The Future of Megacity Logistics. Overview of Best-Practices, Innovative Strategies and Technology Trends for Last-Mile Delivery, *Report*, MIT Center for Transportation & Logistics, Boston.

[210] Mersky, A. C. und C. Samaras (2016) Fuel economy testing of autonomous vehicles, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **65**, 31–48.

[211] Meyer de Freitas, L. (2018) A recursive logit multimodal route choice model, *Master Thesis*, IVT, ETH Zurich, Zurich.

[212] Meyer, J., H. Becker, P. M. Bösch, P.M und K. W. Axhausen (2017) Autonomous vehicles: The next jump in accessibilities? *Research in Transportation Economics*, **62**, 80–91.

[213] Meyer, J., H. Becker und und K. W. Axhausen (2016) Impact of autonomous vehicles on the accessibility in Switzerland, *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, **1177**, IVT, ETH Zürich, Zürich.

[214] Migrol (2016) Treibstoffbon Rabatt 3 Rp./l, http://www.migrol.ch/de/Tankstellen/Treibstoffbon-Rabatt-3-Rp-l.aspx, November 2016.

[215] Migrosbank (2017) Privatkredit – Personliche Pläne günstig Verwirklichen, https://www.migrosbank.ch/de/privatpersonen/kredit/privatkredit.html, Januar 2017.

[216] Milakis, D., M. Snelder, B. V. Arem, B. V. Wee und G. H. d. A. Correia (2015) Development of automated vehicles in the Netherlands: scenarios for 2030 and 2050, *Report*, Delft University of Technology, Delft

[217] Mladenovic, M. N. und M. M. Abbas (2015) Anthropocentric Development of Intersection Control Principles for Self-driving Vehicles under Considerations of Social Justice, *International Scientific Conference on Mobility and Transport Technologies, Solutions and Perspectives for Intelligent Transport Systems*, München, Juni 2015.

[218] Mladenovic, M. N. und T. McPherson (2016) Engineering Social Justice into Traffic Control for Self-Driving Vehicles?, *Science and Engineering Ethics*, **22** (4), 1131–1149.

[219] Moon, M. (2016) Tesla: Mobileye tried to stop our in-house chip development, https://www.engadget.com/2016/09/16/tesla-mobileye-response/, September 2016.

[220] Morgan Stanley and Boston Consulting Group (2016) Motor Insurance 2.0, *Bluepaper*, Boston, September 2016.

[221] Mosquet, X., T. Dauner, N. Lang, M. Rübmann, A. Mei-Pochtler, R. Agrawal und F. Schmieg (2015) Revolution in the Driver's Seat, *The Boston Consulting Group*, Boston

[222] Nagel, K., und G. Flötteröd (2016) Agent-based traffic assignment, in A. Horni, K. Nagel, und K. W. Axhausen (Hgg.), *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*, 315 – 326, Ubiquity Press, London.

[223] Nagel, K., B. Kickhofer, A. Horni und D. Charypar (2015) A Closer Look at Scoring, in A. Horni, K. Nagel und K. W. Axhausen (Hgg.), *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*, Kap. **3**, 23-33, Ubiquity, London.

[224] Navya (2015) PostBus autonomous and electric vehicles: official presentation in Sion (Switzerland), http://navya.tech/2015/12/postbus-navya-arma-driverlessshuttles-switzerland/?lang=en, Dezember 2015.

[225] Navya (2016) Launch of NAVLY in the confluence district of Lyon, http://navya.tech/2016/09/launch-of-navly-in-the-confluence-district-of-lyon/?lang=en, September 2016.

[226] Neate, R. (2016) Ford to build 'high volume' of driverless cars for ride-sharing services, https://www.theguardian.com/technology/2016/aug/16/ford-selfdriving-cars-ride-sharing-uber-lyft, August 2016.

[227] Neff, M., R. Kläger,S. Brivio, A. Hauser, A. Koch, D. Arapovic, C. Vonwiller, L. Seger und M. Kunz (2015) Der starke Franken: Fluch und Segen für die Industrie. *Technischer Bericht*. Raiffeisen Economic Research, Zurich.

[228] NHTSA (2017) Automatic Vehicle Control Systems, *Technischer Bericht*, National Highway Traffic Safety Administration, Washington D. C..

[229] NHTSA (2013) Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles, Bericht, National Highway Traffic Safety Administration, Washington D. C..

[230] Ni, D., J. Li, S. Andrews et al. (2010) Preliminary estimate of highway capacity benefit attainable with IntelliDrive technologies, *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 819-824, Portugal, September 2010.

[231] Ni, X. Y. und D. J. Sun (2017) Agent-Based Modelling and Simulation to Assess the Impact of Parking Reservation System, Journal of Advanced Transportation.

[232]	Nica, G. (2016) BMW CEO Wants Autonomous Driving Cars within Five Years, http://www.bmwblog.com/2016/08/02/bmw-ceo-wants-autonomous-drivingcars-within-five-years/, München, August 2016.
[233]	Nieuwenhuijsen, J. A. H. (2015) Diffusion of Automated Vehicles, *Master thesis*, Delft University of Technology, Delft.
[234]	Nieuwenhuijsen, J., G. H. de Almeida Correia, D. Milakis, B. van Arem und E. van Daalen (2018) Towards a quantitative method to analyze the long-term innovation diffusion of automated vehicles technology using system dynamics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **86**, 300 – 327.
[235]	Nourinejad, M., S. Bahrami und M. J. Roorda (2018) Designing parking facilities for autonomous vehicles, *Transportation Research Part B: Methodological*, **109**, 110-127.
[236]	Nordhoff, S., S. Change, B. V. Arem und R. Happee (2016) A Conceptual Model to Explain, Predict, and Improve User Acceptance of Driverless Vehicles, Bericht präsentiert an *Transportation Research Board 95th Annual Meeting*, Washington D. C., Januar 2016.
[237]	Nouvelle France Industrielle (2015) Véhicule Automatisierte, Objectifs de recherche, *Nouvelle France Industrielle*, Paris.
[238]	Nykvist, B. und M. Nilsson (2015) Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. *Nature Climate Change*, **5** (4), 329–332.
[239]	OECD (2017a) OECD DataExchange Rates, https://data.oecd.org/conversion/exchange-rates.htm, April 2017.
[240]	OECD (2017b) OECD Data Purchasing Power Parities (PPP), https://data.oecd.org/conversion/purchasing-power-parities-ppp.htm, April 2017.
[241]	OECD/ITF (2015a) ITF Transport Outlook 2015, OECD Publishing/ITF.
[242]	OECD/ITF (2015b) Urban Mobility System Upgrade: How shared self-driving cars could change city traffic, OECD Publishing/ITF, Paris.
[243]	Osswald, S., D. Wurhofer, S. Trösterer, E. Beck und M. Tscheligi (2012) Predicting information technology usage in the car: towards a car technology acceptance model, Aufsatz präsentiert an der *4. International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 51–58, Portsmouth, Oktober 2012.
[244]	Otte, G. (2005) Entwicklung und Test einer integrativen Typologie der Lebensführung für die Bundesrepublik Deutschland, *Zeitschrift für Soziologie*, **34** (6) 442–467.
[245]	Ottosson, D. B., C. Chen, T. Wang und H. Lin (2013) The sensitivity of on-street parking demand in response to price changes: A case study in Seattle, WA, *Transport Policy*, **25**, 222-232.
[246]	Owczarzak, Ł. und J. Żak (2015) Design of Passenger Public Transportation Solutions Based on Autonomous Vehicles and Their Multiple Criteria Comparison with Traditional Forms of Passenger Transportation, *Transportation Research Procedia*, **10,** 472–482.
[247]	Pachal, P. (2016) Despite Tesla's setbacks, Audi is racing fast toward self-driving cars, http://mashable.com/2016/07/16/audi-self-driving-a7/{#}wu9kOeNrVOqq, Juli 2016.
[248]	Patel, J. (2016) nuTonomy beats Uber to launch first self-driving taxi - Autoblog, http://www.autoblog.com/2016/08/25/nutonomy-first-self-driving-taxisingapore/, August 2016.
[249]	Pavone, M., S. L. Smith und E. F. D. Rus (2011) Load balancing for mobility-on-demand systems, *Robotics: Science and Systems*, 27-30.
[250]	Payre, W., J. Cestac und P. Delhomme (2014) Intention to use a fully automated car: Attitudes and a priori acceptability, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, **27** (PB) 252–263.
[251]	Pfrommer, J., J. Warrington, G. Schildbach und M. Morari (2014) Dynamic vehicle redistribution and online price incentives in shared mobility systems. I*EEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **15**, 1567–1578.
[252]	Piao, J., M. McDonald, N. Hounsell, M. Graindorge, T. Graindorge und N. Malhene (2016) Public Views towards Implementation of Automated Vehicles in Urban Areas, *Transportation Research Procedia*, **14** (0), 2168–2177.
[253]	Pierce, G. und D. Shoup (2013) Getting the prices right: an evaluation of pricing parking by demand in San Francisco, *Journal of the American Planning Association*, **79** (1), 67-81.
[254]	Pierce, G., H. Willson und D. Shoup (2015) Optimizing the use of public garages: Pricing parking by demand. *Transport Policy*, **44**, 89-95.
[255]	Poletti, F. (2017) Public Transit Mapping on Multi-Modal Networks in MATSim, *Strasse und Verkehr*, 7-8.
[256]	PSA Group (2016) Autonomous vehicle: the automated driving car of the future, http://www.psa-peugeot-citroen.com/en/featured-content/autonomouscar.
[257]	PTV (2018) PTV Vissim, http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-vissim/, Januar 2018.
[258]	Ramsey, M. (2016) Continental Buys Sensor Technology for Self-Driving Cars, WSJ, http://www.wsj.com/articles/continental-buys-sensor-technology-forself-driving-cars-1457042039.
[259]	Ramsey, M. und G. Nagesh (2016) GM, Lyft to Test Self-Driving Electric Taxis, WSJ, http://www.wsj.com/articles/gm-lyft-to-test-self-driving-electrictaxis-1462460094.
[260]	Rammstedt, B.und O. P. John (2007) Measuring personality in one minute or less: a 10-item short version of the big five inventory in English and German, *Journal of Research in Personality*, **41**(1), 203–212.
[261]	Rödel, C., S. Stadler, A. Meschtscherjakov, M. Tscheligi (2014) Towards autonomous cars: the effect of automatisierty levels on acceptance and user experienc,. Bericht der *6th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, **11**, 1–8, Seattle, September 2014.

[262] Rotter, J. B. (1966) Generalized expectancies for internal versus external control of reinforcement, *Psychological Monographs: General and Applied*, **80**(1), 1–28.

[263] Ruch, C., J. Warrington und M. Morari (2014) Rule-based price control for bike sharing systems, Bericht der *European Control Conference (ECC)*, 708–713, Strassburg, Juni 2014.

[264] Rüschendorf, L. (1985) The wasserstein distance and approximation theorems, *Probability Theory and Related Fields*, **70**, 117–129.

[265] SAE International (2014) Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems, *Report SAE J3016*.

[266] Savelsbergh, M. und T. Van Woensel (2016) 50th Anniversary Invited Article—City Logistics: Challenges and Opportunities, *Transportation Science*, **50** (2), 579–590.

[267] Saxton, T. (2013) Plug in America's Tesla Roadster Battery Study, *Technical Report*, Plug in America, Los Angeles.

[268] SBB AG (2016) Zahlen und Fakten 2015, http://www.sbb.ch/zahlen-und-fakten, November 2016.

[269] Schellekens, M. (2015) Self-driving cars and the chilling effect of liability law, *Computer Law & Security Review*, **31** (4), 506–517.

[270] Schlesiger, C. (2014) Der Neue Strassenkampf, http://www.wiwo.de/politik/deutschland/mobilitaet-in-grossstaedtencarsharing-verschaerft-parkplatznot/10218492–10218493.html, Februar 2017.

[271] Schmid, B., S. Schmutz und K. W. Axhausen (2016) Explaining mode choice, taste heterogeneity and cost sensitivity in a post-car world. Artikel präsentiert an *95th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., Januar 2016.

[272] Schoettle, B. und M. Sivak (2014) A Survey of Public Opinion about Autonomous and Self-Driving Vehicles in the U.S., the U.K., and Australia, *Technischer Bericht*, The University of Michigan, Transportation Research Institute, Ann Arbor.

[273] Schoettle, B. und M. Sivak (2015) Motorists' Preferences for Different Levels of Vehicle Automation, *Technischer Bericht*, The University of Michigan, Transportation Research Institute, Ann Arbor.

[274] Schoettle, B. und M. Sivak (2014) Public Opinion About Self-Driving Vehicles in China, India, Japan, The U.S., The U.K. and Australia, *Technischer Bericht*, The University of Michigan,Transportation Research Institute, Ann Arbor.

[275] Schoettle, B. and M. Sivak (2015) Potential Impact of Self-Driving Vehicles on Household Vehicle Demand and Usage, *Technischer Bericht*, The University of Michigan, Transportation Research Institute, Ann Arbor.

[276] Schoonmaker, J. (2016) Proactive privacy for a driverless age, *Information & Communications Technology Law*, **25** (2), 96–128.

[277] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2009) Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr, SN 641 922a, Zurich.

[278] SCI Verkehr (2016) Deutsche Logistik-konjunktur Bleibt Weiterhin Stabil, *Technischer Bericht*, Hamburg.

[279] Seapine Software (2014) Study Finds 88 Percent of Adults Would Be Worried about Riding in a Driverless Car, Presseerklärung, http://www.seapine.com/about-us/press-release-full?press=217, Juni 2014.

[280] Shanker, R., A. Jonas, S. Devitt, K. Huberty, S. Flannery, W. Greene, B. Swinburne, G. Locraft, A. Wood, K. Weiss, J. Moore, A. Schenker, P. Jain, Y. Ying, S. Kakiuchi, R. Hoshino und A. Humphrey (2013) Autonomous Cars: Self-Driving the New Auto Industry Paradigm, *Blue Paper*, Morgan Stanley, New York City.

[281] Shell (2016) Durchschnittliche Säulenpreise - Schweiz, http://www.shell.ch/de/products-services/on-the-road/fuels/fuelpricing.html, November 2016.

[282] Shen, Y., H. Zhang und J. Zhao (2018) Integrating shared autonomous vehicle in public transportation system: A supply-side simulation of the first-mile service in Singapore. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **113**, 125 – 136.

[283] Sheriff, K. D. (2016) Professional Liability after Quantum Leaps in Technology: The Advent of Autonomous Vehicles and Technology's Uncertain Fit within Existing Tort Law, *Bericht*, Emory University School of Law, Atlanta.

[284] Shi, L. und P. Prevedouros (2016) Autonomous and Connected Cars: HCM Estimates for Freeways with Various Market Penetration Rates, *Transportation Research Procedia*, **15**, 389–402.

[285] Shladover, S., D. Su und X. Y. Lu (2012) Impacts of cooperative adaptive cruise control on freeway traffic flow, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2324**, 63-70.

[286] Shoup, D. (2005) The high cost of free parking, Routledge, Oxon.

[287] Shoup, D. (2006) Cruising for parking. *Transport Policy*, **13** (6), 479-486.

[288] Silberg, G., M. Manassa, K. Everhart, D. Subramanian, M. Corley, H. Fraser und V. Sinha (2013) Self-Driving Cars: Are we Ready?, KPMG LLP, Amstelveen.

[289] Sivak, M. und B. Schoettle (2015) Influence of Current Nondrivers on the Amount of Travel and Trip Patterns with Self-Driving Vehicles, *Bericht*, The University of Michigan, Transportation Research Institute, Ann Arbor.

[290] Sixt SE (2016) Sixt SE emittiert Anleihe über 250 Mio. Euro zur weiteren Wachstumsfinanzierung, https://about.sixt.com/websites/sixt_cc/German/2999/news-details.html?newsID¼1585535#news-EQS, November 2016.

[291] Skinner, R. and N. Bidwell (2015) Making Better Places: Autonomous vehicles and future opportunities, WSP — Parsons Brinckerhof.

[292]	Sloat, S. (2016) BMW, Intel, Mobileye Link Up in Self-Driving Tech Alliance, WSJ, http://www.wsj.com/articles/bmw-intel-mobileye-link-up-inself-driving-tech-alliance-1467379145.
[293]	Smith, S.L., M. Pavone, M. Schwager, E. Frazzoli und D. Rus (2013) Rebalancing the rebalancers: Optimally routing vehicles and drivers in mobility-ondemand systems, in *American Control Conference (ACC)*, 2362–2367.
[294]	Solomon, B. (2016) GM Invests $500 Million In Lyft For Self-Driving Car Race With Uber, Tesla And Google, http://www.forbes.com/sites/briansolomon/2016/01/04/gm-invests-500-million-in-lyft-for-self-driving-car-racewith-uber-tesla-and-google/{#}45eabcd2144e, Januar 2016.
[295]	Souders, D. und N. Charness (2016) Human Aspects of IT for the Aged Population. Healthy and Active Aging, *Lecture Notes in Computer Science*, **9755**, Springer International Publishing, Cham.
[296]	Spieser, K., K. Treleaven, R. Zhang, E. Frazzoli, D. Morton, und M. Pavone (2014) Toward a systematic approach to the design and evaluation of automated mobility-on-demand systems: A case study in Singapore, *Road Vehicle Automation,* 229–245, Springer.
[297]	Spinoulas, D., P. Davidson und A. Spinoulas (2015) Autonomous Vehicles - What Could This Mean For The Future Of Transport?, Bericht präsentiert an *the Australian Institute of Traffic Planning and Management (AITPM) National Conference*, Brisbane, Juli 2015.
[298]	Stadt Zürich (2014) Taxitarif der Stadt Zürich, Verordnung, https://www.stadt-zuerich.ch/portal/de/index/politik_u_recht/amtliche_sammlung/inhaltsverzeichnis/9/935/460.html, Zürich, September 2014.
[299]	Stephens, T., J. Gonder, Y. Chen, Z. Lin, C. Liu und D. Gohlke (2016) Estimated Bounds and Important Factors for Fuel Use and Consumer Costs of Connected and automated Vehicles, *Technischer Bericht*, National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy, Golden, November 2016.
[300]	Strassenverkehrsamt Kanton Zürich (2017) Verkehrsabgabenrechner, http://www.stva.zh.ch/internet/sicherheitsdirektion/stva/de/StVAgeb/GEBva14/VArechner.html, Februar 2017.
[301]	Tan, C. K. und K. S. Tham (2014) Autonomous Vehicles, Next Stop: Singapore, *Journeys*, 5–11.
[302]	Taubman, O., M. Mikulincer und A. Iram (1996) The Cognitive, Motivational and Emotional System of Driving, *Bericht*, Ramat Gan.
[303]	Tchervenkov, C., M. Balac, S. Hörl, H. Becker und K.W. Axhausen (2019) How much parking space can carsharing save?, Eingereicht zur Präsentation am *Annual Meeting of the Transportation Research Board 2019*, Washington D. C., Januar 2019.
[304]	TCS (2016) Kosten eines Musterautos, https://www.tcs.ch/de/auto-zweirad/auto-kaufen-verkaufen/autounterhaltskosten/kosten-eines-musterautos.php. Dezember 2016.
[305]	Tellez, O., S. Vercraene, F. Lehud, O. Pton und T. Monteiro (2018) The fleet size and mix dial-a-ride problem with reconfigurable vehicle capacity. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **91**, 99 – 123.
[306]	Thomopoulos, N. und M. Givoni (2015) The autonomous car—a blessing or a curse for the future of low carbon mobility? An exploration of likely vs. desirable outcomes, *European Journal of Futures Research*, **3** (1), 14.
[307]	Thompson, C. (2016) How Ford's self-driving cars will work, http://uk.businessinsider.com/how-fords-self-driving-cars-will-work2016-8?r=US{&}IR=T, August 2016.
[308]	Thomson Reuters: Web of Science. https://apps.webofknowledge.com/WOS_GeneralSearch_input.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&SID=R1VXWEiOGN9EjIBbtZB&preferencesSaved= (2016).
[309]	Tientrakool, P., Y.-C. Ho und N. F. Maxemchuk (2011) Highway capacity benefits from using vehicle-to-vehicle communication and sensors for collision avoidance, Bericht präsentiert an *IEEE Vehicular Technology Conference*, 1-5.
[310]	Train, K. (2009) Discrete Choice Methods with Simulation. *Cambridge University Press*, New York.
[311]	Transport Systems Catapult (2016) Self-driving pods, https://ts.catapult.org.uk/pods.
[312]	Trego, T. und D. Murray (2015) An Analysis of the Operational Costs of Trucking: 2015 Update, *Bericht*, American Transportation Research Institute, Arlington.
[313]	Treleaven, K., M. Pavone und E. Frazzoli (2011) An asymptotically optimal algorithm for pickup and delivery problems, *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC)*, 584–590, Orlando, Dezember 2011.
[314]	Truett, R. (2015) Delphi, Quanergy team up on low-cost lidar, http://www.autonews.com/article/20151026/OEM06/310269985/delphi-quanergy-team-up-onlow-cost-lidar, Oktober 2015.
[315]	Truong, L.T., C. de Gruyter, G. Currie, A. Delbosc (2017) Estimating the trip generation impacts of autonomous vehicles on car travel in Victoria, Australia, *Transportation*, **44** (6), 1279–1292.
[316]	Uber (2017) Uber Bewegt Zürich, https://www.uber.com/de/cities/zurich/, Januar 2017.
[317]	Urmson, C. (2016) Google self-driving car project. Präsentation bei South by Southwest (SXSW), https://www.youtube.com/watch?v=Uj-rK8V-rik, Austin, März 2016.
[318]	Vander Werf, J., S. Shladover, M. Miller (2002) Effects of adaptive cruise control systems on highway traffic flow capacity, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1800**, 78-84.

[319]	Van Meldert, B. und L. De Boeck (2016) Introducing autonomous vehicles in logistics : a review from a broad perspective, *Forschungsbericht*, KU Leuven, Leuven.
[320]	Vazifeh, M. M., P. Santi, G. Resta, S. H. Strogatz und C. Ratti (2018) Addressing the minimum fleet problem in on-demand urban mobility, *Nature*, **557**, 534-538.
[321]	Venkatesh, V., M. G. Morris, G. B. Davis und F. D. Davis (2003) User acceptance of information technology: toward a unified view. *MIS Quarterly* **27** (3), 425–478.
[322]	Verkehrsbetriebe Zürich (2016) BusfahrerIn - Die Bewerbung. Webpage (last accessed 08.11.2017), https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/die_vbz/arbeiten_bei_den_vbz/berufswelten/busfahrer_in/busfahren_details.html, November 2017.
[323]	Verkehrsbetriebe Zürich (2014) Fahrgastzahlen VBZ, https://data.stadt-zuerich.ch/dataset/vbz-fahrgastzahlen-ogd, Januar 2017.
[324]	Voith, R. (1998) Parking, transit, and employment in a central business district, *Journal of Urban Economics,* **44** (1), 43-58.
[325]	Volvo (2016a) Drive Me – the self-driving car in action, http://www.volvocars.com/intl/about/our-innovation-brands/intellisafe/intellisafe-autopilot/drive-me.
[326]	Volvo (2016b) Volvo Cars and Uber join forces to develop autonomous driving cars, Presseerklärung, https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/194795/volvo-cars-and-uber-join-forces-to-develop-autonomousdriving-cars, Gothenburg, August 2016.
[327]	Wadud, Z., D. MacKenzie und P. Leiby (2016) Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **86**, 1–18
[328]	Wakabayashi, D. and D. MacMillan (2016) Apple's Latest $1 Billion Bet Is on the Future of Cars, WSJ, http://www.wsj.com/articles/apples-1-billion-didiinvestment-revs-up-autonomous-car-push-1463154162, Mai 2016.
[329]	Wallin, J., V. Parida und O. Isaksson (2015) Understanding product-service system innovation capabilities development for manufacturing companies, *Journal of Manufacturing Technology Management*, **26** (5), 763–787.
[330]	Wang, B., S. A. O. Medina, P. Fourie (2018) Simulation of autonomous transit on demand for fleet size and deployment strategy optimization, *Procedia Computer Science***, 130**, 797 – 802.
[331]	Warren, T. (2016) Delphi tests self-driving car service in Singapore, http://www.theverge.com/2016/8/1/12337516/delphi-self-driving-car-service-singapore, August 2016.
[332]	Weis, C. und K.W. Axhausen (2013) Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs: Leitfaden 2012/02, *SVI*, St. Gallen.
[333]	Weis, C. und K. W. Axhausen (2009) Induced travel demand: Evidence from a pseudo panel data based structural equations model, *Research in Transportation Economics*, **25** (1), 8–18.
[334]	Wettbewerbskommission WEKO (2014) Kreditkarten Domestische Interchange Fees II (KKDMIF II), *Technischer Bericht,* WEKO, Bern.
[335]	White, P. (2016) The roles of 'conventional' and demand-responsive bus services, in Mulley, C., Nelson, J.D. (Hgg.), *Paratransit: Shaping the Flexible Transport Future (Transport and Sustainability Volume 8)*, 307–330, Emerald Group Publishing Limited, Bingley.
[336]	Willson, R. (2017) A Day in the Life of a Parking Space: Testing a Parking Hour Utilization Metric, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2651** , 101–107.
[337]	Willson, R. und A. Irish (2016). Dynamic Parking Pricing: Comparison of Evaluation Methods. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2543**, 143–151.
[338]	Yang, K. (2016) Isolated intersection control for various levels of vehicle technology: Conventional, connected, and automated vehicles, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **72**, 109–129.
[339]	Yeomans, G. (2014) Autonomous vehicles - Handing over control: Opportunities and risks for insurance, *Lloyd's*, London.
[340]	Zachariah, J., J. Gao, A. Kornhauser, T. Mufti (2014) Uncongested mobility for all: A proposal for an area wide autonomous taxi system in new jersey, *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*, Washington D. C., Januar 2014.
[341]	Zakharenko, R. (2016) Self-driving cars will change cities, *Regional Science and Urban Economics*, **61** (C) 26–37.
[342]	Zhang, K. und Y. M. Nie (2018) Mitigating the impact of selfish routing: An optimal-ratio control scheme (orcs) inspired by autonomous driving. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **87**, 75 – 90.
[343]	Zhang, R. und M. Pavone (2016) Control of robotic mobility-on-demand systems: a queueing-theoretical perspective. *The International Journal of Robotics Research*, **35**, 186–203.
[344]	Zhang, R., F. Rossi und M. Pavone, (2016) Model predictive control of autonomous mobility-on-demand systems, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 1382–1389, Stockholm, Mai 2016.
[345]	Zhang, W., S. Guhathakurta, J. Fang und G. Zhang (2015) Exploring the impact of shared autonomous vehicles on urban parking demand: An agent-based simulation approach, *Sustainable Cities and Society*, **19**, 34–45.
[346]	Zhang, W. und S. Guhathakurta (2017) Parking Spaces in the Age of Shared Autonomous Vehicles: How Much Parking Will We Need and Where? *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2651**, 80-91.

[347]	Zhu, S. und A. L. Kornhauser (2017) The Interplay Between Fleet Size, Level-of-Service and Empty Vehicle Repositioning Strategies in Large-Scale, Shared-Ride Autonomous Taxi Mobility-on-Demand Scenarios, *Technischer Bericht*, Department of Operations Research and Financial Engineering, Princeton University, Princeton.
[348]	Ziemke, D. und K. Nagel (2017) Development of a fully synthetic and open scenario for agent-based transport simulations - The MATSim Open Berlin Scenario, *Arbeitsbericht*, Transport Systems Planning and Transport Telematics, Technische Universität Berlin, Berlin.
[349]	Zmud, J., I. N. Sener und J. Wagner (2016) Consumer Acceptance and Travel Behavior Impacts of Automated Vehicles, *Bericht*, Texas A&M Transportation Institute, Texas.
[350]	Zürcher Verkehrsverbund (2017) Startseite, http://www.zvv.ch/zvv/de/home.html, Februar 2017.

Danksagung

Für wertvolle Inputs und Zuarbeiten in vielen verschiedenen Teilen des Projekts danken wir unseren Kollegen und Mitautoren der veröffentlichen Aufsätze am Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme: Milos Balac, Henrik Becker, Patrick Bösch und Francesco Ciari.

Dank geht auch an unsere Studenten für die tatkräftige Mithilfe am Projekt: Yves Räth für die Übersetzung und Aufarbeitung verschiedener Aufsätze, die zunächst in Englisch erschienen sind; Lucas Meyer de Freitas für das Routing der Daten des Mikrozenus mit Google; Hong Liang für die Hilfe bei der Literaturdurchsicht zu Kapazitätseffekten Automatisierter Fahrzeuge; Davi Bicudo Guggisberg für seine Mithilfe in der Szenariosynthese.

Wir danken Claudio Ruch, Jan Hakenberg und Emilio Frazzoli vom Instut für Dynamische Systeme der ETH Zürich für eine sehr gute und interessante Zusammenarbeit im Bereich des Flottenmanagements.

Für die wertvolle Kritik und wichtige Beiträge zum Kostenrechner geht grosser Dank (in alphabetischer Reihenfolge) an Hans-Jörg Althaus, Nick Beglinger, Ralf Bosch, Peter Brandl, Frank Bruns, Walter Casazza, Kilian Constantin, Hauke Fehlberg, Martin Fellendorf, Markus Friedrich, Christian Graf von Normann-Ehrenfels, Jörg Jermann, Simon Kettner, Scott Le Vine, Don MacKenzie, Peter White, und die anonymen Gutachter von *Transport Policy*.

Neben dem vorliegenden Projekt wurde die Entwicklung des Kostenrechners zusätzlich durch zwei im Rahmen des Schweizerischen Nationalfonds finanzierten Projekten unterstützt: dem SNF-Projekt Nummer 200021_159234, Autonomous Cars, und dem SNF-Projekt Nummer 407140_153807, Sharing is Saving, das Teil des Nationalen Forschungsprogramms 71: Managing Energy Consumption ist.

Projektabschluss

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 20.09.2018

Grunddaten

Projekt-Nr.: SVI 2016/001

Projekttitel: Induzierter Verkehr durch autonome Fahrzeuge: Eine Abschätzung

Enddatum: 30.09.2018

Texte

Zusammenfassung der Projektresultate:

Das Projekt liefert Resultate aus einer Reihe von sehr unterschiedlichen Teilarbeiten. Im ersten Teil der Studie wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt, die den aktuellen Stand der Wissenschaft zum Thema "autonomes Fahren" zusammenfasst.

Der zweite Teil der Studie stellt eine detaillierte Kostenabschätzung für Verkehrsangebote in der Schweiz dar. In einer Bottom-Up Analyse werden die einzelnen Kostenbestandteile heutiger Mobilitätsangebote genau aufgeschlüsselt. Zusätzlich werden die Einflüsse der Elektrifizierung, sowie der Automatisierung auf die Kostenkomponenten abgeschätzt. Daraus resultiert ein Kostenrechner, der sehr detaillierte Analysen zu den Kostenstrukturen der Mobilität der Zukunft zulässt. Ein Hauptergebnis ist, dass autonome Taxis marginal günstiger als der private Besitz autonomer Fahrzeuge sein werden.

Die Kostenstrukturen wurden im dritten Teil der Studie genutzt, um eine Umfrage zum möglichen Nutzungsverhalten der Bevölkerung bzgl. autonomen Fahrzeugen zu informieren. Hauptergebnisse der Studie sind, dass autonome Taxiangebote hauptsächlich bisherige Autofahrer ansprechen und für lange Distanzen in Form von Zubringern sogar den öffentlichen Fernverkehr stärken können. Interessant ist, dass ältere Befragte zwar der Technologie skeptischer gegenüberstehen, aber aufgrund der Mobilitätsvorteile diese sogar wahrscheinlicher nutzen würden als jüngere Reisende. Wird den Befragten die Möglichkeit gegeben autonome Taxis und autonome Privatfahrzeuge zu nutzen, sinkt die PW-Besitzrate nicht.

Der vierte Teil der Studie verbindet die Kostenstrukturen und Verhaltensmodelle mit einer Verkehrssimulation. Dabei stellt sich, abhängig von der Flottengrösse, ein dynamisches Gleichgewicht für die Nutzung der Mobilitätsangebote ein, in welchem realistische Preise und Wartezeiten existieren. Die Simulationen machen eine Abschätzung realistischer Flottengrössen autonomer Taxis in Zürich, zeigen aber auch, dass sich städtische Anbieter automatisierter Taxis kaum etablieren können, wenn automatisierte Privatfahrzeuge unreguliert genutzt werden können. Zudem sind im Falle privater autonomer Fahrzeuge induzierte Verkehre von bis zu 0.5% der heutigen Reisedistanz zu erwarten.

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Die erste Zielsetzung der Projekts, "Erfassung und Systematisierung der heutigen Diskussion und Ergebnisse zu den erwarteten Kosten und Kapazitäten des Verkehrs mit automatisierten Fahrzeugen' wurde durch die detaillierte Literaturanalyse erfüllt. Die "Akzeptanz möglicher neuer Angebote mit autonomen Fahrzeugen im Kanton Zürich" wurde durch die Befragungen analysiert. Die "Simulation der Nachfrage für diese Angebote in einem städtisch-ländlichen Kontinuum in der Schweiz unter Berücksichtigung der Heterogenität der Nutzerpräferenzen und unter besonderer Berücksichtigung induzierter Verkehre" wurde aufgrund des hohen Arbeitsaufwands nicht zu 100% wie geplant durchgeführt, insbesondere wurden keine heterogenen Nutzerpräferenzen verwendet. Nichtsdestotrotz stellt der Simulationsaufbau im weltweiten Forschungskontext eine bisher einzigartige Neuerung dar. Die "Implikationen der Vollautomation des öffentlichen Schienen- und Strassenverkehrs für die langfristige Planung im ÖV und MIV" wurden anhand der Ergebnisse erörtert und die "Synthese der Ergebnisse und Entwicklung der Empfehlungen" wurde durchgeführt.

Folgerungen und Empfehlungen:

Es konnte gezeigt werden, dass die Preisreduktionen durch die Automatisierung am stärksten individualisierte Taxiangebote betreffen. So kann ein autonomes Taxi in Zukunft wahrscheinlich zu Preisen ähnlich denen des Privatfahrzeugbesitzes heute angeboten werden. Aufgrund des Preises und der Nutzerpräferenzen kann somit festgestellt werden, dass (städtische) autonome Taxiangebote hauptsächlich Interessenten unter den heutigen Autofahrern finden und, in Verbindung mit dem ÖV, durch Zubringer und ähnliche Angebote den ÖV stärken können. Zudem können sie individuelle Mobilität in bisher schlecht erschlossenen Gegenden erhöhen oder Leuten helfen, die in ihrer Mobilität eingeschränkt sind.

Private autonome Fahrzeuge hingegen haben das Potential, durch häufigere und längere Reisen und erhöhtem Komfort gegenüber dem ÖV die Verkehrsinfrastruktur stärker zu belasten. Insbesondere scheinen autonome Taxi-Angebote als nicht überlebensfähig, wenn autonome Privatfahrzeuge unreguliert zugelassen werden. Einer überbordenden Nutzung privater Einzelfahrzeuge ist daher regularisch entgegenzuwirken.

Publikationen:

Hörl, S., F. Ciari und K.W. Axhausen (2016) Recent perspectives on the impact of autonomous vehicles, Arbeitsberichte Verkehrsplanung und Raumplanung, 1216, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), ETH Zürich, Zürich.

Becker, F., K.W. Axhausen (2017) Literature review on surveys investigating the acceptance of automated vehicles, Transportation, 44 (6), 1293-1306.

Bösch, P.M., F. Becker, H. Becker, K.W. Axhausen (2018) Cost-based analysis of autonomous mobility services, Transport Policy, 64, 76-01.

Hörl, S., R. Ruch, F. Becker, E. Frazzoli, K.W. Axhausen (2018) Fleet control algorithms for automated mobility: A simulation assessment for Zurich, Under Review for Transportation Research: Part C.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Axhausen Vorname: Kay W.

Amt, Firma, Institut: ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens haben die Erkenntnisse über die verkehrlichen Wirkungen des automatisierten Fahrens – nicht nur in der Schweiz - massgeblich vorangebracht. Die Forschungsziele wurden erreicht, obwohl die Themenschwerpunkte sinnvollerweise etwas verschoben werden mussten.

Umsetzung:

Die Forschungsergebnisse werden einen wesentlichen Einfluss auf die schweizerischen Diskussionen zum Umgang mit automatisiertem Fahren haben. Des Weiteren stellen sie einen wichtigen Input für das gegenwärtig laufende ASTRA-Forschungspaket «Auswirkungen des automatisierten Fahrens» (ASTRA 2017/004 und /007, ASTRA 2018/002, /003, /005 und /006) dar. Aber auch auf internationaler Ebene ermöglichen sie fundierte Diskussionen auf einer verbesserten Grundlage und ermöglichen technische, rechtliche sowie organisatorische Vorbereitungen auf die Folgen der Automatisierung von Fahrzeugen.

weitergehender Forschungsbedarf:

Der weitergehende Forschungsbedarf ist detailliert in Kapitel 6.6 des Schlussberichts dargelegt.

Einfluss auf Normenwerk:

Vorerst kein unmittelbarer

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Fehlberg Vorname: Hauke

Amt, Firma, Institut: Bundesamt für Strassen (ASTRA)

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Hauke Fehlberg

Forschung im Strassenwesen des UVEK: Formular 3 Seite 3 / 3

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter www.astra.admin.ch (*Forschung im Strassenwesen --> Downloads --> Formulare*) heruntergeladen werden.

SVI Publikationsverzeichnis

Das Publikationsverzeichnis der SVI-Forschungsarbeiten kann unter www.svi.ch (Forschung -> Forschungsprogramm, Stand der Forschung und Berichte) heruntergeladen werden.