



Potentiale Automatisierter Verkehrssysteme – PAVE

Endbericht

Forschungsprojekt gefördert durch das
Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur



Laufzeit: 10/2018 – 12/2020 (03/2021)

Projektträger: VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin

Datum: 20.12.2021

Version: 1.0

PAVE



Partner (Forschungsnehmer)

Internationale Akademie Berlin gGmbH (INA)

FKZ: 16AVF2147A

Institut für Internationale Stadtforschung (InUrban)

Kracht, Matthias (Koordinator)	ORCID: 0000-0003-2896-7726
Chemnitz, Hans Dieter	ORCID: 0000-0002-5838-0232
Küßner, Gudrun	ORCID: 0000-0002-5005-1899
Diehr, Marion	ORCID: 0000-0001-5283-0346

Institut für Innovationstransfer (IfI)

Hoth, Philipp	ORCID: 0000-0001-8924-7111
Hammler, Matthias	ORCID: 0000-0002-2292-0575



Technische Universität Berlin

FKZ: 16AVF2147D

Institut für Land- und Seeverkehr, Fachgebiet

Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik

Schlenther, Tilmann	ORCID: 0000-0001-6781-6918
Kaddoura, Ihab	ORCID: 0000-0002-0940-2255
Nagel, Kai	ORCID: 0000-0003-2775-6898



Otto von Guericke Universität Magdeburg

FKZ: 16AVF2147E

Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbes. Management Science

Ehmke, Jan	ORCID: 0000-0001-8474-7483
Haferkamp, Jarmo	ORCID: 0000-0002-5914-7539
Kötschau, Rico	ORCID: 0000-0002-5452-0859



Robert Bosch GmbH, Stuttgart

FKZ: 16AVF2147B

Kromer, Markus	ORCID: 0000-0003-4380-7536
Triebke, Henriette	ORCID: 0000-0002-5047-7320



IAV GmbH, Berlin

FKZ: 16AVF2147F

Winter, Hans-Christian	ORCID: 0000-0001-9434-010X
Stottele, Moritz	ORCID: 0000-0003-1431-998X
Kamal Goma, Noran	ORCID: 0000-0002-6593-888X

weitere Partner



CARL BENZ ACADEMY

Carl Benz Academy - First Global Cloud Academy GmbH (CBA), Berlin

Schönebeck, Manfred	ORCID: 0000-0003-1403-7624
---------------------	----------------------------

**Müller&Mehlmann
Consultants**

Müller, Rolf A.	ORCID: 0000-0003-1584-329X
Mehlmann, Olaf	ORCID: 0000-0002-2897-6828

PAVE

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	1
2. Thema und Ziele des Verbundprojekts	2
3. Stand von Wissenschaft und Technik	5
3.1 Einleitung	5
3.2 Stufen der Automatisierung	5
3.3 Auswirkungen der fahrerlosen Fahrzeuge	9
3.4 Recht, Haftung & Versicherung	23
3.5 Logistik	25
3.6 Vor- & Nachteile	30
3.7 Zusammenfassung	35
4. Projektergebnisse	36
4.1 Szenarien	36
4.1.1 Methodik	36
4.1.2 PAVE - Szenarios	38
4.1.3 Abgrenzung	38
4.1.3.1 Personen-, Wirtschafts-, Öffentlicher-, & Güterverkehr:	38
4.1.3.2 Regional: Berlin, Deutschland & EU	38
4.1.3.3 Automatisches / Autonomes Fahren	39
4.1.4 Fragestellung für den Szenarioprozess	39
4.1.5 Analyse des Szenario-Umfelds	40
4.1.5.1 Politik / Rechtliche Fragen	40
4.1.5.2 Wirtschaft	41
4.1.5.3 Technologie	41
4.1.5.4 Gesellschaft	42
4.1.5.5 Ökologie	43
4.1.5.6 Urbane Regulation	43
4.1.6 Faktorenbewertung & -Auswertung	45
4.1.6.1 Deskriptoren-Beschreibung	47
4.1.6.2 Szenariogerüst	56
4.1.6.3 Szenariostorys	58
4.1.6.3.1 Szenario 2 – das schöne individuelle Szenario	58
4.1.6.3.2 Szenario 3 – Güterverkehrsszenario (Smart Robo City)	58
4.1.6.3.3 Szenario 4 – das schöne kollektive Szenario	60
4.1.6.3.4 Szenario 5 – AVFIV	61
4.1.7 Use Case Steckbriefe	62
4.1.7.1 Szenario 2 das schöne individuelle Szenario	62

PAVE

4.1.7.2	Szenario 3 Güterverkehrsszenario	63
4.1.7.3	Szenario 4 das schöne kollektive Szenario	64
4.1.7.4	Szenario 5 AVFIV	66
4.1.8	Zusammenfassung	68
4.2	Empirische Ergebnisse (INA)	70
4.2.1	Individuelle Mobilität - Mobilitätstypen & Akzeptanz (INA/IfI)	70
4.2.1.1	Einleitung	70
4.2.1.2	Ziele, Methodik & Untersuchungsdesign	71
4.2.1.3	Tiefenpsychologische Interviews	72
4.2.1.4	Fokusgruppen	79
4.2.1.5	Onlinebefragung zur Ermittlung von Mobilitätstypen	89
4.2.1.6	Handlungsempfehlungen	113
4.2.2	Wirtschaftsverkehr/ Personenwirtschaftsverkehr (INA/InUrban)	117
4.2.2.1	Einleitung	117
4.2.2.2	Demand Responsive Transport heute und morgen	118
4.2.2.2.1	Demand Responsive Transport – Akteure u. Geschäftsmodelle	118
4.2.2.2.2	Use Cases DRT (Akzeptanz DRT und autonome DRT-Shuttle)	124
4.2.2.3	Geteilte autonome DRT-Verkehre - Potentiale und Chancen	125
4.2.2.4	Politische/institutionelle Rahmenbedingungen und Rolle der Kommunen	130
4.2.2.5	Gütertransport und Lieferdienste (Einführung)	136
4.2.2.5.1	Herausforderungen in der Logistikbranche heute	137
4.2.2.5.2	Chancen und Hindernisse für autonome Anwendungen	138
4.2.2.5.3	Wünsche an die Städte und Kommunen	142
4.2.2.5.4	Use Cases	144
4.2.2.5.5	Autonomes Fahren als Beitrag zu effizienterer Warenlogistik	150
4.2.2.6	Fazit	156
4.2.2.7	Handlungsempfehlungen	160
4.3	AVF-Potentiale in der urbanen Mobilität (INA-InUrban)	164
4.3.1	Use Cases	164
4.3.2	Mobilitätsangebote im urbanen Personenverkehrsmarkt	169
4.3.2.1	Datengrundlage, AVF-Fahrzeuge, Kosten, Personenverkehr	169
4.3.2.2	Abschätzung auskömmlicher Preise/ Fahrtkosten	170
4.3.2.3	Grenzkostenbetrachtungen zur Beschreibung der Mobilitätsangebote	171
4.3.2.3.1	Grenzkosten innere Stadt	173
4.3.2.3.2	Grenzkosten äußere Stadt	175
4.3.2.3.3	Betrachtung der Fahrpreissenkung des ÖPNV durch Automatisierung	177
4.3.2.3.3	Zusammenfassung Grenzkostenbetrachtung	178

PAVE

4.3.2.4	Mobilitätsnachfrage im urbanen Personenverkehrsmarkt	179
4.3.2.4.1	Input zur Potentialabschätzung AVF-Personenverkehr	179
4.3.2.4.2	AVF Nachfrage im 0-Fall	179
4.3.2.4.3	Restriktionen im urbanen Personenverkehrsmarkt	182
4.3.2.4.4	Zusammenfassung Mobilitätsnachfrage	186
4.3.3	AVF-Potentiale in der urbanen Mobilität, Marktmodelle	187
4.3.3.4	Nachfrage Ridesharing	187
4.3.3.5	Marktmodell Ridesharing	189
4.3.3.6	Marktmodell Robotaxi	190
4.3.3.7	Zusammenfassung Marktmodell	192
4.3.4	QUANTOR®-basierte Szenarien des künftigen AVF	193
4.3.4.1	Die QUANTOR®-Methodik	193
4.3.2.2	Ausgewählte AVF Szenarien auf Grundlage der PAVE-Befragung	197
4.3.2.3	Zusammenfassung	201
4.4	Ausgewählte Use Cases (TU Berlin/ Gesamtteam)	203
4.4.1	Robotaxi	203
4.4.2	Pooling	203
4.4.4	Dual Use (Personen/Wirtschaftsverkehr)	204
4.5	Modellrechnung aus verkehrlicher Sicht (TU Berlin)	206
4.5.1	Methodik u. Erkenntnisse zur Simulation automatisierter On-Demand-Shuttles	206
4.5.1.1	Grundlagen der Methodik	206
4.5.1.2	Erweiterung der Methodik: Strategische Repositionierung von Fahrzeugen	207
4.5.1.3	Erweiterung der Methodik: Abschätzung der benötigten Flottengröße unter Annahme einer Zielwartezeit	208
4.5.1.4	Erweiterung der Methodik: Simulation von Dual-Use-Fahrzeugen	208
4.5.1.5	Erweiterung der Methodik: Abbildung von intermodalen Wegen	209
4.5.1.5	Verfeinerung des Open-Berlin-Szenarios	209
4.5.1.6	Untersuchung der Skalierungseffekte von Pooling-Services	209
4.5.2	Grundlegende Annahmen zur Simulation der Use cases Robotaxi und Pooling	210
4.5.3	Wesentliche Erkenntnisse aus der Simulation automatisierter On-Demand-Shuttles	211
4.5.4	Zusammenfassung	218
4.6	Evaluation identifizierter Transport- und Mobilitätsdienstleistungen (OvGU)	221
4.6.1	Evaluationsframework	221
4.6.1.1	Optimierungsframework	221
4.6.1.2	Schnittstelle zur Verkehrssimulation	222
4.6.2	Transportdienstleistungen	223
4.6.2.1	Roboterbasierte Zustellungen	223
4.6.2.2	Vergleich automatisierter Belieferungskonzepte	224

PAVE

4.6.2.2.1	Service Design und Kostenkalkulation	224
4.6.2.2.2	Lösungsmethodik und weitere Parameter	225
4.6.2.2.3	Experimenteller Aufbau	226
4.6.2.2.4	Ergebnisse	227
4.6.3	Mobilitätsdienstleistungen	231
4.6.3.1	Design zuverlässiger Mobilitätsdienstleistungen	231
4.6.3.2	Strategisches Flottenmanagement für automatisierte Ride-Sharing-Dienste	233
4.6.3.2.1	Service Design und Fahrzeugtypen	233
4.6.3.2.2	Lösungsmethodik	234
4.6.3.2.3	Experimenteller Aufbau	235
4.6.3.2.4	Ergebnisse	236
4.6.3.2.5	Zusammenfassung	239
4.6.3.3	Bedeutung von Nachfrage- und Erfüllungssteuerung	240
4.6.4	Zusammenfassung	244
4.7.	Ableitung von Fahrzeuganforderungen und energetische Bewertung (RBosch)	245
4.7.1	Berechnung des Energieverbrauchs neuer Fahrzeugkonzepte und Dienste (RBosch)	246
4.7.2	Szenariobasierte Fahrzeuganforderungen	253
4.7.3	Sensitivitätsanalyse	263
5.	Ergebniszusammenfassung	266
5.1	Zusammenfassung Kap. 4.1 Szenarien	266
5.2	Zusammenfassung Kap. 4.2.1 Individuelle Mobilität - Mobilitätstypen & Akzeptanz	268
5.3	Zusammenfassung Kap. 4.2.2 Wirtschaftsverkehr/ Personenwirtschaftsverkehr	269
5.4	Zusammenfassung Kap. 4.3. AVF-Potentiale in der urbanen Mobilität	271
5.5	Zusammenfassung Kap. 4.5 Modellrechnung aus verkehrlicher Sicht	273
5.6	Zusammenfassung Kap. 4.6 Evaluation von Transport- und Mobilitätsdienstleistungen	275
5.7	Zusammenfassung Kap. 4.7 Fahrzeuganforderungen und Energetische Bewertung	277
5.8	Fazit, AVF-Potentiale Personenmobilität, Quantitativ (Kap 4.3-4.7)	279
6.	Handlungsempfehlungen	282
7.	Verzeichnisse	283
8.	Veröffentlichungen/Referenzen	287
9.	Anhang	302

PAVE

1. Zusammenfassung

Mit der rasanten technischen Entwicklung im Bereich automatisiert und vernetzt fahrender Fahrzeuge wird eine signifikante Veränderung des Mobilitätsverhaltens, der Mobilitätsorganisation und damit der Verkehrsorganisation insgesamt erwartet. Auch im Bereich des Güterverkehrs ergeben sich neue Geschäftsmodelle und Herausforderungen. Ziel dieses Forschungsprojektes war es, auf Basis des heutigen Mobilitätsverhaltens und von Transportaufgaben im urbanen Raum (1) Visionen zukünftiger Verhaltens- und Organisationsformen durch autonom fahrende Fahrzeuge zu entwickeln, (2) Anforderungen an Fahrzeuge abzuleiten, (3) neue Organisations- und Dienstformen zu entdecken und (4) ihre Wirkung auf das Verkehrssystem, Umwelt und Sicherheit abzuschätzen und zu bewerten. Die Betrachtung erfolgte im Sinne eines Marktmodells, welches analysiert, welche Leistungen durch ein System des Automatisierten-Vernetzten-Fahrens (AVF-System) möglich werden, welche Bedarfe und Nachfragen es geben wird, und für welche Systemausprägungen, Dienste und Fahrzeuge eine hohe Akzeptanz zu erwarten ist. Das Projekt bezieht sich im ersten Schritt räumlich auf den Großraum Berlin, kann aber auch ausgeweitet werden. Es ist in die folgenden vier aufeinander aufbauenden Teilbereiche gegliedert.

Konsistente, alternative Zukunftsbilder des Einflusses von hochautomatisierten bzw. autonomen Fahrzeugen auf das zukünftige Verkehrsgeschehen lassen sich in Szenario-Prozessen gewinnen. Die Entwicklung der Szenarien basiert auf einer Umfeldanalyse in Verbindung mit Experteninterviews und behandelt u.a. die Ziele/Zielkonflikte der am AVF-System Beteiligten und potentiellen Nutzer, die Systemarchitektur zentral/dezentral und die Mobilitätsnachfrage (Personen und Güter) privater Haushalte und Unternehmen. Die im Ergebnis erzeugten Zukunftsbilder beschreiben die Veränderungen der Organisationsstrukturen, Abläufe, Dienste und einzusetzenden Fahrzeuge.

Die empirischen, qualitativen Untersuchungen basieren auf ausgewählten Use Cases, die aus den Szenarien abgeleitet und für die Durchführung von Einzel-Interviews und Fokusgruppen aufbereitet werden. Dazu zählt die Bereitstellung von Demonstratoren und Mitfahrversuche in automatisch fahrenden Fahrzeugen. Das Ergebnis der empirischen Erhebungen beinhaltet die Beschreibung von veränderten und neuen Mobilitätstypen und Mobilitätszwecken mit Faktoren und Attributierungen des Verhaltens. Die ersten Anforderungen an Systeme, Dienste und Fahrzeuge werden korrespondierend zu den Mobilitätszwecken formuliert werden. Auf dieser Grundlage werden dann Datenbasen für innovative Planungs- und Steuerungsverfahren sowie Simulations- und Verkehrsmodelle referenziert bzw. abgeleitet.

Das durch AVF-Systeme erreichbare Potential wird mit mehreren quantitativen Methoden ermitteln, u.a. auf Basis des Quantitative Reasoning, welches die entwickelten Mobilitätstypologien, die aus dem Szenarioprozess bekannten Prämissen und Deskriptoren sowie die relevanten Strukturdaten berücksichtigt. So wird ein grobes Mengengerüst des Untersuchungsbereiches abschätzbar.

Mit den Daten aus den empirischen Erhebungen und des Mengengerüsts konnten die der Verkehrssimulation zugrunde liegenden Strukturdaten ergänzt und eine konsistente Datenbasis mit der räumlichen, zeitlichen Verteilung und Häufigkeit der Fahrten (Quellen und Senken) geschaffen werden. Ergebnis ist eine zeitliche und räumliche Mobilitätsnachfrage der einzelnen Mobilitätstypen. Diese Datenbasis ist so abgestimmt, dass sie sowohl für die Planungs- und Steuerungsverfahren als auch die Verkehrssimulation eine gemeinsame Plattform bildet.

Die AVF-Systeme bieten die Chance mit neuen Organisationsformen, Abläufen und Fahrzeugen die Effizienz der Mobilitäts- und Verkehrsabwicklung zu verbessern. Diese Optimierungspotentiale bei der Systemauslegung (strategisch) und Betrieb (operativ) können mit neuen Planungs- und Steuerungsverfahren erschlossen werden. Dazu wurden Untersuchungen auf Basis von Verfahren der mathematischen Optimierung (Operations Research) und deren Umsetzung in leistungsfähige

PAVE

Algorithmen mit den Zielen Akzeptanz, Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung durchgeführt. Mittels Sensitivitätsanalysen und Verkehrssimulation wurden die entwickelten Planungs- und Steuerungsverfahren evaluiert und erlauben damit letztendlich die Bewertung der neuen Organisationsformen, Abläufe und Fahrzeuge.

In das Projekt wurde eine bestehende Verkehrssimulation eingebracht, in die die entwickelten Szenarien, die identifizierten Mobilitätstypen sowie die mikroskopische Angebotsoptimierung integriert bzw. gekoppelt wurden. Für die verschiedenen Szenarien und Mobilitätstypen erfolgten detaillierte Untersuchungen zur Wechselwirkung von Angebot und Nachfrage sowie der Modellsensitivität. Neben einer Stauanalyse, Berechnung von Wartezeiten und Reisezeiten erfolgte eine Szenario-bezogene Untersuchung sowie eine personen- bzw. mobilitätstypenbezogene Gewinner-Verlierer-Analyse. Die zum Einsatz gekommenen Werkzeuge der mathematischen Optimierung sowie der Verkehrssimulation erlauben eine Evaluation sowohl hinsichtlich einzelwirtschaftlicher Auswirkungen des AVF-Systems als auch auf die Auswirkungen auf das Verkehrssystem als Ganzes.

Die folgenden Ergebnisse, Transfers und Empfehlungen wurden abgeleitet:

- Konzepte für neue Mobilitäts- und Transportdienstleistungen
- Anforderungsprofile an Fahrzeuge, Abschätzung des erreichbaren Potentials
- Ableitung von Entwicklungspfaden in Abhängigkeit der AVF-Technologieentwicklung und Autonomiestufen, der Umfeldentwicklungen und Rahmenbedingungen im Rahmen von Szenarien.
- Innovative Verfahren zur Planung und Steuerung von Mobilitäts- und Transportaufgaben auf Basis von Verfahren der mathematischen Optimierung
- Erweiterung von Simulationsmodellen von Verkehrssystemen mit der Eignung zum Transfer in die genannten Anwendungsbereiche von Personen- und Güterverkehr in AVF-Systemen

2. Thema und Ziele des Verbundprojekts

Die Bundesregierung erwartet durch „Automatisiertes und vernetztes Fahren“ ein erhebliches Potential für den Straßenverkehr, insbesondere hinsichtlich „der Steigerung der Verkehrssicherheit, der Verbrauchs- und Emissionsreduzierung, einer mittelfristigen Verbesserung der Verkehrseffizienz und der nachhaltigen Stärkung des Wirtschafts- und Innovationsstandorts Deutschland“.

Das heutige historisch gewachsene Verkehrssystem ist kompliziert und komplex, gleichwohl kann es als „ein sich selbst optimierendes System“ gelten. Besonders das Straßenverkehrssystem hat eine hohe individuelle Akzeptanz und Nutzen, die durch Flexibilität und Innovationsgrad des Systems erreicht werden. Der Erfolg des Straßenverkehrssystems, durch den Mobilität nahezu zu einem ubiquitären Gut wurde, hat wie jede massenhafte Erscheinung ungünstige Folgen insbesondere in den Bereichen Umwelt, Sicherheit, Verkehr und gesellschaftliche Akzeptanz. Die Veränderung des Verkehrssystems wird in einem Umfeld stattfinden, das durch Digitalisierung, Klimawandel und Urbanisierung gekennzeichnet ist.

Diese Betrachtung betrifft weniger die technischen Aspekte sondern die Schwerpunkte Organisation des Straßenverkehrs und gesellschaftliche Aspekte inklusive Akzeptanz.

Gegenstand dieses Vorhabens war deshalb, in einem sich ändernden Umfeld die Potentiale der Veränderungen durch Automatisierung des Verkehrssystems in ausgewählten Bereichen abzuschätzen. Räumlicher Schwerpunkt der Untersuchung ist der urbane Raum am Beispiel Berlins, von der City bis zur Peripherie.

Zielsetzung

Mit der rasanten technischen Entwicklung im Bereich automatisiert und vernetzt fahrender Fahrzeuge wird eine signifikante Veränderung des Mobilitätsverhaltens, der Mobilitätsorganisation und damit der Verkehrsorganisation insgesamt erwartet. Auch im Bereich des Güterverkehrs ergeben sich neue Geschäftsmodelle und Herausforderungen. Ziel dieser Untersuchung ist, auf Basis des heutigen Mobilitätsverhaltens und der Transportaufgaben im urbanen Raum, Visionen zukünftiger Verhaltens- und Organisationsformen durch autonom fahrende Fahrzeuge zu entwickeln und die Anforderungen an Fahrzeuge abzuleiten, neue Organisations- und Dienstformen zu entdecken und Ihre Wirkung auf das Verkehrssystem abzuschätzen und zu bewerten. Ein Schwerpunkt der Betrachtung ist, ob und in welchen Bereichen die zukünftigen Systeme die Grenzen zwischen den heute spezialisierten und individualisierten Verkehrsarten und Fahrzeugen verwischen oder manifestieren. Dies betrifft zum Beispiel die Grenze zwischen öffentlichem und individuellem Verkehr, oder die Grenze zwischen dem Wirtschaftsverkehr (hier insbesondere Kurier-, Express- und Paketdienstleister) und individuellem Verkehr. Zum Beispiel könnten geeignete Fahrzeuge entsprechend dem Tagesgang zum Personentransport und/oder Paketdienst verwendet werden (Dual-/Multi-Use).

Besonderheiten und Alleinstellungsmerkmale

Das Projekt ist so gestaltet, dass die Arbeitspakete aufeinander aufbauen, aber jedes Arbeitspaket Ergebnisse liefert, die für sich kommuniziert und transferiert werden können. Bisher sind keine Arbeiten bekannt, die ausgehend von Szenarien eines urbanen Raums und daraus abgeleitet Produkt- und Dienstleistungsszenarien entwickelt haben, daraus in empirischen Studien die Wandlung bekannter und die Entstehung neuer Mobilitätstypologien entwickelt haben, daraus neue Organisationsformen im Güter- und Personenverkehr in Modellen abgebildet und mit neuen Optimierungsansätzen bewertet haben sowie daraus die Wirkung auf das Verkehrssystem in Simulationsmodellen abgeschätzt haben.

Potentiale Automatisierter Verkehrssysteme, PAVE

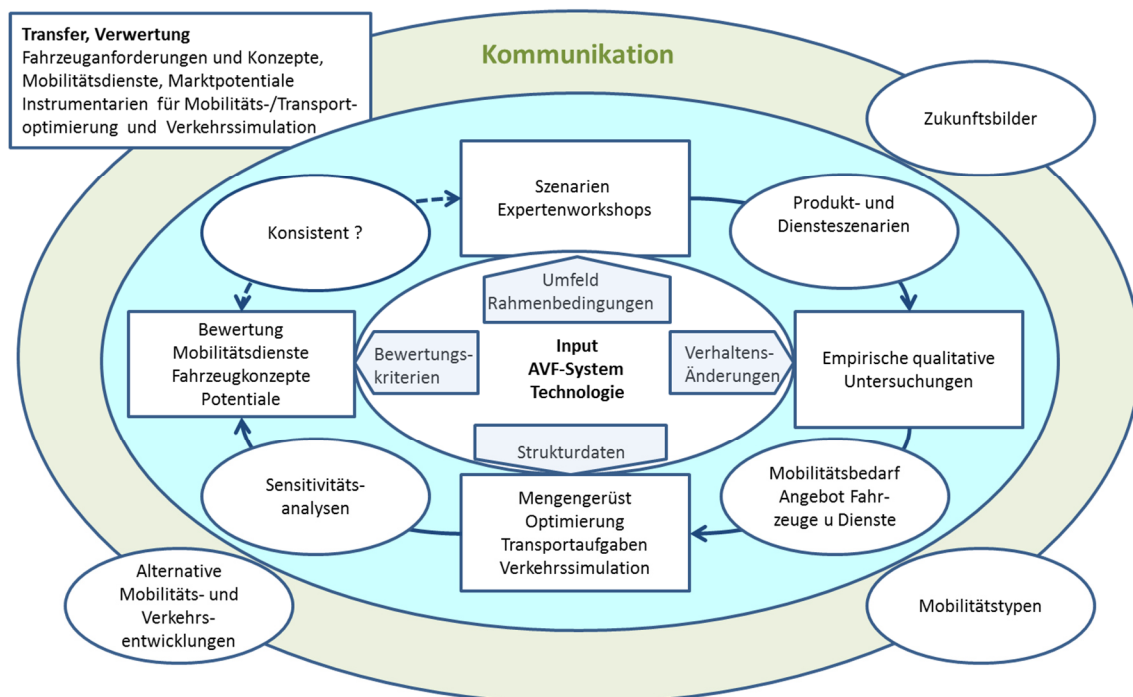


Abbildung 1: Projektstruktur

PAVE

Das Vorgehen gestattet die gefundenen, konkretisierten Lösungen nochmals in späteren Durchläufen zu spezifizieren und hinsichtlich Verwertungspotential zu bewerten. Gleiches gilt für neuere, bisher unbekannte Entwicklungen in dem sich dynamisch verändernden Bereich des autonomen Fahrens.

3. Stand von Wissenschaft und Technik

3.1 Einleitung

Dieses Kapitel stellt den Stand von Wissenschaft und Technik in der Startphase des Forschungsprojekts PAVE dar (bis ca. 2019). Neuere Erkenntnisse im Projektverlauf werden direkt in den Schilderungen der Projektergebnisse diskutiert.

Grundsätzlich lässt sich das automatisierte Fahren folgendermaßen definieren: Automatisiertes Fahren bedeutet das selbstständige, zielgerichtete Fahren eines Fahrzeuges im realen Verkehr mit bordeigenen Sensoren, nachgeschalteter Software und im Fahrzeug gespeichertem Kartenmaterial für die Erfassung der Fahrzeugumgebung (VDA, 2015). Kürzer fasst sich Daimler: „Autonomes Fahren bedeutet das selbstständige, zielgerichtete Fahren eines Fahrzeugs im realen Verkehr, ohne Eingriff des Fahrers.“ (Daimler, 2019b). Deutlich wird aber in beiden Definitionen, dass das Fahrzeug selbstständig und zielgerichtet fahren können soll. Wie beim Grad der Automatisierung unterschieden werden kann, wird im Folgenden aufgezeigt.

3.2 Stufen der Automatisierung

SAE International, eine Organisation, die sich u.a. für die Standardisierung im Automobilbereich einsetzt, hat die Stufen der Automatisierung folgendermaßen klassifiziert:

SAE-Level	Bezeichnung der Stufe	Beschreibung	Entsprechende Funktion
Fahrer überwacht das Fahrumfeld			
Level 0	No Automation	Übernahme der dynamischen Fahrfunktionen vollständig durch den Fahrer	<ul style="list-style-type: none"> • Spurverlasswarner • Totwinkelüberwachung
Level 1	Driver Assistance	Lenken oder Bremsen/Beschleunigen durch ein Fahrerassistenzsystem in bestimmten Fahrsituationen	<ul style="list-style-type: none"> • Adaptive Cruise Control • Parklenkassistent • Spurhalteassistent
Level 2	Partial Automation	Lenken und Bremsen/Beschleunigen durch ein Fahrerassistenzsystem in bestimmten Fahrsituationen	<ul style="list-style-type: none"> • Parkmanöverassistent • Stauassistent • Schlüsselparken
Automatisierungssystem überwacht das Fahrumfeld			
Level 3	Conditional Automation	Übernahme aller Aspekte der dynamischen Fahraufgabe durch das Automatisierungssystem in bestimmten Fahrsituationen, Fahrer reagiert angemessen, auf die Aufforderung einzugreifen	<ul style="list-style-type: none"> • Fahren im Stau, auf der Autobahn, etc.
Level 4	High Automation	Übernahme aller Aspekte der dynamischen Fahraufgabe durch das Automatisierungssystem in bestimmten Fahrsituationen; auch wenn der Fahrer nicht angemessen auf die Aufforderung reagiert einzugreifen	<ul style="list-style-type: none"> • Valet Parking • Fahren im Stau, auf der Autobahn, etc.
Level 5	Full Automation	Vollständige Übernahme aller Aspekte der dynamischen Fahraufgabe durch das Automatisierungssystem in allen Fahrsituationen	

Tabelle 1: Klassifizierung der Automatisierung

(Eigene Darstellung nach (SAE International, 2014) & (VDA, 2015))

PAVE

Die Klassifizierung der SAE hat sich allgemein als Standard durchgesetzt und wird entsprechend im Folgenden verwendet.

Je höher die Stufe der Automatisierung, desto mehr Technologie kommt im Fahrzeug zum Einsatz und desto komplexer sind die Komponenten. Dies sind z.B. die notwendige Sensorik (Umfelderfassung, siehe auch Abbildung 2), die Kommunikationsinfrastruktur, das hochauflösende Kartenmaterial und die Fahrzeugsoftware. Dabei muss jede Komponente funktionstüchtig sein, damit das System funktioniert. Des Weiteren entstehen durch die komplexen Komponenten erhöhte Kosten für die Herstellung der Fahrzeuge (IHK, 2018).

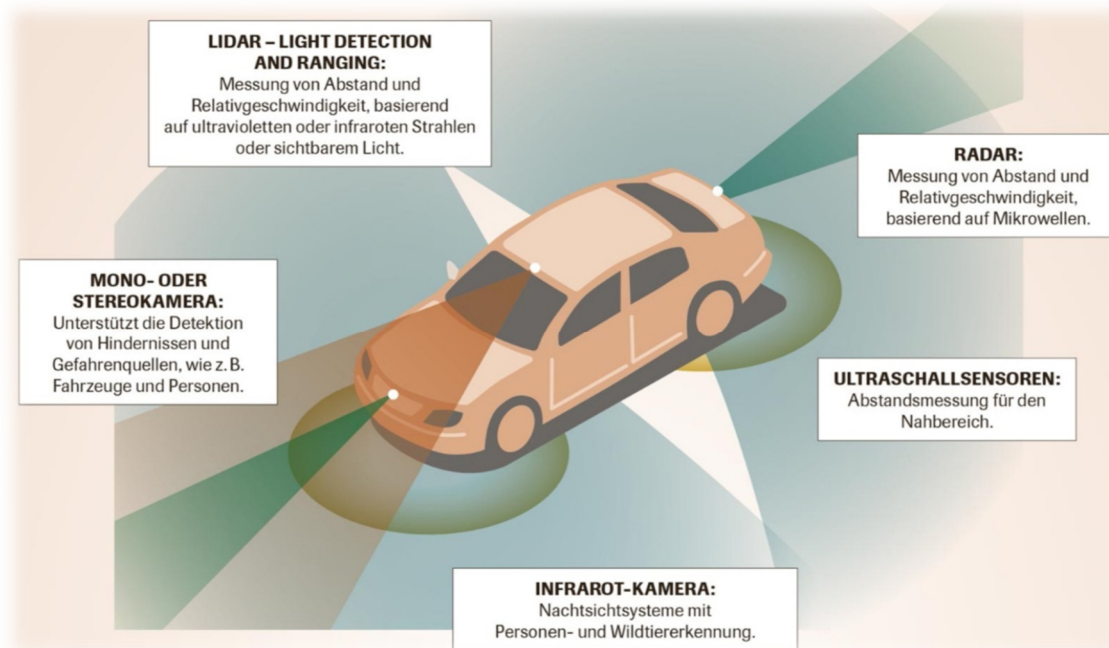


Abbildung 2: Sensoren für Fahrassistenzsysteme (VDA, 2015)

Audi bietet seit 2017 in seinem Modell A8 einen Staupiloten an, der hochautomatisiertes Fahren auf Level 3 ermöglicht. Dieser kann bei Stau oder zähfließendem Verkehr bis 60 km/h die Fahraufgabe übernehmen. Verlässt der Wagen aber diese Situation oder ist mit ihr überfordert, wird der Fahrer aufgefordert, die Führung des Fahrzeugs wieder zu übernehmen (Audi, 2017b). Mercedes-Benz plant einen solchen Assistenten 2020 in der neuen S-Klasse einzuführen, der dann sogar bis 130 km/h die Kontrolle übernehmen kann (Becker, 2019). Waymo (ehemals Google Self-Driving Car) startete mit *Waymo One*TM 2019 einen Fahrdienst in Phoenix, Arizona der komplett fahrerlos ist und Level 4 erfüllt. Dieser ist aber noch in der Startphase und wird sukzessive ausgebaut (Waymo, 2019). Litman schätzt, dass autonome Fahrzeuge zwischen 2040 und 2060 erschwinglich sein werden für die breite Masse (Litman, 2019). Diesen Zeitraum nennen einige Autoren, wie Axhausen und Hörl herausfinden. So prognostizieren Bierstedt et al. (2014, gelesen in Axhausen et al. 2019), dass Autonome Fahrzeuge (AV) bis 2040 in kontrollierten Umgebungen verfügbar sein werden und auf öffentlichen Straßen bis 2050. Optimistischere Studien gehen von einer vollständigen Automatisierung des Individualverkehrs schon 2025 bzw. 2030 aus (Mosquet et al. 2015 und Bernhart et al. 2016).

Dabei wird erwartet, dass sich die Entwicklung im Personen- und Güterverkehr ähneln wird. Trotzdem geht man davon aus, dass die Technologie sich zuerst im Güterverkehr durchsetzen wird, da insbesondere auf den für den Güterfernverkehr genutzten Fernstraßen kontrollierte Straßenverhältnisse vorliegen und die Branche unter einem enormen Kostendruck steht (Axhausen, et al., 2019).

PAVE

Voraussetzung und Herausforderungen auf dem Weg zum AV ist die zuvor schon erwähnte Technologie, die zur Verfügung stehen muss, wie Sensoren und Kommunikationstechnik. So braucht ein AV ein komplexeres Computersystem als ein Flugzeug (Litman, 2019). Ein Beispiel dafür ist auch der Audi A8 der 2017 mit einer Rechenleistung von 2,5 Tera-OPS (2,5 Billionen Rechenschritte pro Sekunde) bei Marktstart sehr gut ausgerüstet war, neuerdings gibt es aber von ZF einen Rechner der 600 Tera-OPS schafft und so noch komplexere Straßensituationen meistern kann (Becker, 2019).

Besonders wichtig ist dabei auch die Kommunikationstechnik, mit der das Fahrzeug mit anderen Fahrzeugen (V2V) oder mit der Infrastruktur (V2I) kommuniziert, um so möglichst optimal durch den Verkehr zu manövrieren. Denkbar sind aber auch AVs die keine Kommunikation benötigen und sich nur durch ihre Sensorik ein Bild von der Umgebung machen (Axhausen, et al., 2019). Eine weitere Herausforderung ist die Weiterentwicklung des Elektroantriebes bzw. der dafür notwendigen Batterietechnologie, da oftmals angenommen wird, dass die AVs elektrisch angetrieben sind (Litman, 2019).

3. Herausforderungen

Neben den zuvor schon genannten Herausforderungen auf dem Weg zum autonomen Fahren, gibt es noch Weitere. Wenn auch die Meinungen auseinandergehen, wann und in welcher Form sich AVs durchsetzen oder verfügbar sein werden, so sind sich zumindest über den Weg dorthin viele Autoren einig. Es müssen einige Herausforderungen gemeistert werden, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

Haftungsfragen

Die Haftungsfrage ist eine der meistdiskutierten Fragen rund um das Thema automatisiertes Fahren. Dabei wird sich gefragt, wer die Verantwortung trägt, wenn ein automatisiertes Fahrzeug einen Unfall verursacht, bei dem etwas beschädigt oder eine Person verletzt wird. Bis Level 3, wie beim Audi A8, ist diese Frage noch einfach zu beantworten, da in diesem Fall der Fahrer dauerhaft verpflichtet ist, jederzeit nach Aufforderung des Fahrzeugs wieder die Kontrolle über dieses zu übernehmen. Geschieht dies nicht, stoppt das System das Fahrzeug und bringt es durch einen Not-Halt zum Stehen (Audi, 2017a).

In den höheren Stufen, bei denen der Fahrer seine Aufmerksamkeit anderen Tätigkeiten widmen darf, ist die Haftungsfrage schon deutlich schwerer zu beantworten. Es kann nämlich im schlimmsten Fall auch zu einer Dilemma-Situation kommen, in der das System zwischen mehreren Übeln wählen zu muss. In diesem Fall spielt sogar noch eine ethische Komponente mit hinein. Bei der Haftungsfrage ist der Gesetzgeber in der Verantwortung, den entsprechenden rechtlichen Rahmen zu setzen, in dem die Frage eindeutig geklärt ist. Dies ist insbesondere wichtig, um ein Vertrauen beim Verbraucher zu schaffen (IHK, 2018). Zum anderen ist dies auch für Fahrer von kommerziellen Fahrzeugen wichtig, da es Service-Betreiber geben kann, die die Verantwortung möglichst noch beim Fahrer belassen möchten, so lange dieser an Bord ist (Axhausen, et al., 2019).

Deutschland hat 2017 das automatisierte Fahren in einem einheitlichen Rahmen geregelt und so die Voraussetzungen für hoch- und vollautomatisiertes Fahren geschaffen. Dazu wurde auch eine Ethikkommission eingesetzt, die 20 ethische Regeln aufstellte, in denen u.a. festgehalten wurde, dass der Mensch immer Vorrang hat. In Deutschland oder auch international gibt es aber noch keine einheitliche Regelung zum autonomen Fahren, bei dem der Mensch nur noch Passagier ist. Dort besteht noch Handlungsbedarf, z. B. am Wiener Abkommen für den Straßenverkehr ((Daimler, 2019a) & (IHK, 2018)).

Gesellschaft

Eine gesellschaftliche Barriere kann durch die nicht geklärte Haftungsfrage entstehen, da sonst das automatisierte Fahren nicht akzeptiert wird.

Zentraler sind hier aber die Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt durch die AVs. So wird davon ausgegangen, dass AVs zu einem Abbau der Arbeitsplätze im Transport- und Logistikwesen führen werden, wie Axhausen et al. in der Literatur herausfanden. Besonders betroffen soll dabei Fahrpersonal für den öffentlichen Verkehr, Taxis und Güterverkehr sein. Aber auch Arbeitsplätze in damit verbundenen Bereichen können betroffen sein wie die Wartung der Fahrzeuge oder auch die Notfallrettung, da weniger Unfälle passieren (Shanker, et al., 2013) gelesen in (Axhausen, et al., 2019). Betroffen sind vor allem Arbeitsplätze, die niedrige Löhne bieten und nur begrenztes Fachwissen voraussetzen (Axhausen, et al., 2019). Eine andere Studie fand aber heraus, dass wohl ein neuer Bedarf an Arbeitskräften und Fachleuten für Digitalisierung, E-Mobilität, Smart Mobility und vernetztes Auto entstehen wird. So wird auch erwartet, dass es eine Verschiebung weg vom klassischen Maschinenbau hin zu spezifischen IT-Fachleuten und Elektrotechnikern geben wird (Lemmer, 2016). Weitere Jobs könnten laut Axhausen et al. (2019) auch entstehen, indem Betreuungspersonal für Personen und Güter in den AVs eingesetzt wird.

Da die Risiken für den Arbeitsmarkt noch schwer abzuschätzen sind, wurden laut Guerra (2016, gelesen in Axhausen et al. 2019) kaum großstädtische Planungsvorhaben in Bezug auf AVs bekanntgegeben. Die negativen Auswirkungen einer AV zentrierten Infrastruktur könnten zu groß sein bzw. gesellschaftlich nicht akzeptiert werden.

Akzeptanz

Eine weitere Herausforderung ist es, in der Gesellschaft eine Akzeptanz für AVs zu schaffen. Diese entsteht als Folge von erkennbarem individuellem oder gesellschaftlichem Nutzen. Der Nutzen kann durch angebotene Dienstleistungen und Produkte vermittelt werden. Wichtig ist es dabei, dass sich die Menschen einen persönlichen Eindruck machen können und mit den AVs in Berührung kommen. Dies kann durch die Kommunen gefördert werden, indem sie die Technologie im öffentlichen Raum sichtbar machen durch „Living Labs“, also das Testen von AVs im realen Straßenverkehr. Das regt zum einen den gesellschaftlichen Diskurs an und zum anderen kommen die Bürger mit den AVs in Kontakt. So wurde beobachtet, dass automatisierte Fahrzeuge von anderen Verkehrsteilnehmern immer wieder gezielt zum Halten gezwungen wurden, um diese zu testen. Wichtig ist dann, dass die Technologie solche Tests erfolgreich besteht, damit bei den Menschen ein Vertrauen in die Technologie entsteht. Lemmer fand heraus, dass in verschiedenen Umfragen kein einheitliches Bild zur Akzeptanz von AVs in Deutschland vorherrscht. Einige Umfragen sagen, die Deutschen seien den AVs gegenüber positiv eingestellt, andere sehen eher eine skeptische Einstellung. Zusätzlich fand Lemmer in den Studien, dass die Menschen es als positiv ansehen, Stress beim Autofahren zu vermeiden oder auch die Mobilität im Alter zu wahren. Negativ wird aber über die Sicherheit diskutiert, da es eine Angst vor Technikausfällen und Kontrollverlust gebe. Allgemein sehen die Menschen ihre persönliche Freiheit durch die AVs in Gefahr, auch da durch die AVs eine große Menge an Daten gesammelt wird, was Sorgen um die Anonymität auslöst. Deshalb wünschen sich die Bürger eine führende Rolle der etablierten Automobilhersteller (Lemmer, 2016).

Axhausen et al. können dies noch mit der Erkenntnis ergänzen, die sie aus Chen (2015) und (Mosquet, et al., 2015) gewonnen haben, dass wohl zu Beginn Menschen mit hohem Interesse an Technologie als Einzige AVs nutzen werden, und erst durch Kostensenkungen und eine höhere Verfügbarkeit die AVs attraktiver werden als herkömmliche Transportmittel. Als weiteres Hindernis wird die Stellung des Autos als Statussymbol genannt (Krueger et al. 2016). Dies könnte sich aber auch wandeln, wenn das

PAVE

private AV zu einem noch stärkeren Statussymbol werden würde, als ein herkömmlicher Wagen. Solange ein Großteil des Verkehrs konventionell ist, wird die Akzeptanz der AVs gehemmt sein. Erst wenn sich dieses Verhältnis wandelt, steigt die Akzeptanz und es wird leichter, Infrastruktur-, Steuer- und Preisentscheidungen zu argumentieren (Axhausen, et al., 2019).

3.3 Auswirkungen der fahrerlosen Fahrzeuge

Auswirkungen auf die Kosten

Die Kosten können sich unterschiedlich entwickeln, je nachdem wie sich das restliche Umfeld um die AVs entwickelt. Grundsätzlich lässt sich aber sagen, dass die Kosten für die Anschaffung steigen werden, da komplexe und teure Komponenten verbaut werden müssen, um das automatisierte Fahren zu ermöglichen. So schätzt Berger, dass für einen Lkw der entsprechend Level 1 ausgestattet ist \$1.800 notwendig sind und für Stufe 5 sogar schon \$23.400. Dabei ist die Software für 85% der Kosten verantwortlich und die Hardware für 15% (Berger, 2016). Das IFT (International Transport Forum) schätzt die zusätzlichen Kosten auf knapp 5% der Gesamtkosten für einen Lkw. Zusätzlich sieht es die Chance, dass die Kosten für einen autonomen Lkw sogar unter denen eines konventionellen liegen können, da auf Dauer Ausstattung wie die Fahrerkabine wegfallen kann (ITF, 2017). Bernhart & Winterhoff schätzen die Kosten bei Pkw auf \$3.000 - \$6.000 zusätzlich (Bernart & Winterhoff, 2016). Litman (2019) gibt noch zu bedenken, dass auch regelmäßig anfallende Kosten für Services wie Navigation oder Sicherheit anfallen können (\$200-600 / Jahr).

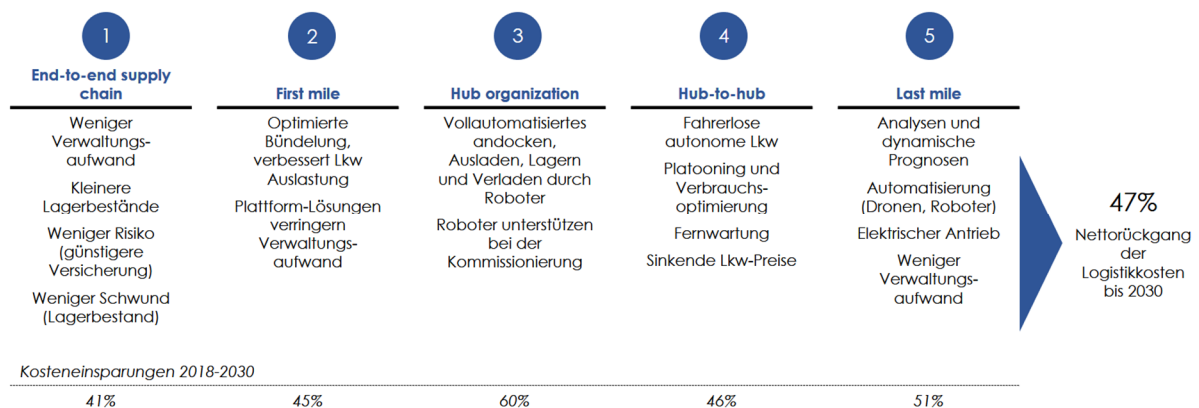


Abbildung 3: Kostenreduzierungen in der Logistik entlang der Supply-Chain (PwC, 2018)

Gleichzeitig können aber die Kosten für den Betrieb der Fahrzeuge, sowohl im Güterverkehr als auch Personenverkehr sinken, da der Fahrer nicht mehr benötigt wird. So schätzt das ITF, dass im Jahr 2030 schon 54% - 69% der Lkw-Fahrer durch einen autonomen Lkw ersetzt werden könnten (ITF, 2017). Eine PwC Studie geht davon aus, dass die Kosten in der Logistik bis 2030 um 47% sinken könnten, ein Großteil der Einsparungen macht auch hier das Personal aus. Andere Gründe sind u. a. elektrischer Antrieb, weniger Verwaltungsaufwand, sinkende Anschaffungskosten und automatische Zuweisung von freien Kapazitäten.

Des Weiteren können Kosten gespart werden, da die Fahrzeuge effizienter fahren und so Kraftstoff sparen. So können die Fahrzeuge durch ihre Kommunikation mit anderen Fahrzeugen dichter auffahren, was zu weniger Luftwiderstand und so weniger Verbrauch führt (ITF, 2017). Aber auch die intelligente Steuerung des Verkehrs in Ballungsräumen kann Kosten senken (IHK, 2018).

Im weiteren Sinne können Kosten auch dadurch gespart werden, dass Arbeitnehmer ihre Zeit auf der Fahrt anderweitig nutzen und z. B. auf der Fahrt arbeiten können (Litman, 2019). Litman (2019) führt

PAVE

aber auch an, dass bei autonomen Fahrzeugen, die Fahrdienste anbieten, die Reinigungskosten nicht zu unterschätzen sind. Er schätzt, dass alle 5-10 Fahrten eine Reinigung und Kontrolle durchgeführt werden muss, die jeweils \$5-10 kostet und so mit \$0,50-1 pro Fahrt zu Buche schlägt. Nicht einberechnet sind die Kosten für die extra Strecken zu einer Reinigungsstation. Weitere Kosten können entstehen, wenn zusätzliche Ausstattung für die Überwachung des Innenraums notwendig wird, wie Kameras und Auswertung (Litman, 2019).

Als Preis für den Nutzer erwartet Chen, dass AV-Taxis zu einem Preis zwischen \$0,42 und \$0,49 pro Meile angeboten werden können und so konkurrenzfähig zu heutigen CarSharing Angeboten sind (Chen, 2015). Fahren mindestens zwei Personen in einem AV gemeinsam so kann laut Mosquet et al. der Preis bis 2035 sogar konkurrenzfähig zum ÖPNV sein (Mosquet, et al., 2015). Chen (2015) schätzt auch, dass ein direkteres Verständnis der Reisekosten entstehen wird, da die Preisstrukturen einfacher werden (z.B. Preis / km) und besser vergleichbar. Allgemein reagieren Menschen sensibler auf Preise von Fahrdienstleistungen, als das bei den Investitionskosten für einen Pkw der Fall ist (Axhausen, et al., 2019).

Weiteres großes Kosteneinsparpotential besteht auch auf Seiten des Staates, wozu das Fraunhofer-Institut (IAO) eigene Berechnungen in Bezug auf hochautomatisierte Fahrzeuge (HAF) auf Autobahnen anstellte. Hinsichtlich der Treibhausgas- und Luftschadstoffkosten schätzt das Fraunhofer, dass bei vollständiger Marktdurchdringung 56-111 Mio. € eingespart werden könnten. Bei den zugrunde gelegten 10-20% Treibstoffeinsparungen könnte der Verbraucher sogar bis zu 724 Mio. € einsparen. Des Weiteren wurden die Unfallkosten berechnet, wozu aus verschiedenen Quellen ermittelt wurde, dass durch Autobahnunfälle jährlich Kosten von 2.461.572.000€ entstehen. Auf Basis von Lemmer (2015), der davon ausgeht, dass HAF 86% der Unfälle vermeiden können, ergibt sich ein volkswirtschaftlicher Nutzen von 2,12 Mrd. €. Diese Zahl verringert sich entsprechend, wenn AVs einen geringeren Marktanteil als 100% haben. Schließlich wurde dieser Nutzen auch für die Staukosten berechnet. Dabei kam heraus, dass der Stauvermeidungsnutzen bei 100% HAF zwischen 2,98 Mrd. € und 11,9 Mrd. € p.a. im Jahr 2020 liegt. Insgesamt liegt somit das volkswirtschaftliche Nutzenpotential bei bis zu 14,1 Mrd. € (Fraunhofer IAO, 2015). Fragnant & Kockelman errechneten für die USA, dass AVs der Wirtschaft, bei 90% Marktdurchdringung, \$434 Milliarden einsparen könnten (Fragnant & Kockelman, 2015).

PAVE

Im Folgenden wurde eine Tabelle der IHK-Studie (2018) übernommen, die die Ergebnisse einiger Studien zu den Kosten der AVs vergleicht.

Verkehrs-art	Wirkungs-komponente	Quantitative Abschätzung	Quelle
Güter- verkehr (Straße)	Fahrzeugkosten	<ul style="list-style-type: none"> Zusätzliche Software- und Hardwarekosten von 1.800 [Stufe 1] bis 23.400 US \$ je Lkw [Stufe 5] Bis 5% der Fahrzeugkosten [Stufe 5] 	(Berger, 2016); (ITF, 2017)
	Betriebskosten	<ul style="list-style-type: none"> Ersparnis [Stufe 5] von bis zu... 28% bzw. 0,23 € je Fz.-km 30% 35% bzw. bis zu 50% bei leichten Nfz. 0,90 € je Fz.-km 	(PwC, 2015) (ITF, 2017), (McKinsey, 2016), (Berger, 2016)
	Kraftstoffkosten	<ul style="list-style-type: none"> 4%-10% durch „eco-driving“ [Stufe 2] >10% bei vollautomatisierten Platoons [Stufe 3] 	(ITF, 2017), (PwC, 2015) (Berger, 2016)
	Fahrerbedarf	<ul style="list-style-type: none"> Zwischen 59% - 68% im Jahr 2030 in Europa durch autonomes Fahren [Stufe 5] 	(ITF, 2017)
Personen- verkehr (Straße)	Fahrzeugkosten	<ul style="list-style-type: none"> Steigerungen hängen von den Automatisierungsstufen ab, bisher wenige Quantifizierungen Erste Schätzungen für hochautomatisiertes Fahren [Stufe 4] und autonomes Fahren [Stufe 5] gehen von 3.000 bis 6.000 US \$ je Fahrzeug aus 	(imfo, 2016)
	Kraftstoffkosten	<ul style="list-style-type: none"> 10%-20% durch HAF-Funktionen (2020) auf Autobahnen in Deutschland [Stufe 3] 31%-45% im städtischen Bereich (einschließlich optimierter Knotenpunktsteuerung) [ab Stufe 2] 	(Fraunhofer IAO, 2015) (Milakis, et al., 2017)
	Zeitkosten	<ul style="list-style-type: none"> 28%-47% durch HAF-Funktionen (2020) auf Autobahnen in Deutschland [Stufe 3] 31h Zeitersparnis auf Autobahnen in Deutschland (2025) [Stufe 1,2] 2%-11% im Strategic Road Network (Autobahnen einschließlich Auffahrten, Abfahrten) [Stufen1-5] 21%-34% im Urban Road Network [Stufen1-5] 	(Fraunhofer IAO, 2015) (Bosch, 2016) (ATKINS, 2016)
	Zeitbewertung	<ul style="list-style-type: none"> Wirkung unklar 	
	Versicherung, Wartung und Reparatur	<ul style="list-style-type: none"> Leicht geringere Kosten erwartet 	(Dornier, 2017)
	Pkw-Bestand	<ul style="list-style-type: none"> Reduzierung um bis zu 90% in Szenarienrechnungen für Lissabon [Stufe 5] Ersatz von 10-14 konventionellen Fz. durch ein autonomes Fahrzeug; bei autonomen elektrischen Fahrzeugen unter Berücksichtigung der Ladezeiten sinkt die Quote auf 3,7 bis 6,8 [Stufe 5] 	(ITF, 2015) (Milakis, et al., 2017)
	Induzierter Verkehr	<ul style="list-style-type: none"> Mehrverkehr zwischen 3% und 27% u.a. durch Verlagerungen und neuen Verkehr [ab Stufe3] 	(Milakis, et al., 2017)

Tabelle 2: Übersicht zu den Kosten von AVs (Eigene Darstellung nach IHK, 2018)

Auswirkungen auf die Mobilität

Die Art des Reisens wird sich durch die AVs deutlich verändern. Durch die selbstfahrenden Fahrzeuge eröffnen sich den Nutzern völlig neue Wege, ihre Zeit während der Fahrt zu nutzen. So können sie währenddessen arbeiten, schlafen, Spiele spielen, das Infotainment nutzen und noch vieles mehr (Litman, 2019). So verbrachten die Menschen in den USA 2014 29,6 Milliarden Stunden in ihren Autos zum Pendeln. In dieser Zeit hätten die antiken Ägypter 26 Pyramiden von Gizeh bauen können. Eine enorme Zeit-, Energie- und Potentialverschwendung (Kabbaj, 2016).

Entsprechend wandelt sich auch die Gestaltung des Innenraums, da in Fahrzeugen des Level 5 kein Lenkrad und keine Pedale mehr nötig sind (Litman, 2019). Wie zuvor auch schon bei den Kosten erwähnt, kann sich auch die äußere Gestaltung des Fahrzeugs komplett wandeln, da z. B. beim Lkw keine Fahrerkabine mehr benötigt wird (ITF, 2017). Litman meint aber auch, dass bei den geteilten AVs es dazu kommen wird, dass der Innenraum wegen Vandalismus und Verschmutzung überwacht werden muss. Zum anderen werden die Innenräume mit günstigen Materialien ausgestaltet sein, die langlebig und einfach zu reinigen sind (Litman, 2019).

Allgemein werden die AVs im Vergleich zu den etablierten Verkehrsmitteln aber als sehr attraktiv und als disruptive Kraft im Verkehrsmarkt gesehen (Maunsell, et al., 2014). Dies wird erreicht durch die zuvor schon erwähnten wettbewerbsfähigen Preise (Chen, 2015) und den neu entstehenden Komfort bzw. die neuen Möglichkeiten während der Fahrt (Litman, 2019). Enoch geht dabei davon aus, dass sich die automatisierten Fahrzeuge in verschiedenen Formen auf den Trend hin entwickeln werden, dass AVs universelle Reisemittel sind, die auf Abruf verfügbar sind (Enoch, 2015). So könnten Familien sich ein Fahrzeug teilen, dass die Familienmitglieder zu ihren Zielen fährt und dann Zuhause oder auf einem Parkplatz wartet bis es wieder gebraucht wird (Schoettle & Sivak, 2015).

Dies wirkt sich auch auf die Anzahl der benötigten Fahrzeuge aus. So kommen Schoettle und Sivak (2015) zum Ergebnis, dass AVs bei Familien in den USA die Zahl der Autos um 43% von durchschnittlich 2,1 auf 1,2 pro Familie reduzieren könnten. Eine der bekanntesten Studien dazu führte das ITF 2015 am Beispiel der Stadt Lissabon durch. Sie bekamen heraus, dass, wenn geteilte AVs eingesetzt werden (mehrere Nutzer in einem Fahrzeug) und dies mit einem Hochleistungs-ÖPNV kombiniert wird, 90% der Fahrzeuge eingespart werden könnten. Selbst wenn AVs eingesetzt werden, die nur einen Passagier auf einmal transportieren und es keinen hochleistungs-ÖPNV gibt, so können dennoch fast 80% der Fahrzeuge eingespart werden. In letzterem Fall würden aber die gefahrenen Autokilometer um 89% steigen. Im ersten Fall wären es 6% (ITF, 2015). Für Berlin schätzen Bischoff und Maciejewski, dass ein AV-Taxi 10 private Pkw ersetzen könnte (Bischoff & Maciejewski, 2016). Für Austin, Texas wird geschätzt, dass neun Fahrzeuge ersetzt werden können (Fagnant, et al., 2015). Chen (2015) ergänzte diese Simulation u. a. mit einer Ladeinfrastruktur, wodurch sich das Ergebnis auf 6,8 verringert.

Die exakten zahlenmäßigen Veränderungen hängen also immer von den individuellen Eigenschaften des Ortes ab und werden umso genauer, je mehr Variablen mit einbezogen werden. Die meisten Studien berücksichtigen noch keine induzierte Nachfrage, durch die Vorteile der AVs (Axhausen, et al., 2019).

Allgemein kann sich die Kapazität verringern oder verbessern, also sich der Verkehrsfluss verschlechtern oder verbessern. Dies wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst (Axhausen, et al., 2019).

Erhöht werden kann die Kapazität durch Platooning (Konvoifahrt von vernetzten Fahrzeugen), wodurch der Sicherheitsabstand verringert werden kann. Durch das Vernetzen der Fahrzeuge können relevante Daten ausgetauscht werden, zum einen zwischen den Fahrzeugen (für Kolonnenfahrt und Anderes) und

PAVE

mit der Infrastruktur, damit eine intelligente Steuerung des Verkehrs ermöglicht werden kann und so u. a. Staus vermieden werden können (Lemmer, 2016) & (IHK, 2018). Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass durch AVs weniger Unfälle passieren werden, was den Verkehrsfluss verbessert. Fragnant und Kockelman (2015 gelesen in Axhausen et al. 2019) schätzen, dass eine Penetrationsrate von 10% AV zur Halbierung der heutigen Unfallzahlen führen würde, und bei 90%, nur noch 10% der Unfälle auftreten. Ist die Infrastruktur darauf ausgelegt, die Vorteile von vernetzten AVs zu nutzen, kann mit steigendem Anteil von AVs im Straßenverkehr die Kapazität deutlich gesteigert werden. Dies beruht darauf, dass wie zuvor schon beschrieben, die Fahrzeuge geringere Abstände halten können und als Kolonnen fahren. Dadurch ist ein stetiger und gleichmäßiger Verkehrsfluss ohne ruckartiges Beschleunigen oder Bremsen gewährleistet (IHK, 2018). Milakis et al. (2017) rechnen, dass schon durch Fahrzeuge mit CACC (Cooperative Adaptive-Cruise-Control¹) bei einer Marktdurchdringungsrate von 40% die Kapazität auf Autobahnen über 10% gesteigert werden könnte. Bei vollständiger Marktdurchdringung kann sich die Kapazität sowohl auf Autobahnen also auch an Knotenpunkten verdoppeln (Milakis, et al., 2017). ATKINS berechneten, dass automatisierte Fahrzeuge auf Autobahnen die Stauungszeit um 17-40% verringern könnten (je nach Marktanteil) und an Knotenpunkten um 17%-30% (ATKINS, 2016).

Die Verkehrskapazität kann auch negativ beeinflusst werden durch die AVs. Es wird davon ausgegangen, dass die Nachfrage nach Mobilität steigen wird. Ein Grund dafür ist, dass für einige Nutzergruppen durch AVs Hindernisse genommen werden. So können körperlich beeinträchtigte Personen problemlos von A nach B kommen, da sie von einem gewünschten Ort abgeholt werden können und dann zum Ziel gebracht werden, ohne dass sie das Fahrzeug steuern müssen. Einige kaufen sich vielleicht sogar ein privates AV, um so mobil zu sein (insbesondere auf dem Land). Auch junge Menschen die keinen Führerschein haben oder allgemein Menschen die zuvor gehindert waren am Verkehr teilzunehmen, können dies so tun. Deshalb steigt das Verkehrsaufkommen (Litman, 2019).

Ein weiterer Grund für eine Minderung der Kapazität ist die modale Verkehrsverlagerung hin zum AV (z. B. weg vom ÖPNV), was das Verkehrsaufkommen steigert (IHK, 2018). Axhausen et al. (2019) rechnen vor, dass ein Bus mit 50 Sitzplätzen durch 13 AVs mit je vier Sitzplätzen zu ersetzen wäre, so fahren 12 Fahrzeuge mehr auf der Strecke. Ausgehend davon, dass drei Fahrzeuge der Fläche eines Busses entsprechen, ergibt das eine Steigerung von 400% des Flächenverbrauchs. In anderen Szenarien wird sogar davon ausgegangen, dass der öffentliche Verkehr wie wir ihn kennen komplett wegfallen wird (Gruel & Standford, 2016).

Auch geht man davon aus, dass durch den steigenden Komfort ebenfalls die Zahl der Fahrten steigen wird (Litman, 2019). So konkurriert laut Christie et al. das AV auch eher mit dem Laufen und Fahrradfahren als mit dem Auto. Einfache Strecken, die sonst zu Fuß zurückgelegt würden, da es beim Supermarkt umständlich ist zu parken, werden dann mit einem AV zurückgelegt, da das auf Abruf bereitsteht (Christie, et al., 2016) & (Axhausen, et al., 2019). So schätzt Burmeister et al., dass AVs zu einem konkurrenzfähigen Preis die Zahl der Reisen um bis zu 150% steigern könnten (Burmeister, et al., 2014).

Kommt es zu mehr Fahrten, die auf Abruf stattfinden, so kann es dazu führen, dass auch mehr Leerfahrten entstehen, da die AVs zu ihren Kunden fahren (Axhausen, et al., 2019). Zum anderen können Leerfahrten entstehen, da die Fahrzeuge zu einer Wartung oder Reinigung fahren müssen (Litman, 2019). Beim sogenannten Valet Parking fahren die AVs selbstständig zu einem freien

¹ CACC – kooperativer Abstands- und Geschwindigkeitsreglassistent, tauscht Informationen mit anderen Fahrzeugen auf der Strecke aus (V2V)

PAVE

Parkplatz, parken dort und kehren auf Abruf zu ihrem Nutzer zurück. Auch dies generiert zusätzliche Leerfahrten (Lemmer, 2016).

Die AVs können sich also sowohl positiv als auch negativ auf die Kapazität und somit den Verkehrsfluss auswirken. So gibt es auch Faktoren, die sich sowohl positiv, als auch negativ auswirken können. So kann es passieren, dass viele Menschen AVs für die letzte Meile nutzen, z.B. vom ÖPNV zum Arbeitsplatz. Dadurch fahren zwar zusätzliche AVs herum, um die letzte Meile zurückzulegen, dafür nutzen die Kunden aber für den Hauptteil der Strecke den ÖPNV. Zum anderen ermöglicht es Menschen in Gebieten mit schlechter ÖPNV-Anbindung, diesen trotzdem zu nutzen, ohne einen privaten Pkw zu benötigen (Axhausen, et al., 2019) & (Litman, 2019).

Die genaue Auswirkung hängt schlussendlich von den Gegebenheiten vor Ort ab und wie die AVs von der dortigen Bevölkerung angenommen und genutzt werden.

Auch wenn noch nicht feststeht, ob sich die Kapazität positiv oder negativ verändern wird, so sind sich viele Studien darin einig, dass sich die Zahl der gefahrenen Kilometer erhöhen wird. Litman (2019) schätzt diesen Anstieg auf 10-30%. Das ITF unterscheidet dabei je nach Anwendungsfall. Bei einem System mit geteilten AV-Taxis und einem Hochleistungs-ÖPNV gibt es einen Zuwachs von 6%, ohne den Hochleistungs-ÖPNV und mit nicht geteilten AV-Taxis sogar um 89% (ITF, 2015). Fagnant & Kockelmann (2015) schätzen, dass bei einem Marktanteil von 90% AVs die gefahrenen Kilometer um 37% ansteigen könnten.

Auswirkungen auf die Stadtplanung

Raumwirkung

Deutschland steht aktuell vor dem Problem, dass die Bevölkerung in den ländlichen Gebieten abnimmt und in den Städten zunimmt. Dieser Zuwachs in den urbanen Räumen führt zu immer stärkerer Überlastung der Infrastruktur. So verbrachten die Menschen in den urbanen Räumen der USA 2017 8,8 Milliarden Stunden im Stau (Schrank, et al., 2019). Lange Zeit war die übliche Reaktion auf diese Überlastung, die bisherigen Straßen auszubauen oder neue Straßen zu bauen (Kabbaj, 2016). Es wird eher in die Infrastruktur in den städtischen Regionen investiert, als in die der ländlichen, was wiederum zu einer Abwanderung vom Land in die Stadt führt. AVs werden als große Chance gesehen, diese Abwanderung aufzuhalten bzw. den ländlichen Raum wieder deutlich attraktiver zu machen. Dies kann durch neue wirtschaftlich darstellbare Mobilitätsangebote im öffentlichen und individuellen Verkehr erreicht werden. Mobilität kann erleichtert und der ländliche Raum besser erschlossen werden. Dies bezieht sich sowohl auf den Personen- als auch den Güterverkehr (IHK, 2018).

Bei Betrachtung der Wirkung kann laut Milakis et al. (2017) zwischen der regionalen (makro) und lokalen (mikro) Reichweite unterschieden werden. Auf regionaler Ebene wird der zuvor erwähnte Effekt beschrieben, dass der ländliche Raum wieder attraktiver wird und sich so dort wieder mehr Menschen ansiedeln. Dies wird erreicht durch geringeren Reiseaufwand, geringere Reisezeit und geringere Kosten. Dies erhöht allgemein die Zugänglichkeit zu Mobilität. Menschen die zuvor kein Fahrzeug nutzten, da sie entweder keins besaßen oder keines fahren konnten, können durch AVs ohne Hilfe zu ihren Aktivitäten und Terminen kommen. Die verbesserte regionale Erreichbarkeit kann dazu führen, dass mehr Leute zum Wohnen, Arbeiten und Einkaufen aus der Stadt weggehen. Das würde dazu führen, dass entsprechende Einrichtungen bzw. Infrastruktur vor Ort geschaffen werden. Eine Studie in Seattle fand heraus, dass die Nachfrage nach Mobilität in ländlichen Räumen um 30% steigen würde durch AVs, aber Fahrten auch 35% weniger Zeit benötigten.

PAVE

Auf lokaler Ebene haben AVs das Potential, das Straßenbild, die Architektur und die Landnutzung zu verändern. Den größten Effekt wird dabei die Veränderung des Parkens haben. So können AVs selbstständig parken oder geteilte AVs fahren von Nutzer zu Nutzer und müssen deshalb nicht direkt vor dem Büro oder der Wohnung abgestellt werden. Dadurch können Abschnitte auf oder an Straßen, die bisher zum Parken genutzt werden, komplett umgestaltet werden, in Busspuren, als weitere Fahrspur, Fahrradweg, Fußweg oder auch Grünfläche. Auch große Parkflächen an Gebäuden könnten entsprechend umgenutzt werden und so z. B. neuen Wohnraum ermöglichen. Neu gebaute Gebäude müssen nicht mehr darauf ausgelegt werden den Bewohnern bzw. Nutzern einen Stellplatz zu ermöglichen, sei es Parkfläche vor dem Gebäude oder im Parkhaus, sondern die Fläche kann für mehr Wohnraum oder ein luftigeres Stadtbild genutzt werden. Das Parken kann so eher in die Randgebiete verlagert werden, in denen Platz ist, und belastet somit nicht zusätzlich die Innenstadt (Milakis, et al., 2017). Zhang et al. errechneten in einer Simulation, dass durch geteilte AVs bis zu 90% der Parkflächen nicht mehr benötigt würden, und das schon bei einem geringen Gesamtanteil (Zhang, et al., 2015).

Dies liegt daran, dass Pkw heutzutage gerade einmal 5% der Zeit genutzt werden, also 95% nur rumstehen (Deloitte, 2019). Die AVs können, um das Parken vor Ort zu vermeiden zu günstig gelegenen Mobility Hubs fahren oder die Stadt durchstreifen (Axhausen, et al., 2019). Auch Litman (2019) schätzt, dass 90% weniger Parkplätze benötigt werden, gleichzeitig würde aber auch die Zahl der gefahrenen Kilometer deutlich steigen. Fahren die AVs durch die Gegend um Parkkosten zu vermeiden, würde dies zu Überlastung führen (Litman, 2019). Gleichzeitig muss aber auch genügend Platz eingeplant werden, um ein sicheres und optimales Ein- und Aussteigen zu ermöglichen (ITF, 2015). Insbesondere bei Großveranstaltungen muss genügend Platz dafür eingeplant werden, wenn dort zu Stoßzeiten sehr viele Gäste ankommen (Axhausen, et al., 2019). Auch an Mobilitätsknoten, an denen das Verkehrsmittel gewechselt werden kann, müssen ausreichend Flächen eingeplant werden, auch um das geteilte Fahren attraktiv zu machen (Heinrichs, 2015). Ein weiterer Faktor, der die benötigte Parkfläche reduziert, ist die Möglichkeit der AVs deutlich enger zu parken (ca. 15%), da die Türen sich nicht mehr öffnen lassen müssen (Bertoncello & Wee, Juni 2015).



Abbildung 4: Straße der Zukunft (The Architect's Newspaper, 2018)

In Wohngegenden mit hauptsächlich Einfamilienhäusern und privaten Stellplätzen wird dagegen mit einer deutlich geringeren Reduktion der Parkflächen gerechnet, da dort vermutlich das AV nur den

PAVE

bisher genutzten herkömmlichen Pkw ersetzt (Heinrichs, 2015). Leben aber mehr Menschen in den ländlichen Gebieten, muss dort auch die entsprechende Infrastruktur bereitgestellt und gepflegt werden, was wiederum hohe Kosten bedeutet, und das obwohl sie im Vergleich zur Stadt weniger stark genutzt wird (Larco, 2018).

Infrastruktur

Fahrzeuge und ihre Nutzer verlassen sich auf die öffentliche Infrastruktur und verursachen dabei externe Kosten. Die Infrastruktur erfordert viel Planung und Ausgaben durch die öffentliche Hand. Steigt durch die AVs die Zahl der gefahrenen Kilometer, also die Beanspruchung der Straßen, sind auch hier höhere Unterhaltskosten nötig (Litman, 2019). Die genauen Kosten die infrastrukturseitig entstehen werden, sind aber noch schwer abzuschätzen (IHK, 2018).

Durch die im Abschnitt zuvor genannten Gründe, dass Parkplätze reduziert werden können, kann der neu gewonnene Platz u.a. für eine aktive Infrastruktur genutzt werden.

Die Infrastruktur umfasst straßenbauliche, verkehrstechnische und informationstechnische Elemente. Das Zusammenspiel dieser Elemente funktioniert nur mit Regeln, die der Staat aufstellen und überwachen muss, um die Mobilität von Personen und Gütern sicherzustellen. Auch für die Veränderungen die durch Automatisierung der Fahrzeuge stattfinden werden, und die neuen innovativen Geschäftsmodelle muss der Staat geeignete Rahmenbedingungen festlegen. Besonders wichtig sind für AVs klare Regelungen und auch deren strikte Umsetzung, da sie entsprechend der geltenden Gesetze programmiert werden. So benötigen AVs gut erkennbare Fahrbahnmarkierungen und Straßenschilder, da diese den zulässigen Fahrbereich definieren und die zulässige Art und Weise der Benutzung regeln. Da dies Voraussetzung für den Betrieb von AVs ist, bedarf es einer Verbesserung des Qualitätsmanagements für vorhandene Standards. Denn die Gesetze sind da und verlangen eine entsprechende Sichtbarkeit und gegebenenfalls Nachbesserung, doch die Realität ist oftmals eine andere. Es müssen also öfters Kontrollen stattfinden und es muss diskutiert werden, ob für AVs nicht eine neue Fahrbahnmarkierung entwickelt werden sollte. Diese sollte in der Lage sein z. B. temporär eine durchgezogene Linie überfahrbar zu machen (Baustelle oder Unfall) und sollte auch bei schlechten Witterungsbedingungen wie Schnee sichtbar sein (Lemmer, 2016).

Da oftmals davon ausgegangen wird, dass AVs elektrisch betrieben werden (Litman, 2019), ist die Energieversorgung und die dafür notwendige Infrastruktur eine wichtige Voraussetzung. Wie die Fahrzeuge in Zukunft geladen werden ist noch nicht endgültig geklärt. So gibt es beispielsweise Ideen für induktives Laden während der Fahrt, Oberleitungen für Lkw oder eben die klassischen Ladestationen (Maunsell, et al., 2014) & (Flämig, 2015). Diese Ladestationen können über die Stadt verteilt oder auch in großen Mobility Hubs zentralisiert sein (Axhausen, et al., 2019). Wichtig ist aber, dass diese Infrastruktur geschaffen wird und möglichst frei zugänglich ist.

Grundsätzlich ist auch zu klären, wie AVs in den bestehenden Verkehr integriert werden können. So gibt es Ideen, separate Fahrstreifen einzurichten, auf denen nur AVs fahren dürfen. Dies ist aber bei einem geringen Anteil von AVs nicht vertretbar und ist somit erst sinnvoll, wenn viele AVs unterwegs sind, dann könnten auch Vorteile der Kolonnenfahrt genutzt werden. Diese Idee kommt bei vielen Leuten in den USA gut an wie Silberg et al. (2013) herausfanden. In einer Befragung stieg das Interesse an AVs deutlich an, als in Aussicht gestellt wurde, es gäbe extra Spuren für AVs, wodurch die Reisezeit sich halbieren würde (Silberg, et al., 2013).

Besonders kritisch für AVs sind Knotenpunkte und der innerstädtische Verkehr, da hier besonders komplizierte Situationen entstehen können. Beispielsweise wenn eine Ampel auf Grün schaltet, aber beim Abbiegen Fußgänger und Radfahrer noch Vorrang haben. Dazu könnten AVs eine gesonderte

PAVE

Grünphase bekommen, in denen sie ungehindert abbiegen können. Möglich wäre es aber auch, den Radfahrern und Fußgängern eine solche Phase einzuräumen. Besonders wichtig ist es für die AVs, vernetzt zu sein, um so mit anderen Fahrzeugen und der Infrastruktur kommunizieren zu können.

Die AVs kommunizieren mit ihrer Umgebung. Das Fahrzeug kann mit anderen Fahrzeugen kommunizieren (V2V – Vehicle to Vehicle) oder mit der Infrastruktur (V2I – Vehicle to Infrastructure). Allgemein spricht man von V2X-Kommunikation (Vehicle to Everything). Die Kommunikation kann dabei durch unterschiedliche Techniken und Standards ermöglicht und geregelt werden, dies sind u.a. Mobilfunk, WLAN und DAB/DMB. Beim Mobilfunk wird aktuell noch hauptsächlich der 3G- & 4G-Standard genutzt, die hauptsächlich für Internetverbindung und Multimediaübertragung genutzt werden können. Der 5G-Standard ermöglicht Internet-of-Things-Anwendungen (IOT, Vernetzung von Geräten, Sensoren, Maschinen über Internet), sicherheitskritische Kommunikation und taktiles Internet (für Menschen nicht wahrnehmbare Reaktionszeit) (Fraunhofer-Gesellschaft, 2019) & (Lemmer, 2016). 5G ermöglicht eine deutlich höhere Bandbreite, eine schnellere Reaktionszeit und erlaubt, dass sich mehr Geräte mit einer Basisstation verbinden als bisher.

Grundsätzlich wird zwischen der Kommunikation zwischen Fahrzeugen (V2V) und der Verteilung von Informationen in geographischen Gebieten unterschieden. Für die V2V Kommunikation wurde ein spezieller WLAN Standard entwickelt (WLAN11p), der in einem dezidierten Frequenzband im 5,9 GHz-Bereich arbeitet und an die Anforderungen der V2V Kommunikation angepasst wurde. 5G soll auch diese Kommunikation ermöglichen, damit im Falle eines Funkloches nicht die Funktionalität des AVs eingeschränkt wird, und um Kosten zu sparen. Eine Übersicht der Vorteile des neuen 5G Standards ist in Abbildung 5 zu sehen. Schon heute gibt es einen 4G Standard, der V2X ermöglichen soll (LTE-V2X).

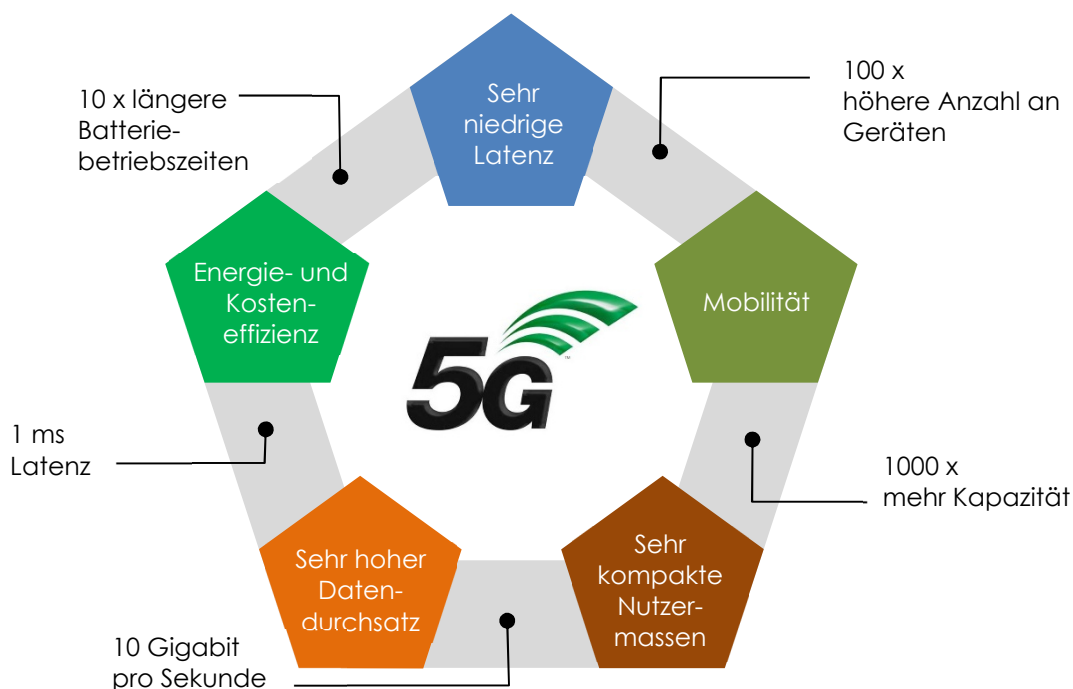


Abbildung 5: Das soll 5G leisten (Eigene Darstellung nach (Fraunhofer-Gesellschaft, 2019) 2

² Mit 5G Logo (connect, 2017)

PAVE

Vorteil an der direkten Kommunikation ist, dass die Fahrzeuge Informationen direkt und ohne die Verzögerung bei Kommunikation über eine Basisstation austauschen können und somit unabhängig von einem verfügbaren Netz sind.

Die V2V Kommunikation soll es den Fahrzeugen ermöglichen sich gegenseitig über ihren aktuellen Fahrzustand zu informieren, damit alle ein noch umfassenderes Bild der Umgebung haben, frühzeitig reagieren können und sich abstimmen können. So können z.B. Spurwechsel und Bremsmanöver angekündigt werden, vor Gefahrensituationen gewarnt werden (z.B. Unfall in einer Kurve) oder auch AVs in einem Schwarm einander folgen, wobei der vorderste Wagen die Führung übernimmt. Es kann aber auch mit schwächeren Verkehrsteilnehmern wie Fußgängern kommuniziert werden, indem z. B. Positionsdaten ausgetauscht werden, um Kollisionen zu vermeiden oder die Unfallschwere zu mindern. Interessant ist auch die Kommunikation mit den Ampeln, die den Fahrzeugen ihren aktuellen Zustand und dessen Dauer mitteilen können, auch wenn es diese noch nicht sehen oder erkennen kann. Des Weiteren ist es möglich, dass das Fahrzeug mit lokalen Diensten kommuniziert, um z. B. Zugang zu erhalten oder auch einen Parkplatz zugewiesen zu bekommen.

Bei der V2X Kommunikation sind auch Anwendungsfälle wie bei V2V denkbar, nur würde die Übertragung dabei deutlich länger dauern. In diesem Fall geht es hauptsächlich darum, dass das Fahrzeug seine Informationen mit einem Verkehrsleitsystem bzw. der Infrastruktur teilt und Informationen von diesem erhält. So kann das Auto z. B. Informationen erhalten über aktuelle Streckensperrungen, den aktuellen Verkehrsfluss, Routeninformationen und Informationen zu strecken- und zeitbezogenen Vorgaben für das automatisierte Fahren.

Das Auto kann aber auch Informationen zu interessanten Sehenswürdigkeiten oder anderen Points of Interest (POI), dem ÖPNV und den Parkmöglichkeiten erhalten. Die Infrastruktur weiß durch die Informationen der Fahrzeuge genau, wo diese sich befinden und im Optimalfall auch die nächsten Handlungen bzw. Ziele. So kann die aktuelle Verkehrssituation bestimmt werden und für einen besseren Verkehrsfluss können die Fahrzeuge auf den Strecken verteilt werden. Dies kann durch eine intelligente Ampelsteuerung oder Routenführung geschehen. Sind sie angekommen kann ihnen ein freier Parkplatz zugewiesen werden.

Der 5G Standard soll all diese Funktionen in Zukunft als ein flexibles, integriertes und hochperformantes Kommunikationssystem ermöglichen (Lemmer, 2016).

Auswirkungen auf die Umwelt

Wie schon in Abschnitt „Auswirkungen auf die Mobilität“ beschrieben, gehen einige Studien davon aus, dass durch AVs die Zahl der gefahrenen Kilometer steigen wird. Das IFT geht in einem Szenario davon aus, dass diese Zahl sogar um 89% steigen könnte. Dies hätte auch deutliche Auswirkungen auf die Umwelt, da deutlich mehr Energie verbraucht wird und zum anderen mehr Verschleiß stattfindet, sowohl am Fahrzeug, als auch an der Infrastruktur.

Da oftmals davon ausgegangen wird, dass AVs in der Zukunft elektrisch betrieben werden, kann dies einen großen Einfluss auf die Umwelt haben (Litman, 2019). So schätzen Greenblatt & Shaheen (2015), dass elektrisch betriebene geteilte AVs die Emission von Treibhausgasen um bis zu 90% senken könnten. Ebenfalls könnte der Verbrauch gesenkt werden, indem das Platooning angewendet wird. Bei diesem fahren die Fahrzeuge deutlich dichter auf und so kann der Luftwiderstand deutlich verringert werden (Litman, 2019). Durch diese Technik, effizienteren Verkehrsfluss, effizienteres Parken, Gewichtersparnissen und automatisiertes RideSharing können ca. 80% der benötigten Energie eingespart werden (Greenblatt & Shaheen, 2015). Schon bei geringer Marktdurchdringung können AVs Energie einsparen, da sie weniger bremsen und beschleunigen müssen und gleichmäßiger und

PAVE

vorausschauender fahren. Bei steigender Marktdurchdringung werden Staus vermieden, was sich ebenfalls positiv auswirkt (Milakis, et al., 2017). So schätzt das Texas A&M Transportation Institute, dass 2017 etwa 12,5 Milliarden Liter Benzin in Staus verschwendet wurden. Und das nur in den urbanen Räumen der USA (Schrank, et al., 2019). Weiteres Einsparpotential besteht darin, dass AVs vermutlich nicht schneller als Richtgeschwindigkeit fahren werden, was andernfalls den Verbrauch deutlich steigern würde (Cacilo, et al., 2015).

Gleichzeitig kann der Verbrauch aber auch wieder ansteigen, da die AVs eine gesteigerte Mobilitätsnachfrage auslösen. So nutzen Menschen die zuvor kein Fahrzeug nutzen konnten dann ein AV oder ÖPNV-Nutzer steigen auf AVs um. Zu einem gesteigerten Verbrauch könnte auch führen, dass die Fahrzeuge von weniger Personen gleichzeitig genutzt werden. So könnten AVs zu einem mobilen Zuhause werden, indem z.B. geschlafen, gearbeitet oder ein Film geguckt werden kann (Greenblatt & Shaheen, 2015) & (Litman, 2019).

In einer Studie berechnete das Fraunhofer-Institut (IAO), dass ein hochautomatisiertes Fahrzeug (HAF) auf der Autobahn 10%-20% Kraftstoff und Emissionen einsparen kann. Dadurch könnten im Jahr 2020 bei 100% Marktdurchdringung der HAF zwischen 56 und 111 Mio. € an Treibhausgas- und Luftschadstoffkosten eingespart werden. Daneben könnten die Verbraucher zwischen 362 und 724 Mio. € pro Jahr an Kraftstoffkosten einsparen (Fraunhofer IAO, 2015).

Ein weiterer Effekt wird dadurch erwartet, dass AVs viel in Flotten eingesetzt werden und deutlich intensiver genutzt werden als bisher die privaten Pkw. Dies führt dazu, dass diese Fahrzeuge schneller ausgetauscht werden müssen, wodurch Flotten schneller durch neue Technologien erreicht werden. Diese werden wahrscheinlich immer umweltschonender und emissionsärmer, was gerade in städtischen Gebieten zu einer Emissionsentlastung führt (IHK, 2018).

Auswirkungen auf die Automobilindustrie

Wie das bisher Beschriebene zeigt, haben AVs das Potential, in den verschiedensten Bereichen vieles zu verändern. AVs werden als disruptive Kraft gesehen, die auch auf die Wirtschaft und Industrie eine erhebliche Auswirkung haben werden (Axhausen, et al., 2019). Besonders in Deutschland ist die Betrachtung der Automobilindustrie interessant, schließlich ist sie die umsatzstärkste Industriebranche im Lande (Statista, 2019).

Längst haben auch die großen Automobilhersteller angefangen AVs zu entwickeln bzw. auf diesem Gebiet zu forschen. Wie das Waymo-Beispiel vom Anfang aber zeigt sind die großen Tech-Unternehmen wie Google stark hinterher, Lösungen zu entwickeln, und scheinen dabei auch weiter zu sein. Silberg et al. fanden 2013 bei Befragungen heraus, dass die Kunden den Tech-Unternehmen es genauso zutrauen AVs zu entwickeln wie Premium-OEMs. Den Massenmarkt-OEM wurde das sogar weniger zugetraut (Silberg, et al., 2013).

Wie die Zusammenarbeit von Daimler und BMW zeigt versuchen die Automobilhersteller möglichst schnell aufzuholen. Durch die Kooperation wollen die beiden Hersteller Synergieeffekte nutzen, Wissen austauschen, Kosten sparen und vor allem schneller werden (Dailmer, 2019c). Solche Zusammenarbeit ist ebenfalls eine neue Entwicklung in der Industrie, um auf die sich immer schneller entwickelnden Trends und Anforderungen zu reagieren.

Deloitte vermutet, dass die Zahl der Neuzulassungen bis zum Jahr 2035 sinken wird. Durch die zunehmende Urbanisierung und immer bessere ÖPNV Anbindung nehme die Bedeutung des privaten Pkws und insbesondere des Zweitwagens ab. So verringere sich auch das Bild des Autos als Statussymbol. Deshalb sei es für die Automobilhersteller wichtig sich neu zu positionieren bzw. sogar

PAVE

neu zu entwickeln. Die große Chance sieht Deloitte dabei, sich als Mobilitätsdienstleister aufzustellen. Und das möglichst früh, da die Gefahr bestehe, dass der Markt schnell von wenigen Anbietern beherrscht werde.

Eine weitere Chance ist diesbezüglich für die Automobilhersteller, dass geteilte AVs im Flottenbetrieb sehr viel genutzt werden und somit stärker verschleißten, wodurch schneller neue Fahrzeuge beschafft werden müssen. Von diesem Trend ist allgemein auszugehen, da wie in Kapitel 0 beschrieben, die Zahl der gefahrenen Kilometer im Vergleich zu heute steigen wird.

Wie lukrativ der Markt der Fahrdienstleistungen sein wird, zeigt eine Schätzung von Deloitte: so wird das Umsatzvolumen auf 16,7 Mrd. € im Jahr 2035 geschätzt. Es werden wohl auch die Fahrten mit den AVs deutlich günstiger sein, als die Nutzung eines privaten Pkw. Das liegt daran, dass private Pkw im Schnitt nur 5% bewegt werden und sonst nur parken. Flottenfahrzeuge sind dagegen sehr viel mehr in Bewegung. Die Kosten, die für das Parken des privaten Pkws entstehen würden, fallen weg. Dies ist vor allem interessant, da davon auszugehen ist, dass die Kosten aufgrund des Platzmangels eher noch steigen werden. Über die Zeit wird erwartet, dass AVs aufgrund von Skaleneffekten und der hohen Nachfrage immer günstiger werden und somit noch attraktiver für den Nutzer.

Dabei ist es wichtig möglichst früh innovative und attraktive Dienste aufzubauen, da der Markt schon früh hart umkämpft werden wird und die Gefahr besteht, dass sich ein einzelner Anbieter den gesamten Markt einer Stadt sichert. Eine Herausforderung der Dienste ist es, dass eine große Flotte benötigt wird, um den Kunden möglichst kurze Wartezeiten anzubieten, gleichzeitig muss aber die Zahl der Leerfahrten minimal sein. Es kann sich also nur der etablieren, der ein breites Angebot hat und beliebt bei den Kunden ist. Für neue Konkurrenten wird es so umso schwieriger sich am Markt zu behaupten.

Deloitte sieht des Weiteren im privaten AV eher einen Nischenmarkt. Sie gehen davon aus, dass nur Oberklasse-Fahrzeuge im Premiumsegment bestehen bleiben. Dabei werde nicht wie heute Fahrfreude, Motorleistung oder Beschleunigung verkauft, sondern vielmehr ein hoher Komfort, Entspannung und Möglichkeiten die Fahrten produktiv zu nutzen. In diesem Bereich müssen sich die Hersteller voneinander differenzieren.

Deloitte rät somit den Herstellern:

- Konzentration auf Flottenbetrieb und darauf, Mobilität als einen Service anbieten (MaaS – Mobility as a Service). Dabei sowohl als Anbieter als auch als Zulieferer auftreten.
- Die Produkte weiter optimieren, um so attraktive Kilometerpreise, lange Laufzeiten, geringe Wartungskosten und möglichst hohe Margen zu erzielen.
- Eine Strategie entwickeln, wie das Unternehmen sich auf dem Markt positionieren kann, wenn das Auto kein Statussymbol ist, sondern zu einem reinen Transportmittel wird.
- Nutzer der Flotten als Kunden für weitere Dienste und als Werbeadressaten betrachten.

(Deloitte, 2019)

Fraunhofer (IAO, 2019) sieht die Mobilitätsdienstleister in der Verantwortung, bei der Entwicklung der Angebote den Kontext des städtischen Raumes mitzudenken. Die Dienstleistungen müssten sich in das agil an den aktuellen Bedarf der Nutzer angepasste System einfügen und den begrenzten Raum der Stadt möglichst effizient nutzen. Dabei sollte es möglichst allen Menschen ermöglicht werden diese Mobilität zu nutzen. In der Verantwortung stehen dabei auch die Kommunen, die in der Planung möglichst mit den Dienstleistern zusammenarbeiten und die entsprechende Infrastruktur stellen müssen (Fraunhofer IAO, 2019).

PAVE

Fraunhofer entwickelte zudem unterschiedliche Zukunftsbilder, in denen die Automobilhersteller verschiedene Rollen einnehmen bzw. verschiedene Absätze generieren. In einem ersten Szenario verändert sich die Zahl der privaten Fahrzeuge kaum und als Verkaufsargument wird das autonome Fahren, mit seinen Vorteilen gegenüber dem manuellen Fahren genutzt. Das Automobil wird wieder als privater Aufenthalts- und Rückzugsort genutzt und gesehen, der einen großen Komfort bietet (Beispiel siehe Abbildung 6). Deshalb kann der Innenraum individuell an den Kunden angepasst werden (Hochwertigkeit und Dienstleistungen). Dies bietet über den Fahrzeugkauf hinaus Möglichkeiten zum Absatz.

Im zweiten Szenario zeichnet sich eine deutlich schlechtere Situation für die Automobilindustrie ab. In diesem Fall werden die schon heute bekannten Car-Sharing Angebote lediglich weiterentwickelt und dienen als Hauptverkehrsmittel. Da aber die Fahrzeuge autonom fahren und so selbstständig zum Kunden gelangen, sind nur geringe Fahrzeugzahlen notwendig. Dies lässt den Absatz der Hersteller im Vergleich zu heute einbrechen. Auch hier können aber durch neue Interieur-Konzepte und damit verbundene digitale Nutzerschnittstellen Umsätze generiert werden.



Abbildung 6: Innenraum des Mercedes-Benz F 015 Konzeptfahrzeugs (AV) (Daimler, 2015)

Im dritten Szenario verlagert sich das Geschäftsmodell der Automobilhersteller. Es geht weg von der Anzahl der verkauften Fahrzeuge, hin zum Betrieb von ganzheitlichen Mobilitätsangeboten, die Weiterentwicklungspotentiale für Hersteller und Städte bieten. Der Kontakt zum Kunden ist nicht mehr einmalig beim Kauf des Fahrzeugs, sondern nun ständig durch die Begleitung in Form von digitalen Mobilitätsassistenten. In diesem Fall entstehen branchenübergreifende Wertschöpfungspotentiale und eine hoch vernetzte Austauschfläche, da die verschiedensten Mobilitätsformen im städtischen Raum verknüpft werden. (Fraunhofer IAO, 2019)

PAVE

Axhausen et al. (2019) sprechen den Automobilherstellern verschiedene mögliche Rollen zu, die sie in der Zukunft einnehmen könnten. In der ersten möglichen Rolle, werden die Automobilhersteller weiterhin in ihrer klassischen Herstellerrolle gesehen. Dem Kunden werden Autos als Ware zur Verfügung gestellt und diese wird pro Einheit bezahlt. Dabei wird es sich vermutlich weg vom Privatfahrzeug, hin zum geteilten Fahrzeug entwickeln. Die Fahrzeuge könnten dann in Flotten verkauft werden und dann im Car-Sharing, als Mitfahrgelegenheit oder als Zustellfahrzeug genutzt werden, je nach Geschäftsmodell des Betreibers.

Die zweite Rolle bezieht sich auf die After-Sales-Services, die eine zunehmende Bedeutung für die Industrie haben könnten. So fanden Axhausen et al. in Bertonecello & Wee (2015), dass 60% der Kunden von ‚smarten‘ Autos bereit wären, die vom Hersteller empfohlenen Wartungen durchführen zu lassen. Diese Wartungen könnten die OEMs durchführen. Dies könnte ebenfalls wichtig für sie werden, da sie möglicherweise vom Gesetzgeber einen Großteil der Verantwortung und des Risikos in Bezug auf die Unfälle von AVs übertragen bekommen (Bertonecello & Wee, Juni 2015). Durch die zunehmende Komplexität der Fahrzeuge und insbesondere der Technik könnten die Hersteller als Einzige wissen, wie ein bestimmter Fehler zu beheben ist. Die Konzentration der Hersteller könnte sich insgesamt stärker in Richtung der Software verschieben, da zu erwarten ist, dass regelmäßige Aktualisierungen notwendig sein werden, um z. B. eine optimale V2V und V2X Kommunikation zu gewährleisten. So könnte sich der Kauf ähnlich zu dem eines Smartphones entwickeln, bei dem durch ein neues Gerät vor allem auch die Versorgung mit Updates in den nächsten Jahren gekauft wird. So könnten sich die Automobilhersteller zu Softwareunternehmen entwickeln, die möglicherweise sogar die Produktion der Hardware an Externe auslagern.

Eine weitere mögliche Entwicklung könnte sein, dass die Hersteller zu Dienstleistern werden, die ein servicebasiertes Modell anbieten. Sie könnten dann nicht mehr wie zuvor einzelne Autos, sondern stattdessen Betriebsstunden verkaufen. Der Hersteller passt die Fahrlogik des AVs entsprechend der Bedürfnisse des Nutzers z. B. einem Flottenbetreiber an, der damit AV-Taxis im Innenstadtbereich anbieten möchte. Oder ein Spediteur bucht ein AV für Lieferungen, wodurch das AV entsprechende Software für die Steuerung des Lieferprozesses benötigt.

Es ist aber auch denkbar, dass der Hersteller sowohl als Service- als auch als Flottenbetreiber auftritt (Axhausen, et al., 2019). Dies deckt sich auch mit der Empfehlung von Deloitte (2019), die Fahrzeughersteller sollten sich als Mobilitätsanbieter verstehen und sowohl Zulieferer als auch Anbieter sein.

Mit der Zeit muss sich noch zeigen, welche Anforderungen an die Lebensdauer der Fahrzeuge gestellt werden. Neue Anforderungen können sich durch die intensive Nutzung im Flottenbetrieb ergeben, was entweder zu einem schnelleren Austausch oder hohen Anforderungen führen kann. Zusätzlich müssen die AVs eventuell robust sein, da die Herstellung der Fahrzeuge sehr teuer ist und deshalb durch Wartung und Softwareupdates die Lebensdauer verlängert werden muss. Dies kann insbesondere durch die Abhängigkeit von teureren Komponenten wie dem LIDAR oder Radar entstehen. Entwickeln diese sich aber schnell weiter oder gibt es einen starken Konkurrenzdruck auf dem Markt, könnte sich der Lebenszyklus auch verkürzen. Neue Technologien zur Produktion wie der 3D-Druck könnten diesen Prozess weiter vorantreiben, da die Produktion deutlich günstiger wird.

Ein weiterer Punkt, den Axhausen et al. ansprechen, ist wo die Wartung durchgeführt wird. Diese könnte wie heute in eigenen Werkstätten durchgeführt werden, an die sich die Kunden wenden, oder durch das produzierende Unternehmen oder einen großen Servicebetrieb durchgeführt werden. Da die Technik vermutlich hoch komplex sein wird, ist es wahrscheinlich, dass sie Wartung durch die Hersteller durchgeführt wird. Die AVs könnten dann, wenn ein Problem auftritt oder eine geplante Wartung

PAVE

ansteht, selbstständig in eine Werkstatt fahren. Durch die Vernetzung der Systeme kann sich das AV dann direkt einen freien Termin suchen und buchen. Kleine Werkstätten könnten dadurch verschwinden. Ausfälle, die durch einen Defekt oder eine Wartung entstehen, sind für den Kunden irrelevant, da bei On-Demand-Services ein anderes Fahrzeug zur Verfügung steht.

Schließlich stellt sich noch die Frage, wem das Fahrzeug gehört. Wie zuvor schon erwähnt, kann das Fahrzeug einer privaten Person gehören, einem Flottenbetreiber oder auch zum ÖPNV. In einer Familie könnte ein Fahrzeug von den Mitgliedern gemeinsam genutzt werden, welches diese dann zu ihren Zielen bringt und dann an einem Ort wartet, bis es wieder gebraucht wird. So würde die Nutzung des einen Fahrzeuges um 75% steigen (Schoettle & Sivak, 2015). Dabei wäre es auch möglich, dass das Fahrzeug, wenn es nicht von der Familie gebraucht wird, Geld verdient, indem es für andere Personen zur Verfügung steht, das Fahrzeug könnte dazu von einem Flottenbetreiber verwaltet werden. Das Fahrzeug muss aber, um die Familie zu mobilisieren, nicht unbedingt in deren Besitz sein. Das Fahrzeug könnte auch Eigentum eines Flottenbetreibers sein und die Familie bucht entsprechend ihre benötigten Fahrten, wofür dann ein Fahrzeug zur Verfügung gestellt wird.

Eine weitere Möglichkeit des Besitzes sehen Axhausen et al. (2019) darin, dass die Öffentliche Hand automatisierte Mobilität betreibt oder zumindest in den Betrieb mit einbezogen ist. Zu Beginn rechnen sie damit, dass es private Betreiber geben wird (ähnlich dem Car-Sharing). Lamotte et al. (2016, gelesen in Axhausen et al. 2019) meinen, es könnte von Vorteil sein, die AVs durch die öffentliche Hand zu betreiben. So könne die Kommunikation der Fahrzeuge und Infrastruktur vereinheitlicht werden. Zum anderen könnte aber auch die Regelung der Zuweisung von Fahrzeugen, die Streckenführung, die Erhebung von Steuern und generell ein Verkehrsumfeld von den Behörden geschaffen werden, das einem sozialen Optimum nahekommt (Bonneton et al. 2016, gelesen in Axhausen et al. 2019).

3.4 Recht, Haftung & Versicherung

Wie bereits in Kapitel 0 beschrieben wurde, ist die Haftungsfrage noch nicht abschließend geklärt und noch kein endgültiger rechtlicher Rahmen gesetzt. Deutschland hat 2017 das automatisierte Fahren in einen einheitlichen Rahmen geregelt und so die Voraussetzungen für hoch- und vollautomatisiertes Fahren geschaffen. Dazu wurde auch eine Ethikkommission eingesetzt, die 20 ethische Regeln aufstellte, in denen u.a. festgehalten wurde, dass der Mensch immer Vorrang hat. In Deutschland oder auch international gibt es aber noch keine einheitliche Regelung zum autonomen Fahren, bei dem der Mensch nur noch Passagier ist. Dort besteht noch Handlungsbedarf, z.B. am Wiener Abkommen für den Straßenverkehr (Daimler, 2019a) & (IHK, 2018).

Es sind also noch einige Fragen zu klären. Diese Ungewissheit kann laut Anderson et al. (2016) dazu führen, dass Automobilhersteller Produkte später auf den Markt bringen oder erst später an ihnen forschen. Wichtig für die Hersteller ist es, den Kunden ausreichend zu warnen und zu schulen, wie er mit dem Produkt und seinen Features umzugehen hat, so dass der Hersteller nicht für Schäden und Verletzungen haften muss, die auf mangelndem Wissen zum Umgang mit dem System beruhen. Auch deswegen könnten die Hersteller die Fähigkeiten der Systeme in der Werbung unterbewerten. In den Stufen der Automatisierung, bei denen der Fahrer noch auf Aufforderung eingreifen muss, überwacht das Fahrzeug den Fahrer und zwingt ihn, die Steuerung zu übernehmen, sollte er inaktiv werden. Mit höherer Automatisierung wird es immer schwerer nachzuweisen, dass das Fahrzeug in allen Situationen zuverlässig fahren kann. Dies kann aber zu Nachteilen führen, da die Öffentlichkeit nicht von den Vorteilen der Technologie, wie geringere Kosten, Schonung der Umwelt oder auch mehr Platz profitieren kann. Eine Lösung dieses Problems könnte sein, dass die Hersteller gezwungen werden, die vielversprechendsten Technologien der Automatisierung einzubauen, und dafür von der Haftung in Bezug auf diese befreit werden (Anderson, et al., 2016). Smith (2013, gelesen in Anderson et al. 2016)

PAVE

schlägt vor, dass die Hersteller automatisiertes Fahren eher als ein fortlaufendes Serviceprodukt, denn als ein gekauftes und besessenes Produkt anbieten. So könnten die Hersteller die Haftung und Art und Weise der Nutzung ihrer Produkte besser durch Verträge steuern, und könnten auch als Versicherer der Fahrzeuge auftreten und somit zusätzlichen Umsatz generieren.

Anderson et al. (2016) meinen, dass allgemein ein Dilemma dadurch entsteht, dass die Technologie nicht auf den Markt gebracht wird, da die Rechtslage nicht eindeutig ist, diese aber erst angepasst werden kann, wenn die Technologie eingeführt ist. Sie nehmen an, dass mit Einführung der Technologie auch die Rechtslage geklärt werden wird.

In Bezug auf die Versicherung wird von vielen davon ausgegangen, dass diese deutlich günstiger wird für AVs, da sie weniger Unfälle verursachen sollen (Schoeffler & Sivak, 2014) & (Cunningham, et al., 2018). Davon gehen auch Cusano & Costonis (2017) aus, da Versicherungen sich in ihrer Höhe am Risiko orientieren. Des Weiteren gehen sie davon aus, dass ein Großteil der AVs nicht privat besessen werden wird, sondern stattdessen von Flotten betrieben und als Service angeboten werden. Durch beides würden die Einnahmen der Versicherungen sinken, um etwa \$25 Milliarden im Jahr 2035. So müssen sich die Versicherungen überlegen, wie sie das ausgleichen können, auch wenn es noch lange Zeit sowohl AVs als auch herkömmliche Fahrzeuge geben wird. So dauert es beispielweise laut Reimer (2018) etwa 18 Jahre bis 85% der Fahrzeuge in den USA ausgetauscht werden.

Cusano & Costonis (2017) sehen drei Felder, die den Versicherungen zwischen 2020 und 2050 großes Potential bieten:

- Zum einen die „**Cyber security**“ (Internetsicherheit), die durch die Zunahme von Software und Konnektivität im und am Fahrzeug immer mehr an Bedeutung gewinnen wird. So könnten Versicherungen in Zukunft Internetdiebstahl, -betrug, Hackerangriffe und Missbrauch von Informationen versichern. So könnten \$12 Milliarden generiert werden.
- Zum anderen „**Product Liability**“ (Produkthaftung), bei der sich die Automobilhersteller gegen Ausfälle durch Softwarefehler, Speicherfehler und Algorithmenfehler und die dadurch entstehende Haftung versichern. Dadurch könnten weitere \$2,5 Milliarden generiert werden.
- Schließlich die „**Infrastructure insurance**“ (Infrastrukturversicherung). Dabei werden Cloud-Server-Systeme, externe Sensoren und Signale, Kommunikationsgeräte und andere Sicherheitsvorkehrungen versichert, die Fehlfunktionen haben können. Versichert wird hier der Wert der Hard- und Software, was Umsätze von \$500 Millionen generieren könnte. Würde die öffentliche Infrastruktur versichert, könnte ein deutlich höherer Umsatz generiert werden, aber die öffentliche Hand „versichert“ diese Risiken oftmals selbst.

Versicherer sollten sich deshalb neu orientieren, um auch weiter am Markt bestehen zu können (Cusano & Costonis, 2017).

3.5 Logistik

Das IFT (2015) schätzt, dass 2030 etwa 6,4 Millionen Lkw-Fahrer in Europa und den USA benötigt werden, aber nur etwa 5,6 Millionen verfügbar sein werden. Zu viele Lkw-Fahrer seien am Ende ihrer Karriere und nur wenige junge Menschen entscheiden sich für diesen Beruf. Diese Lücke könnte durch fahrerlose Lkw geschlossen werden. So schätzt das IFT weiter, dass von den 6,4 Millionen benötigten Fahrern 2030, zwischen 3,4 und 4,4 Millionen durch fahrerlose Lkw ersetzt werden könnten (ITF, 2015). Dies könnte laut Maunsell et al. (2014) zu Kostensenkungen von 40% führen.

Axhausen et al. (2019) führen als Gründe für diese Kostenreduktion an, dass ein Hauptteil auf die wegfallenden Fahrerlöhne entfällt. So wird geschätzt, dass diese 30% der heutigen Transportkosten im Logistiksektor ausmachen (Trego & Murray 2015³, gelesen in Axhausen et al. 2019). Des Weiteren würden die Kosten reduziert, da ohne den Fahrer keine Pausen mehr notwendig sind und somit der Lieferprozess effizienter wird. Dies würde aber dazu führen, dass auch nachts die Autobahnen voll sind, da nicht, wie bisher, die Fahrer bzw. Fahrzeuge hauptsächlich nachts pausieren. (Axhausen, et al., 2019).

Grundsätzlich haben die AVs auch in der der Logistik das Potential, die Welt zu verändern. Es wird sogar davon ausgegangen, dass in der Logistik zuerst AVs eingesetzt werden, noch vor anderen Industrien. Dies liegt laut DHL (2014) auch daran, dass für die AVs ganz andere Regeln gelten, wenn diese in geschützten, privaten Zonen unterwegs sind, als im öffentlichen Raum. So würden jetzt schon erfolgreich fahrerlose Lösungen in geschützten Umgebungen wie einem Warenlager oder an einem solchen eingesetzt. Der nächste Schritt wäre es, diese Lösungen auch auf die Straße zu bringen. DHL kann sich einen breiten Einsatz von AVs in der gesamten Logistikkette vorstellen vom Warehouse über die Langstrecke bis hin zur Letzten Meile-Zustellung (siehe auch Abbildung 7). (DHL Trend Research, 2014)

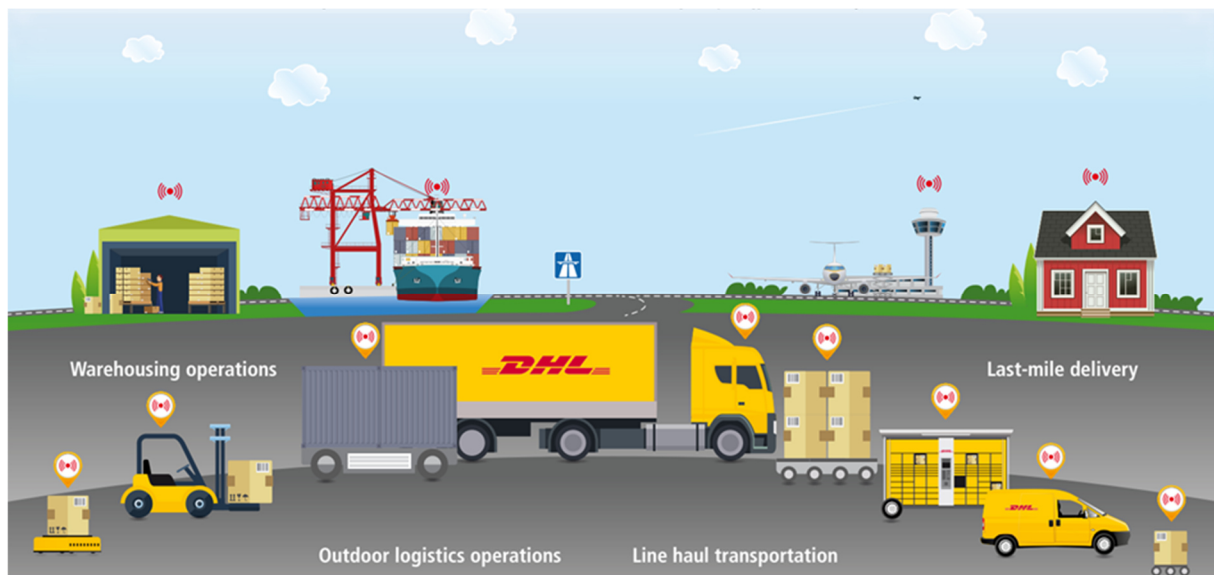


Abbildung 7: Überblick zu den fahrerlosen Fahrzeugen in der Logistik (DHL Trend Research, 2014)

Die Studie gibt für die einzelnen Bereiche Beispiele, wie in diesen AVs eingesetzt werden können. Diese werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

³ Anmerkung: in der gefundenen Originalquelle werden Torrey und Murray als Autoren genannt

Warehousing Operations

In dieser Gruppe werden Produkte unterschiedlichster Größe in Lagern von AVs bewegt. Diese sind aber oftmals recht unflexibel, da sie bei Hindernissen stoppen und ihnen dann manuell geholfen werden muss und da sie teils nur auf fest definierten Routen fahren. Zudem sind hohe Investitionen zu tätigen. Die Technik der festen Routen (markiert z. B. durch Klebeband auf dem Boden) ist mittlerweile überholt, da diese Technologie sehr unflexibel ist.



Abbildung 8: Lagerhausabläufe der Zukunft (DHL Trend Research, 2014)

Mittlerweile werden Systeme eingesetzt, die Kameras und Laser nutzen, um ihr Umfeld dauerhaft zu scannen und sich so in der Umgebung zu orientieren. Durch 360-Grad Tiefenscans wird eine 3D-Karte erstellt, mit der das Fahrzeug in der Lage ist zu navigieren. Diese Fahrzeuge können sich in Lagerhäusern komplett selbstständig und flexibel bewegen, wodurch sich viele Möglichkeiten zum Einsatz ergeben (siehe Abbildung 8).

Ein möglicher Oberbegriff für den Einsatz ist das autonome Laden und Transportieren. Bei diesem können Güter transportiert und gleichzeitig der Prozess des Ladens und Entladens automatisiert werden. Dadurch kann zum einen die Effizienz gesteigert werden und zum anderen auch die Sicherheit beim Transport und Verladen. Bei der Umsetzung gibt es die verschiedensten Systeme, aus denen je nach Anwendungsfall gewählt werden kann. Viele dieser Systeme ermöglichen eine flexible Bewegung der Fahrzeuge im Lager, so dass diese sich an die aktuellen Gegebenheiten anpassen. Zudem sind die Systeme oftmals flexibel skalierbar, um so die Anfangsinvestitionen niedriger zu halten und Testphasen zu ermöglichen. Je nach Bedarf gibt es Systeme, die sich zwischen Stockwerken bewegen können, im Lager verschiedene Ebenen bedienen, verschieden große Güter transportieren und/oder sich mit anderen Fahrzeugen im Schwarm koppeln können. Alle diese Systeme können Hindernisse erkennen, so dass sie keine Schäden anrichten oder Personen verletzen. Eine Lösung kann sogar bestehende elektrische Gabelstapler nachträglich automatisieren.

Ein weiterer Anwendungsfall ist die Unterstützung beim Kommissionieren. Dabei kann im ersten Fall ein Fahrzeug den Kommissionierer unterstützen, indem es ihm folgt und die Waren auf dem Fahrzeug

PAVE

gesammelt werden. Ist der Ladungsträger voll, fährt das AV zu einem Verladeplatz und ein neues, leeres steht für den Kommissionierer bereit. Im zweiten Fall können die Fahrzeuge ganze Regale bewegen und bringen so die Waren zum Kommissionierer, der dadurch nicht mehr laufen muss, wodurch der Prozess noch effizienter wird.

So können die AVs im Lager die Prozesse optimieren und die Sicherheit verbessern. (DHL Trend Research, 2014)

Outdoor Logistics Operations

Im zuvor beschriebenen Fall des Lagerhauses ist es noch recht einfach die Fahrzeuge zu automatisieren, da es ein geschlossenes System, in einer privaten Umgebung und in klar definierten Prozessen ist. Ein erster Schritt nach draußen sind die Betriebsgelände, Häfen und Flughäfen (siehe Abbildung 9).

Viele Betreiber dieser Stätten versuchen die Überlastung und Sicherheit zu verbessern. Klassische Gabelstapler, Lkw und Fußgänger machen das Manövrieren schwer, gefährlich und ineffizient. An dieser Stelle könnten AVs den gewünschten Effekt bringen und z. B. Paletten transportieren und umstellen. Des Weiteren könnten spezielle Fahrzeuge Container oder ähnliches transportieren und so einen Container von der Entladung des Schiffes zum gewünschten Zielort am Hafen bringen. Da in solchen Fällen oftmals fest definierte Routen gefahren werden, könnten diese durch Transponderstifte im Boden markiert werden. Diese Fahrzeuge könnten auch Ladungsträger anheben, um sie beispielsweise in ein Flugzeug zu verladen.



Abbildung 9: Outdoor Logistics Operations (DHL Trend Research, 2014)

Den Transport hin zu diesen Stätten könnten autonome Lkws übernehmen. (DHL Trend Research, 2014)

Line Haul Transportation

In diesem Anwendungsfall liegt ein deutlich höheres Unfallrisiko vor. Hier fahren die Lkw oftmals große Distanzen zwischen verschiedenen Städten und so kann es selbst erfahrenen Fahrern passieren, dass sie z.B. durch Fehler anderer oder durch gefährliche Wetterbedingungen einen Unfall verursachen.

PAVE

Durch Größe und Gewicht der Fahrzeuge können diese Unfälle mitunter verheerende Folgen haben. Durch AVs erhofft man sich die Reduzierung der Fahrerfehler und Vermeidung von Unfällen.

Wie in Abbildung 10 zu sehen ist, sind unterschiedliche Anwendungsfälle bzw. Formen denkbar. Ein erster Schritt wäre das assistierte Autobahnfahren für Lkw (assisted trucking), ähnlich wie es schon in Pkw verbaut wird. Das System könnte den Abstand zum Vordermann halten, Geschwindigkeit regeln, notbremsen, den toten Winkel überwacht oder auch die Spur halten. Die Funktionen des Systems könnten dann immer weiter ausgebaut werden in Richtung eines autonomen Lkw. So könnten das Überholen und das Auf- und Abfahren der Autobahn automatisiert werden. Denkbar sind bei den Lkw Szenarien, bei denen der Fahrer bis zur Autobahn manuell fährt und ab dort der Lkw automatisch fährt, so dass der Fahrer Pause machen oder sich anderen Aufgaben widmen kann. Oder ein Fahrer fährt den Lkw bis zu einem Punkt an der Autobahn, ab dem das Fahrzeug selbstständig fahren kann und der Fahrer steigt dort aus. Der Lkw fährt dann lange Strecken auf der Autobahn ohne Fahrer und wird dann kurz vor dem Zielort an der Autobahn von einem anderen Fahrer übernommen.

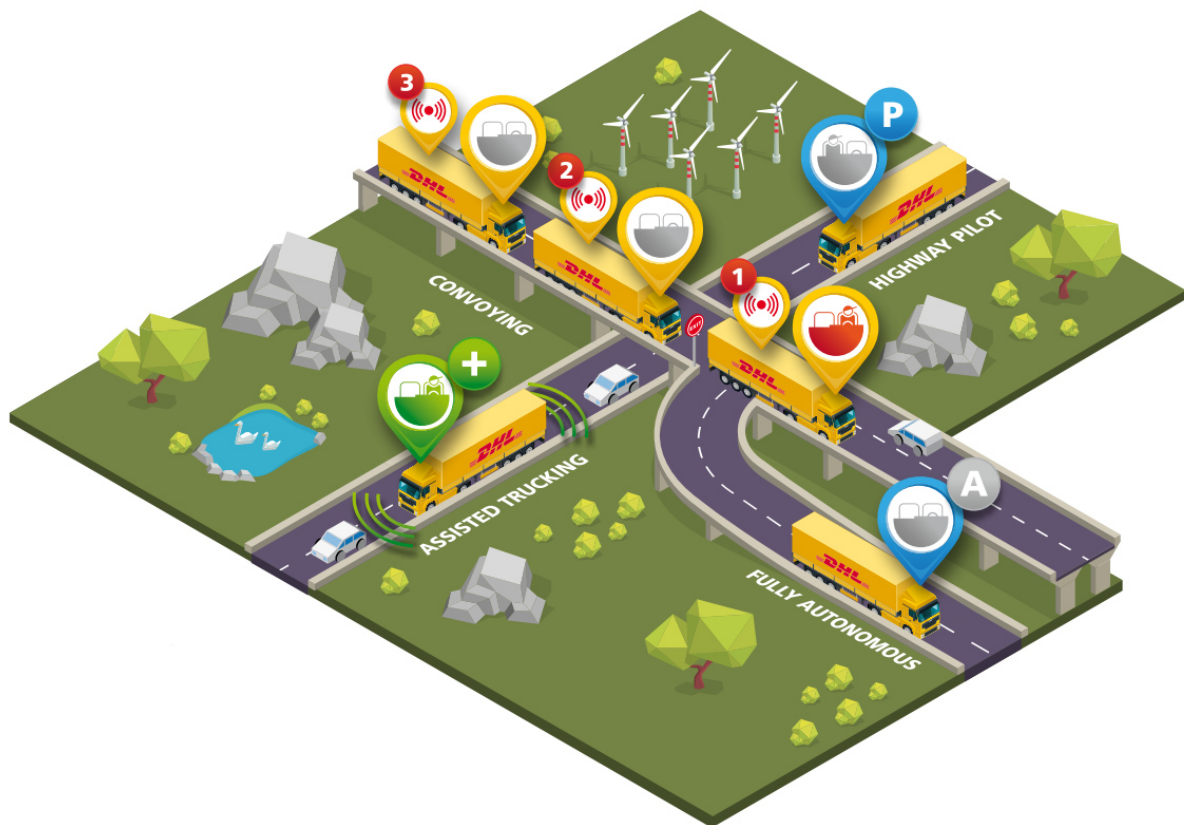


Abbildung 10: AVs in Line Haul Transportation (DHL Trend Research, 2014)

Da die fahrerlosen Lkw die Sicherheit erhöhen sollen, werden schon jetzt AVs in Bereichen eingesetzt, die besonders gefährlich sind. So gibt es fahrerlose Minenfahrzeuge, die die geförderten Materialien innerhalb der Mine bewegen.

Eine weitere Möglichkeit ist es, Lkw auf der Autobahn in Kolonne fahren zu lassen (Convoying). Dies entspricht dem in den Kapiteln zuvor beschriebenen Platooning. In diesem Fall wird der vordere Lkw von einem Fahrer gesteuert und die anderen folgen diesem und führen entsprechend versetzt dessen Manöver aus. So können auch hier die hinteren Fahrer Pause machen oder andere Aufgaben erledigen. In diese Kette könnten sich auch Pkw einklinken. (DHL Trend Research, 2014)

Last Mile Delivery

In diesem Bereich haben die Fahrzeuge mit komplexen und dynamischen Situationen zu kämpfen. Besonders in Städten mit vielen Lkw, Pkw, Fahrradfahrern, Fußgängern und mehr, die sich in unterschiedliche Richtungen bewegen und unterschiedliche Ziele haben, besteht eine große Herausforderung für AVs. Nur wenn die AVs sich auf der letzten Meile problemlos selbstständig bewegen können, sind sie eine Option für die Zustellung. Dabei kann es von Vorteil sein, wenn die Stadt besonders voll ist, da dort der Verkehr oftmals langsamer ist und das AV so mehr Zeit zum Reagieren hat.



Abbildung 11: Typische komplexe Umgebung in der letzten-Meile Zustellung (DHL Trend Research, 2014)

Wie in Abbildung 11 zu sehen ist, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten die letzte Meile zu bewältigen. Ein großer Nachteil bisheriger Zustellungen ist laut DHL, dass nicht immer eine Haltemöglichkeit für das Zustellfahrzeug direkt vor der Tür bzw. der Ablagemöglichkeit besteht. Dadurch muss der Zusteller hin- und zurücklaufen und muss die teils schweren Pakete größere Strecken tragen. Als eine mögliche Lösung dieses Problems stellt sich DHL vor, dass der Fahrer von einem selbstfahrenden Zustellfahrzeug unterstützt wird. Muss der Fahrer mehrere Pakete in einem Gebiet ausliefern, läuft dieser von Kunde zu Kunde und das Fahrzeug folgt ihm selbstständig, bei größeren Strecken kann der Fahrer wieder in das Fahrzeug steigen. Ist das Fahrzeug leer und sind noch Pakete im Zustellgebiet zuzustellen, steht automatisch ein weiteres Fahrzeug bereit, das rechtzeitig aus dem Depot zum Fahrer gefahren ist. So könnte die Zustellung deutlich effizienter werden und der Paketbote produktiver, sein Job einfacher und attraktiver.

PAVE

Auch den letzten Schritt der Zustellung, die Übergabe, zu automatisieren ist heutzutage noch nicht möglich, wird aber erforscht. Es ist aber möglich, dass eine Maschine Pakete an eine Packstation oder Paketkasten übergibt. Beispielsweise hat Cleveron einen Roboter entwickelt, der vom Paketdienstleister beladen wird, dann zu einem Zustellort und dort über einen Arm Pakete in eine spezielle Station ablegen kann (Cleveron, 2018). Ein solcher Paketkasten steht beim Empfänger zugänglich für die Zustellung bereit. Das Netz der Packstationen, bei denen sich der Kunde sein Paket an einem öffentlichen Ort zu jeder Zeit abholen kann, wird stetig erweitert. Aktuell gibt es rund 3.700 in Deutschland (DHL, 2019), bis 2021 soll die Anzahl auf rund 7.000 erhöht werden (Deutsche Post DHL Group, 2019). Eine Weiterentwicklung der Packstationen könnte sein, dass diese autonom fahren können. Dabei würden diese beladen in die Nähe des Kunden fahren, wo dieser sein Paket abholen kann.

Eine weitere Möglichkeit sieht DHL in geteilten AVs, diese werden dann als „Shopping Fahrzeug“ eingesetzt. Der Kunde könnte dann von seinem Arbeitsplatz eine Bestellung aufgeben aber anstatt, dass er diese abholt oder eine Lieferung zuhause organisiert, bucht er ein AV Shopping Fahrzeug. Dieses holt die Güter beim Laden ab und fährt anschließend zu einer vereinbarten Zeit zum Kunden, der dann in dem AV nach Hause gefahren wird, dort die Güter auspacken kann und erst dann fährt das AV ab und zum nächsten Kunden. Auch möglich ist, dass ein Fahrzeug Waren abholt und diese im Kofferraum gelagert werden. Das AV fährt zum Kunden und dieser kann dann am vereinbarten Ort seine Bestellung aus dem Kofferraum nehmen.

In der Zukunft kann sich DHL auch vorstellen, dass Pakete selbstfahrend werden. Es gäbe also Fahrzeuge, die ein Paket fassen können und diese fahren dann selbstständig zum Kunden. Diese wären vor Diebstahl gesichert, sodass nur der Kunde das Paket entnehmen kann und das Fahrzeug könnte seine Temperatur entsprechend der Ware regeln. Es ist auch vorstellbar, dass ein großes Fahrzeug ein Gebiet ansteuert und von einem zentralen Ort aus mehrere dieser kleinen Fahrzeuge ausschwärmen und so die Zustellung auf der letzten Meile vornehmen. Dabei könnten die Fahrzeuge, beim Kunden angekommen, mit dessen Smart-Home Geräten kommunizieren, so dass das Fahrzeug beim Kunden warten kann bis dieser sein Paket herausnimmt und das Fahrzeug wieder zu seiner Basis zurückschickt. (DHL Trend Research, 2014)

3.6 Vor- & Nachteile

Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile von autonomen Fahrzeugen in einer Tabelle gegenübergestellt und thematisch sortiert. Dazu wurden die bisher gewonnenen Erkenntnisse genommen und zusammengefasst.

Wie sich die Situation in der Zukunft entwickelt, hängt von den Gegebenheiten, die vor Ort herrschen, ab. Es kann also nicht allgemein gesagt werden, ob die Vor- oder Nachteile überwiegen. Dies wird sich immer erst vor Ort mit der Zeit zeigen, denn eine Voraussage ist schwer zu treffen, da zu viele verschiedene Faktoren die Situation beeinflussen und gestalten. Zahlen und Ergebnisse werden oftmals auf Basis von Annahmen getroffen, die sich je nach Studie auch unterscheiden, so ist teilweise ein Vergleich oder eine Zusammenfassung schwer möglich. Über mögliche Wechselwirkungen und daraus resultierende Konsequenzen herrscht vielfach noch Unklarheit. Genaue Aussagen zum durch AVs induzierten Verkehr sind noch nicht möglich, dieser könnte aber einen sehr großen Einfluss haben (IHK, 2018).

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Kostensenkungen im Güterverkehrssektor (Axhausen, et al., 2019) • Kosten für z. B. Lkw könnten sinken, da kein Führerhaus mehr notwendig ist (ITF, 2017) • Betriebskosten sinken <ul style="list-style-type: none"> ○ Kein Fahrer mehr benötigt ○ 54-69% der Fahrer im Logistikbereich 2030 durch AVs ersetzt (ITF, 2017) • Kraftstoff Einsparung u. a. durch Platooning (ITF, 2017) • Firmen können Kosten sparen, da Arbeitnehmer die Fahrzeit anderweitig nutzen können (Litman, 2019) • Preis für eine Fahrt von 0,42-0,49\$ pro Meile (konkurrenzfähig zum CarSharing) (Chen, 2015) • Wenn mind. zwei Personen fahren, Preise 2035 konkurrenzfähig zum ÖPNV (Mosquet, et al., 2015) • Volkswirtschaftliches Nutzenpotential von 14,1 Milliarden € durch AVs nur auf Autobahnen in Deutschland (Treibhausgas & Luftschadstoff, Unfallkosten, Staukosten) (Fraunhofer IAO, 2015) • In den USA könnten \$434 Milliarden durch AVs eingespart werden (Fragant & Kockelman, 2015) • Versicherungskosten sinken durch verringertes Unfallrisiko • Parkkosten könnten durch geringere Nachfrage sinken (Litman, 2019) • Kosten werden in Zukunft durch Skaleneffekte sinken, sodass AVs auch für die Verbraucher interessant werden (Deloitte, 2019) 	<ul style="list-style-type: none"> • Anschaffungskosten werden steigen • (noch) Erhöhte Kosten durch komplexe Komponenten (IHK, 2018) <ul style="list-style-type: none"> ○ Zwischen 2040/2060 erschwinglich ○ Komplexeres Computersystem als Flugzeug (Litman, 2019) ○ Lkw Stufe 5 bis zu 23.400\$ Extrakosten ○ Großteil entfällt dabei auf die Software (85%) (Berger, 2016) • Kosten könnten regelmäßig für Services wie Navigation oder Sicherheit anfallen <ul style="list-style-type: none"> ○ Kosten für Reinigung und Kontrolle der Fahrzeuge (0,5-1\$ pro Fahrt) ○ Zusatzkosten für Überwachungs-ausrüstung der Innenräume (Litman, 2019) • Durch Anstieg der gefahrenen Kilometer steigt die Beanspruchung der Infrastruktur und somit die Kosten der Instandhaltung (Litman, 2019) • Fahrbahnmarkierungen und Schilder müssen für AVs immer gut erkennbar sein • Bedarf mehr Kontrolle und Nachbesserung → Kosten • AVs bräuchten für Baustellen und Unfälle flexible Markierungen, so dass sie auch normalerweise durchgezogene Linien überfahren können • Entsprechende Kommunikationsinfrastruktur muss vorhanden sein (Lemmer, 2016) • Bezahlbare Mobilität könnte weniger werden z.B. Laufen, Fahrradfahren und ÖPNV (Litman, 2019)
<ul style="list-style-type: none"> • Es könnte ein neuer Bedarf an Arbeitskräften und Fachleuten in den Bereich Digitalisierung, E-Mobilität, Smart Mobility und vernetzte Fahrzeuge entstehen (Lemmer, 2016) • Weitere Jobs könnten bei Betreuungspersonal entstehen, die in AV für Güter und Personen arbeiten (Axhausen, et al., 2019) 	<ul style="list-style-type: none"> • Abbau Arbeitsplätze im Transport- und Logistikwesen (Axhausen, et al., 2019) • Jobs in damit verbunden Bereich können wegfallen (Wartung, Notfallrettung da weniger Unfälle) (Shanker, et al., 2013)

<ul style="list-style-type: none"> • Elektrisch betriebene AVs könnten Emission von Treibhausgasen um 90% reduzieren (Greenblatt & Shaheen, 2015) • Platooning kann den Verbrauch senken (Litman, 2019) • Durch effizienteren Verkehrsfluss, effizienteres Parken, Gewichtsersparnis, Platooning und Ride Sharing können 80% der benötigten Energie eingespart werden (Greenblatt & Shaheen, 2015) • Schon bei geringer Marktdurchdringung können AVs Energie einsparen, da sie gleichmäßiger und vorrausschauender fahren • Bei steigender Marktdurchdringung können sie Staus vermeiden und so ebenfalls Energie sparen (Milakis, et al., 2017) • AVs werden wahrscheinlich nicht schneller als Richtgeschwindigkeit fahren, was ebenfalls Energie einspart (Cacilo, et al., 2015) • Die stärkere Nutzung von geteilten Fahrzeugen führt zwar zu stärkerer Abnutzung, aber dadurch müssen sie auch regelmäßiger ausgetauscht werden, wodurch neue Technologien (umweltschonender und emissionsärmer) schneller eingesetzt werden (IHK, 2018) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bei steigender Zahl an gefahrenen Kilometern steigt somit der Energieverbrauch und so die Belastung der Umwelt • Dies kommt ebenfalls dadurch, dass Menschen AVs nutzen können, die zuvor kein eigenes Fahrzeug nutzen konnten • Wenn AVs als mobiles Zuhause genutzt würden (z.B. schlafen, arbeiten, etc.) würde die Zahl der Nutzer pro Fahrzeug sinken (Greenblatt & Shaheen, 2015) • Fahrzeuge & Infrastruktur verschleiß stärker (Litman, 2019)
<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl der Fahrzeuge kann verringert werden <ul style="list-style-type: none"> ○ In Familien von 2,1 auf 1,2 im Schnitt (Schoettle & Sivak, 2015) ○ 90% der Fahrzeuge könnten eingespart werden in Lissabon, wenn mehrere Leute in einem AV befördert werden und es einen Hochleistung ÖPNV gibt ○ Ca. 80% wenn die Leute bei gleichem System alleine im Auto sitzen (ITF, 2015) ○ In Berlin könnte ein AV-Taxi 10 private Pkw ersetzen (Bischoff & Maciejewski, 2016) ○ Automatisierte Fahrzeuge können Stauungszeit auf Autobahnen um 17-40% verringern (je nach Durchdringung) (ATKINS, 2016) 	<ul style="list-style-type: none"> • Im Lissabon Fall mit 80% weniger Autos, würden die gefahrenen km um 89% steigen • Im ersten Fall (90%) wären es 6% (ITF, 2015) • Induzierte Nachfrage durch Vorteile der AVs dabei noch nicht berücksichtigt (Axhausen, et al., 2019) • Anzahl der gefahrenen km wird steigen <ul style="list-style-type: none"> ○ Um 10-30% (Litman, 2019) ○ 6-89% (ITF, 2015) ○ 37% bei 90% Marktanteil AVs (Fragnant & Kockelman, 2015)
<ul style="list-style-type: none"> • Kapazität des Verkehrsnetzes kann erhöht werden <ul style="list-style-type: none"> ○ Durch Platooning ○ Durch Kommunikation der Fahrzeuge können Daten ausgetauscht werden (auch mit Infrastruktur), was eine intelligente 	<ul style="list-style-type: none"> • Kapazität kann auch negativ beeinflusst werden durch AVs <ul style="list-style-type: none"> ○ Nachfrage nach Mobilität wird steigen ○ Einigen Nutzergruppen werden Hindernisse genommen

<p>Verkehrssteuerung ermöglicht → so können u.a. Staus vermieden werden (Lemmer, 2016) (IHK, 2018)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ AVs können gleichmäßiger fahren (IHK, 2018) ○ Schon ein kooperativer Abstands- und Geschwindigkeitsreglassistent kann bei vollständiger Durchdringung die Kapazität auf Autobahnen und Knotenpunkten verdoppeln (Milakis, et al., 2017) ○ AVs erhöhen Nutzung des ÖPNV und verringern private Autonutzung (Axhausen, et al., 2019) (Litman, 2019) 	<p>(Beeinträchtigte, junge Menschen ohne Führerschein)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Steigender Komfort führt auch zu mehr Fahrten (Litman, 2019) ○ AVs konkurrieren eher mit Laufen und Radfahren als dem Auto (z. B. kurze Strecken zum einkaufen (Christie, et al., 2016) ○ Bei konkurrenzfähigen Preisen könnte Zahl der Reisen um 150% steigen (Burmeister, et al., 2014) ○ Modale Verkehrsverlagerung hin zum AV (auch weg vom ÖPNV) (IHK, 2018) ○ Bsp.: ein Bus mit 50 Sitzplätzen würde durch 13 AVs ersetzt (12 mehr, 3 Fahrzeuge=Fläche 1 Bus) → 400% mehr Flächenbedarf (Axhausen, et al., 2019) ○ Studien gehen teils davon aus, dass der ÖPNV komplett weg fällt (Gruel & Standford, 2016) • Leerfahrten <ul style="list-style-type: none"> ○ AVs fahren zum Kunden (Axhausen, et al., 2019) ○ AVs fahren zur Reinigung oder Wartung (Litman, 2019) ○ AVs suchen sich selbstständig einen Parkplatz (Lemmer, 2016)
<ul style="list-style-type: none"> • In der Stadt können AVs das Stadtbild komplett ändern <ul style="list-style-type: none"> ○ Sinkende Nachfrage nach Parkraum gibt sehr viel Platz frei ○ AVs müssen nicht direkt vor dem Gebäude geparkt werden ○ Platz kann für Busspuren, zusätzliche Spuren, Fahrradwege, Fußwege, Grünflächen, etc. genutzt werden ○ Aus großen Parkplätzen können neuer Wohnraum oder Parks entstehen ○ Neue Gebäude sind nicht aufs Parken auszulegen, so kann mehr Wohnraum oder ein luftigeres Stadtbild entstehen ○ Parken der Fahrzeuge würde sich eher an Rand der Stadt verlagern (Milakis, et al., 2017) ○ 90% weniger Parkfläche wird benötigt (Zhang, et al., 2015) 	<ul style="list-style-type: none"> • Es muss vermieden werden, dass AVs rumfahren, um Parkgebühren zu vermeiden • Gefahrene Kilometer steigen, wenn Fahrzeuge im Randgebiet parken (Litman, 2019) • Platz zum Ein- und Aussteigen muss eingeplant werden. Besonders bei Großveranstaltungen, wenn auf einmal viele Leute mit einem AV kommen (Axhausen, et al., 2019) • Genügend Platz auch an Mobilitätsknoten wo modal gewechselt wird (Heinrichs, 2015) • In Gegenden von Einfamilienhäusern, mit privaten Stellplätzen wird sich Parkplatzzahl kaum verringern, da dort das AV eher den herkömmlichen Wagen ersetzt (Heinrichs, 2015)

PAVE

<ul style="list-style-type: none"> ○ Dort wo AVs parken kann 15% Platz gespart werden, da sie deutlich dichter stehen können (Bertoncello & Wee, Juni 2015) 	
<ul style="list-style-type: none"> • Durch AVs kann der ländliche Raum wieder attraktiver werden (bessere Anbindung) • Entlastung der Städte • Ländlicher Raum sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr besser erschlossen (IHK, 2018) • Attraktiver durch geringeren Reiseaufwand, geringere Reisezeit, geringere Kosten → erhöht Zugänglichkeit zur Mobilität (Milakis, et al., 2017) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ziehen viele Leute in die ländlichen Gebiete (durch bessere Anbindung) muss auf größerer Fläche entsprechende Infrastruktur bereitgestellt werden, was Kosten bedeutet (Larco, 2018)
	<ul style="list-style-type: none"> • Noch zu klärende Rechts- & Haftungsfragen (IHK, 2018) (Daimler, 2019a) <ul style="list-style-type: none"> ○ Kann dazu führen, dass Hersteller Innovationen zurückhalten (Anderson, et al., 2016) • Es könnte zu Datenmissbrauch oder auch Hacken kommen • Allgemein könnte die Privatsphäre durch Ortung und Datenaustausch eingeschränkt werden (Litman, 2019)
<ul style="list-style-type: none"> • Zeit während der Fahrt kann sinnvoll genutzt werden und es wird Stress vermieden • Auf Level 5 kein Lenkrad und Pedale notwendig, Fahrer muss auch nicht nach vorne gucken • Arbeiten, Spielen, Multimedia, Entspannung (Litman, 2019) • Keine Zeit mehr im Stau verschwenden 	
<ul style="list-style-type: none"> • AVs könnten zum universellen Reisemittel werden, das auf Abruf zur Verfügung steht (Enoch, 2015) • Familien könnten sich ein AV teilen, AV fährt Mitglieder zu ihren Terminen und wartet dann Zuhause oder auf Parkplatz, bis es wieder gebraucht wird (Schoettle & Sivak, 2015) • Unabhängige Mobilität für Menschen, die sonst nicht selbst fahren könnten (Litman, 2019) 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Angst vor Vandalismus könnte dazu führen, dass die Innenräume aus einfachen

	Materialien gebaut werden (langlebig und haltbar) (Litman, 2019)
<ul style="list-style-type: none"> • Unfälle können vermieden werden • 10% AVs → 50% der Unfälle • 90% AVs → 10% der Unfälle (Fragnant & Kockelman, 2015) • Durch die Fähigkeit zu kommunizieren können sich die AVs gegenseitig über Gefahren informieren (z.B. Unfall in Kurve) (Lemmer, 2016) 	
<ul style="list-style-type: none"> • Kosten in der Logistik könnten um 40% sinken (Maunsell, et al., 2014) • Großteil bei Fahrerlöhnen (machen 30% der Kosten aus) (Torrey & Murray, 2015) • Keine Pausen mehr nötig, Lkw können auch nachts fahren (Axhausen, et al., 2019) • Sicherheit und Effizienz kann erhöht werden • Zustellung effizienter • Job des Zustellers produktiver, einfacher und attraktiver (DHL Trend Research, 2014) 	
<ul style="list-style-type: none"> • AVs können für die Automobilbranche sowohl Fluch als auch Segen sein • Industrie muss sich entsprechend positionieren (hin zum Mobilitätsdienstleister) • Dabei ist es wichtig schnell zu sein, da sonst andere Anbieter Märkte besetzen (Deloitte, 2019) • Auch Versicherungen müssen sich neu positionieren (durch AVs könnte auf dem bisherigen Markt große Teile des Umsatzes wegbrechen) • Wirkung könnte positiv oder negativ auswirken: <ul style="list-style-type: none"> ○ Kunden nutzen AVs für die letzte Meile ○ Hauptstrecke mit ÖPNV ○ Schlecht mit ÖPNV angebundene Gebiete können so angebunden werden • Menschen sind bei Preisen von Fahrdienstleistungen sensibler als bei Investitionen bei Kauf (Axhausen, et al., 2019) (Litman, 2019) 	

Tabelle 3: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von AVs

3.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird der Stand von Wissenschaft und Technik erfasst und strukturiert. Ausgehend von der AVF-Technologie werden die Entwicklungsstufen der Automatisierung dargestellt und die Herausforderungen im Personen- und Güterverkehr bis zum autonomen Fahren zusammengestellt. AVF beeinflusst das gesamte Umfeld der Mobilität von Personen und Gütern und wird von ihm beeinflusst. Dies betrifft die Technologie selbst, ihre Leistungen und Kosten und die Bereiche Gesellschaft, Akzeptanz, Haftung. AVF hat Auswirkungen auf Mobilität, Transport und Logistik, Stadt und Raumplanung, Infrastruktur und Umwelt, Industrie und Arbeitswelt. In einem tabellarischen Vergleich wird ein Überblick über die Vor- und Nachteile von AVF gegeben.

4. Projektergebnisse

4.1 Szenarien

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Methodik gegeben, die für dieses Projekt relevant ist und dargestellt wie diese aktuell in der Literatur dargestellt wird. Zentral ist dabei die Szenario-Methodik, welche von ergänzenden Methoden unterstützt wird.

4.1.1 Methodik

Ein Szenario ist eine Beschreibung, ein Entwurf oder ein Modell der Abfolge von Ereignissen oder der hypothetischen Durchführung einer Sache. Prägnanter wird es von Gaßner et al. Definiert, welche sagen, dass ein Szenario eine Darstellung einer möglichen zukünftigen Situation sei, also ein Zukunftsbild. Dieses könne Entwicklungspfade beinhalten, die zu der zukünftigen Situation führen (Gaßner R. Kosow, 2008)

Um ein Szenario bzw. mehrere Szenarien zu entwickeln wird hier die Szenario-Methodik verwendet.

Bei der Szenario-Methodik handelt es sich um ein Konvolut an verschiedenen Ansätzen und Vorgehensweisen. Es gibt also nicht die eine Szenario-Methode, die einfach umgesetzt werden kann. Es kommt immer auf den Anwendungsfall an (Gaßner & Kosow, 2008). Deshalb wird im Folgenden ein Einblick in die verschiedenen Methoden gegeben.

Allgemein dienen die Verfahren dazu, einen systematischen Entwurf mehrerer alternativer, nachvollziehbarer dargestellter Vorstellungen von der Zukunft und der jeweiligen Entwicklungspfade dorthin zu entwickeln (vgl. Brettschneider 1999, gelesen in (Reich, 2012)). Als Veranschaulichung der Offenheit und Multiplizität der Zukunft und ihrer Antizipation hat sich das Trichtermodell (Abbildung 12) etabliert.

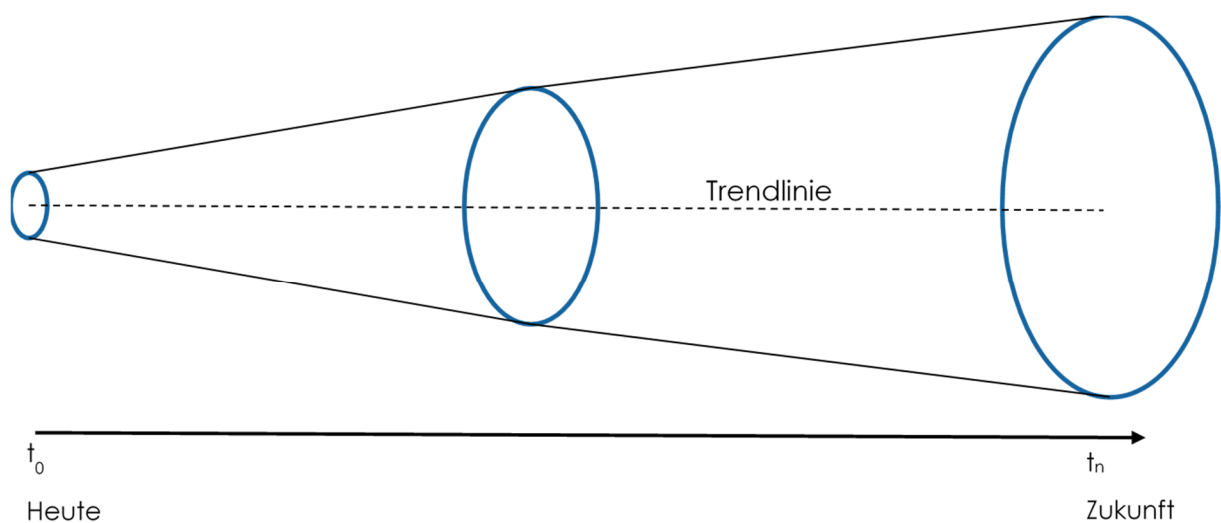


Abbildung 12: Trichtermodell (Eigene Darstellung, nach (Gaßner & Kosow, 2008))

Das Modell soll grundsätzlich veranschaulichen, dass es ab der Gegenwart (t_0) eine Vielzahl an Möglichkeiten gibt, wie sich die Situation entwickeln kann. Somit entsteht ein Raum an möglichen zukünftigen Entwicklungen und es wird verdeutlicht, dass es nicht nur eine einzige mögliche Zukunft

PAVE

gibt. Des Weiteren wird deutlich, dass sich über die Zeit die Anzahl bzw. der Raum der möglichen Entwicklungen deutlich vergrößert, die Zukunft wird immer ungewisser. Die äußeren Grenzen des Trichters stellen dabei das Betrachtungsfeld der Untersuchung dar. Mögliche Ereignisse außerhalb können beispielweise als unmöglich angesehen werden. Innerhalb des Betrachtungsfeldes werden dann, entsprechend der Methodik, Szenarien entwickelt, die für möglich gehalten werden. Die Faktoren und ihre Ausprägungen die notwendig sind zur Konstruktion der Szenarien, werden entsprechend des Erkenntnisinteresses gewählt. Entwickelt werden können so Wahrscheinlichkeitsszenarios (wahrscheinliche Entwicklung), Extremszenarios (z.B. Best- oder Worst-Case) oder auch Wunschszenarios. Dies hängt aber immer von der individuellen Gestaltung ab. Durch die verschiedenen Szenarien spannt sich der Raum der möglichen Zukünfte auf. (Gaßner & Kosow, 2008) (Reich, 2012).

Szenarios werden für unterschiedliche Ziele genutzt und erfüllen unterschiedliche Funktionen. Idealtypisch können die Funktionen in vier Dimensionen aufgespannt werden:

Explorative Funktion bzw. Wissensfunktion, Kommunikationsfunktion, Zielbildungsfunktion und Entscheidungsfindungs- und Strategiebildungsfunktion.

Trotz der Vielfalt an unterschiedlichen Szenariotechniken, die in der Literatur vorherrscht, lassen sich laut *Gaßner & Kosow* typische Phasen charakterisieren. Diese werden dann aber in den einzelnen Techniken unterschiedlich ausgestaltet. *Gaßner & Kosow* haben den generellen Szenarioprozess in fünf Phasen unterteilt, welche im Folgenden erläutert werden (Abbildung 13) (Gaßner & Kosow, 2008).

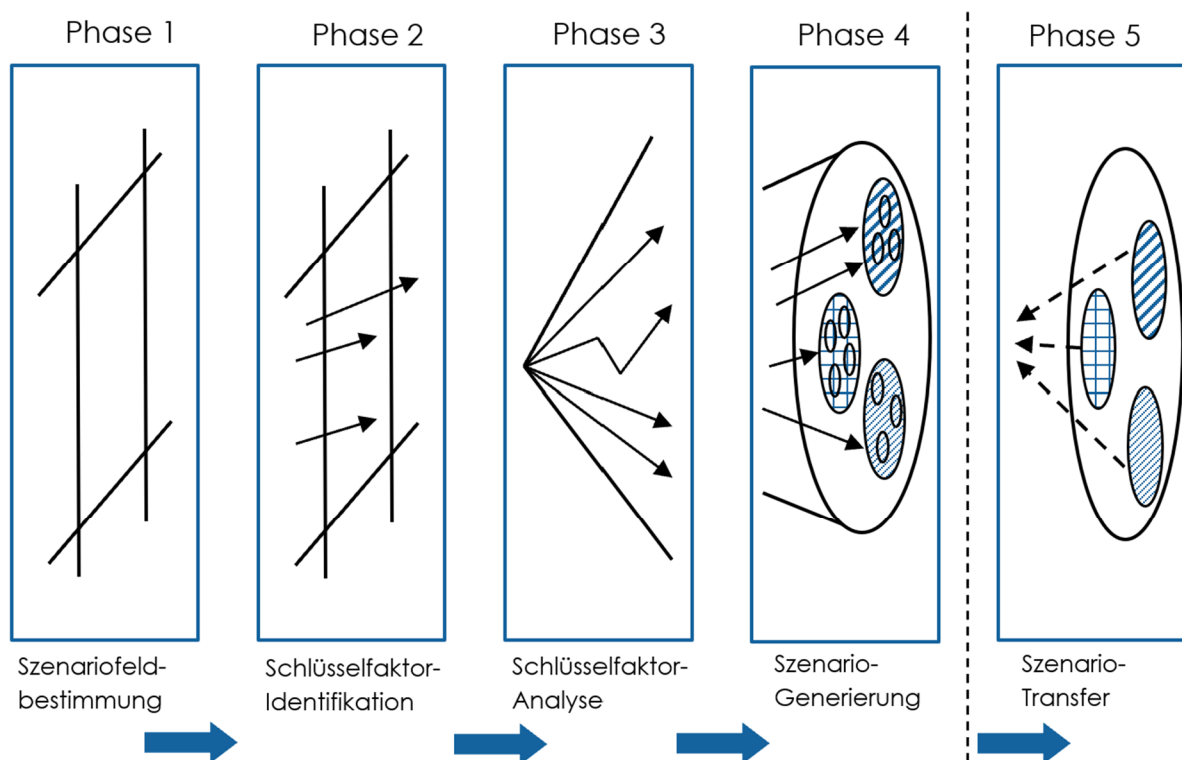


Abbildung 13: Phasen der Szenario-Techniken (Eigene Darstellung nach (Gaßner & Kosow, 2008))

4.1.2 PAVE - Szenarios

Der folgende Bericht über die Durchführung des Projektes wird entsprechend der Reihenfolge und erarbeiteten Ergebnisse der Workshoptermine aufgebaut und gegliedert. So soll ein Überblick über den aktuellen Stand des Projektes gewonnen werden und die Vorgehensweise erläutert werden.

Beim Kick-Off Meeting wurde ein gemeinsames Grundwissen zur Szenariomethodik erarbeitet. Des Weiteren wurde eine Gliederung der Workshops zur Szenario-Methodik vorgeschlagen, welche im Folgenden dargestellt ist (siehe Abbildung 14).

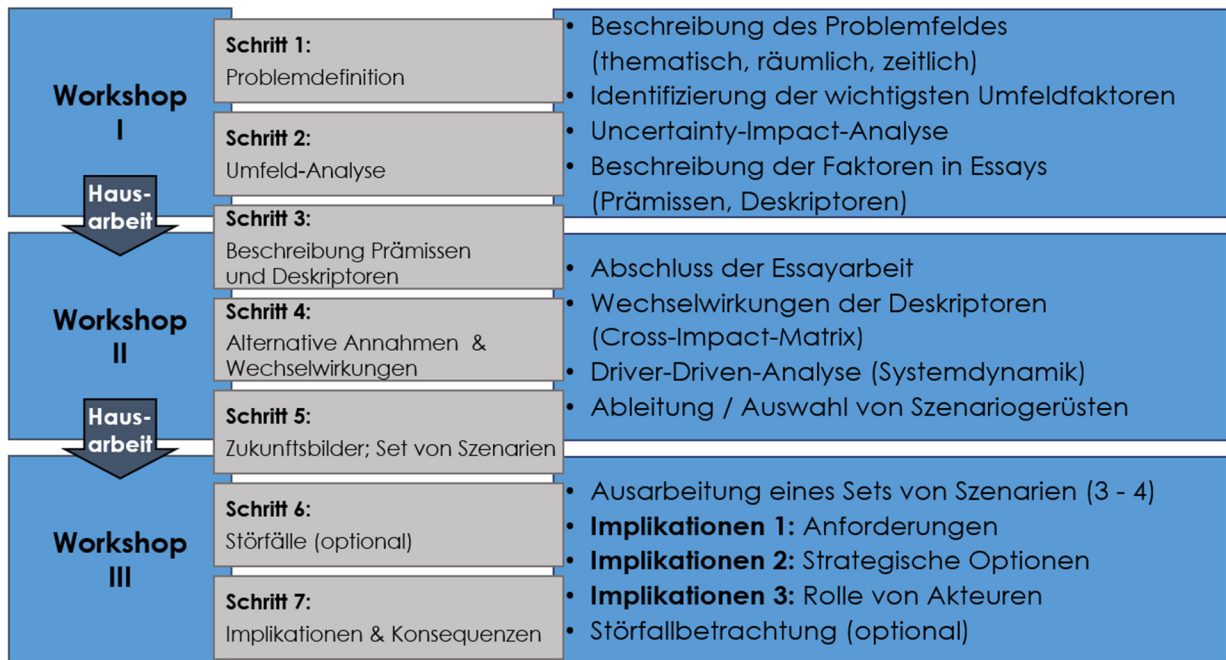


Abbildung 14: Graphische Darstellung der Gliederung der Szenario-Methodik (H.-C. Winter)

Im Rahmen eines ersten Workshops wurde die Abgrenzung und Fragestellung des gemeinsamen Szenario-Prozesses für das PAVE-Projekt definiert. Damit wird das Szenariofeld eingegrenzt und so festgelegt, wo die Grenzen des Szenarioraums liegen.

4.1.3 Abgrenzung

4.1.3.1 Personen-, Wirtschafts-, Öffentlicher-, & Güterverkehr:

- Alle Fahrzeuggrößen werden betrachtet
- Personen-, Wirtschafts- und Güterverkehr sind alle betrachtet
- Im Fokus sind Nutzfahrzeuge (Personen- und Gütertransport)
- Individuell besessene Fahrzeuge werden in ihrer Wechselwirkung betrachtet

4.1.3.2 Regional: Berlin, Deutschland & EU

- Die Metropolregion ist Sinnbild für einen europäischen urbanen Raum
- Aussagen lassen sich daraus für andere europäische Regionen ableiten (wenn auch nicht überprüft)

4.1.3.3 Automatisches / Autonomes Fahren

- Betrachtet werden für diesen Fall automatisches und autonomes Fahren (Stufen 4 & 5)
- Automatisches Fahren (Stufe 4)
 - Fahrerlose Fahrzeuge können sich zu definierten Bedingungen (Infrastruktur) im Mischverkehr auf frei gegebenen Strecken bewegen
 - Die Zulassung erfolgt voraussichtlich von Fahrzeugen in Verbindung mit einer dezidierten Strecke für das automatische Fahren
 - Erste prototypischen Fahrzeuge sind bereits in Europa und Deutschland zugelassen
 - Eine Industrialisierung ist in den nächsten 5 – 10 Jahren absehbar
 - Wir gehen von einem Flotteneinsatz der Fahrzeuge aus – ein Fahrerarbeitsplatz wird nicht mehr notwendig
- Autonomes Fahren
 - Fahrerlose Fahrzeuge können sich frei im Raum bewegen – eine spezielle Infrastruktur ist nicht notwendig, kann aber unterstützen
 - Die Zulassungsbedingungen sind derzeit nicht absehbar – eine nationale oder internationale Zulassung sollte aber möglich sein
 - Derzeit gibt es keine Fahrzeuge die sich autonom auf unbekanntem Strecken ohne spezielle Infrastruktur im Mischverkehr fahrerlos bewegen können
 - Mit einer Industrialisierung wird derzeit nicht in den nächsten 10 Jahren gerechnet

4.1.4 Fragestellung für den Szenarioprozess

Als Ziel für die Szenarien wurde gesetzt, dass diese konsistente und alternative Zukunftsbilder des Einflusses von automatisierten bzw. autonomen Fahrzeugen auf das zukünftige Verkehrsgeschehen liefern sollen.

Behandeln sollen die Szenarien folgendes:

- Die Ziele / Zielkonflikte der am automatisierten vernetzten Fahren beteiligten und potentiellen Nutzer,
- die Systemarchitektur und
- die Mobilitätsnachfrage (Personen & Güter) privater Haushalte und Unternehmen.

Die Zukunftsbilder sollen zum Schluss und als Ergebnis die Veränderungen der Organisationsstrukturen, Abläufe, Dienste und einzusetzenden Fahrzeuge beschreiben. Als Leitfrage für den Prozess stellt sich die Frage:

„Wie sieht die Zukunft urbaner Mobilität im Jahr 2028 und 2035+ (Personen und Güter) aus?“

Wie in der Leitfrage zu erkennen ist, wurde sich für zwei Zeithorizonte in der Betrachtung entschieden, um einen Zeithorizont zu haben, der besser abzuschätzen ist und um einen Vergleich zwischen beiden anstellen zu können. Denn wie in Abbildung 12 zu sehen ist und auch beschrieben ist, spannt sich der Raum der möglichen Entwicklungen deutlich größer auf, je weiter in der Zukunft Szenarien betrachtet werden.

Betrachtet werden die Entwicklungen und Veränderungen zum Jahr 2028 und zu den Jahren 2035 und Folgende. So wurde mit zehn Jahren in die Zukunft (2028) ein kurzfristiger Zeithorizont gewählt und mit 15 und mehr Jahren (2035+) ein mittel- bis langfristiger (Gaßner & Kosow, 2008).

4.1.5 Analyse des Szenario-Umfelds

Die Analyse des Szenario-Umfelds gehört zur Phase 2 des Szenarioprozesses, der Schlüsselfaktor-Identifikation. Bei ihr werden zentrale Größen gesucht und bestimmt, die das Szenariofeld beschreiben bzw. auf es wirken.

Zur Analyse des Szenario-Umfeldes wurden zu Beginn die Dimensionen festgelegt, in denen die Umfeldfaktoren gesucht werden sollten. Diese Sortierung entspricht in etwa dem PESTEL Schema (Political, Economic, Socio-Cultural, Technological, Environmental, Legal) nur, dass in diesem Fall *Politics* und *Legal* zusammengefasst wurden und dafür die Dimension *Urban Regulations* hinzugefügt wurde.

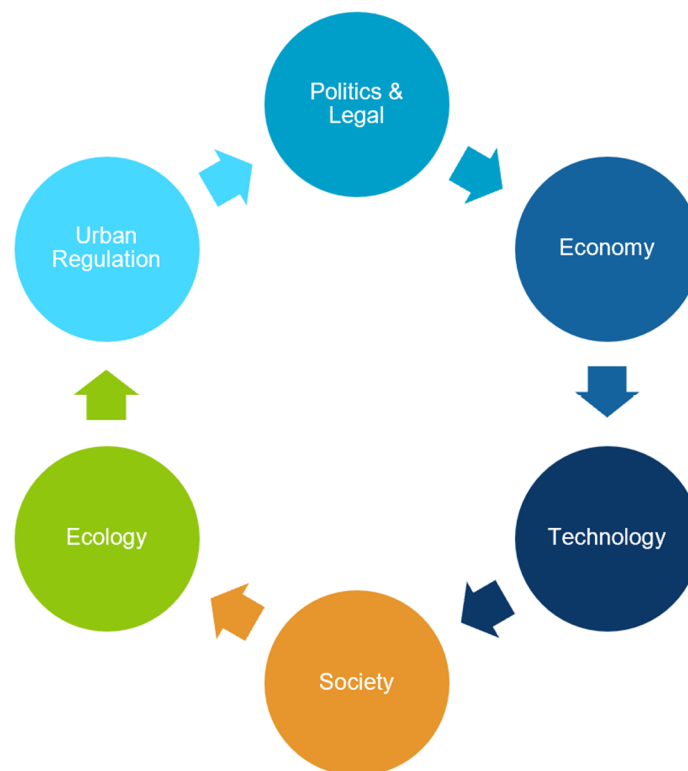


Abbildung 15: Dimensionen der Umfeldanalyse

Im Anschluss daran wurden zu jeder Dimension in Gruppenarbeit Faktoren gesucht, die in diesem Feld relevant sind und dazu dienen die Entwicklung in diesem Feld zu beschreiben.

Nachdem zu jeder Dimension Faktoren gesammelt wurden, wurden innerhalb jeder Dimension Punkte vergeben, um besonders relevante Faktoren zu erhalten. So konnte auch die Anzahl der Faktoren etwas beschränkt werden, sodass der Szenarioprozess übersichtlich und entscheidungsfähig bleibt. Im Folgenden sind die gesammelten Faktoren mit Bewertung dargestellt.

4.1.5.1 Politik / Rechtliche Fragen

- Zulassung von Technologien (Sicherheit) 5 Punkte
- Rechtlicher Rahmen ÖPNV (PbfG, Konzessionen im Kontext AV-Fahren) 3 Punkte
- Verkehrspolitische Ziele (Visionen, Zielsetzung, Bundespolitik, Kommunen) 1 Punkt

PAVE

- Klimaziele (Gefahren erleben durch Klima-Konfusion) 1 Punkt
- Energie (welcher Rahmen, wie speichern, wie transportieren)
- Ethik Diskussion zum autonomen Fahren
- (gesetzliche) Haftungsregelung von AVF
- Primat: Wirtschaftsverkehr

4.1.5.2 *Wirtschaft*

- Geschäftsmodelle: Wie kann man als Betreiber Geld verdienen? (Business Case) 6 Punkte
- Amortisation Invest AD
- Transformation div. Mobilitätsanbieter; Geschäftsmodell homogenes Angebot Uber Taxi etc.
- Neue Geschäftsmodelle neue Player am Markt
- Geschäftsmodelle – Mobilität vs. Automobilindustrie
- Herumfahrende Dienste z.B. Zahnarzt Neue Dienste?
- Ladeinfrastruktur zum Zwischenladen von Fahrzeugen
- Venture Capital
- Arbeitsmarkt 3 Punkte
- Entwicklung Arbeitsmarkt (Ort d. Tätigkeit, Anz.)
- Arbeitsmodelle, Arbeitszeitmodelle, Arbeitsplatz
- Wirtschaftsstandort Deutschland - Arbeitsplätze
- Schwarmisierung der Arbeitswelt – Home Office
- Beschäftigungswirkungen
- Fahrermangel vs. Arbeitsplätze
- Fahrermangel (Zuverlässigkeit, Kosten)
- Logistikkonzepte 5 Punkte
- Aufkommen Pakete
- Effiziente kostengünstige & kundenfreundliche Logistik
- Nutzung der Flotten im Leerlauf
- Belieferungsmöglichkeiten Einzelhandel
- City Hubs (Ort, Anzahl)
- Letzte Meile PV & GV
- Preise & Tarife im ÖV & GV 1 Punkt

4.1.5.3 *Technologie*

- Sicherheit 3 Punkte
- Cyber Security
- Sicherheit – Safety & Security
- Datensicherheit – Individualsphäre

PAVE

- Netzsicherheit (Datennetz, Funknetze)
- Ausfallsicherheit
- Technologische Entwicklung
- Verfügbarkeit notwendiger Technologien 3 Punkte
- Technologie Entwicklung Quantencomputer
- 5G Infrastruktur
- Fortschritte im Bereich Fahrzeug-Vernetzung und Sensorik
- Echtzeit Informationen Digitale Karten
- Mensch-Maschine Schnittstelle 5 Punkte
- Digitalisierung – Applifizierung
- Userfreundlichkeit
- Sprachinterface KI-AI
- Problem Mischverkehr fahrerlos / konventionell
- Flottenmanagement 3 Punkte
- Multi-Use von Fahrzeugen
- Beladung Güterverkehr
- Energiemanagement 2 Punkte
- Fahrerlose Reichweite
- Neue Batteriegenerationen (Gewicht, Reichweite, Kosten)
- Ladeinfrastruktur
- Neue Energie

4.1.5.4 Gesellschaft

- Was passiert mit Bewohnern von Randgebieten / dem ländlichen Raum
- Trägheit/Beharrungsvermögen (Stadt / Verkehr)
- Leidenschaft Auto (Produkt, Fahrgefühl) 1 Punkt
- Tourismus / Dienstreisen
- Kommunikation z.B. Zwischenmenschlich aber auch Mensch-Maschine, Maschine-Menschen 2 Punkte
- Arbeitslosenquote durch Digitalisierung „Gesellschaftliche Akzeptanz“
- Rolle des Autos auf der Straße, im Stadtbild
- Roboterkultur – Auto als Roboter
- Wertentwicklung „Soziale Gerechtigkeit“
- Erlebnis von Fahrsicherheit in autom./autonom. Fahrzeugen 2 Punkte
- Raumstrukturelle Trennung von Wohnort und Arbeitsplatz 3 Punkte
- Individualisierung 1 Punkt
- Haushaltgröße (Struktur, Verteilung)

PAVE

- Seamless Experience (Relax, Work, Entertain) 1 Punkt
- Wertewandel Mobility on Demand, Sharing Services (Privatbesitz Fahrzeug vs. Verfügbare Mobilität on Demand) 2 Punkte
- Offenheit ggü. Neuer Technologie (Akteure, Firmen)
- Innovationsfreundlichkeit vs. Maschinenstürmertum
- Akzeptanz autonomer Fahrzeuge (Security, Safety) 2 Punkte
- Vertrauen in Datenschutz 1 Punkt
- Bevölkerungsentwicklung (Zusammensetzung, Alter) 3 Punkte
- Kaufkraftentwicklung, Konsumverhalten 4 Punkte
- Bedürfnisentwicklung Rentner
- Digital natives vs. Analoge Menschen (Ausschluss von Benachteiligung)
- Kosten der Pkw Nutzung privat / shared 2 Punkte
- Haushaltsorganisation Eigenfertigung / Fremdbezug (Einkaufen, Mahlzeiten, Mobilität)
- Wirtschaftsentwicklung Haushaltseinkommen Mobilitätsbudget (auch zeitl.)
- Stau – Fahren macht dann keinen Spaß
- Erhöhte Mobilitätsnachfrage durch neue Technologien 3 Punkte
- Mobilitätsbedürfnis (Verkehrsleistung / -aufkommen) 5 Punkte
- Neue Teilnehmer in der Mobilität

4.1.5.5 *Ökologie*

- Nachhaltigkeit vereinbar mit steigender Mobilität 5 Punkte
- Anzahl vermiedener Fahrten vs. Zusätzliche Fahrten auf Grund neuer Möglichkeiten
- Emissionsproblematik (CO₂, NO_x, ppm)
- Lärm
- Flächennutzung (Flächenkreislaufwirtschaft) 1 Punkt
- Urbanisierung / Metropolisierung

4.1.5.6 *Urbane Regulation*

- Nutzungsbeschränkungen für automat. / autonome Fahrzeuge 5 Punkte
- Einfahrtsbeschränkungen für Verbrennungsmotoren, privat genutzte Fahrzeuge, nicht automatisierte Fahrzeuge
- Mega City Entwicklung Stadt als City-Zentrum, Siedlungsstruktur 2 Punkte
- Kommunale Rahmenbedingungen öffentlicher Verkehr 4 Punkte
- Integration ÖV und Individualverkehr
- Kommunale Strategie Verkehr
- Politische Akzeptanz von privatwirtschaftlichen Sharing Lösungen (Paratransit)
- ÖV-Angebote 3 Punkte

PAVE

- Netzabdeckung U-/S-Bahn Dichte
- Verfügbarkeit Verkehrsmittel 1 Punkt
- Regulation der Lieferverkehre 3 Punkte
- Organisation der Wirtschaftsverkehre
- Ausstattung von Ampeln mit V2X 1 Punkt
- Reglementierungen unabgestimmte Lieferverkehre
- Road Pricing Einfluss auf IV, Mobility Services 2 Punkte
- Fahrkosten durch Politik
- Monopolisierung des Verkehrsmarktes (eine App für alles) 1 Punkt
- Ruhender Verkehr 2 Punkte

Die Faktoren, die in der Bewertung Punkte erhalten haben, werden für die weiteren Analysen verwendet.

4.1.6 Faktorenbewertung & -Auswertung

Für die Faktorenbewertung wurden alle Faktoren gewählt, die im Workshop zuvor Punkte erhalten haben. Damit geht der Szenarioprozess in seine dritte Phase der Analyse der Schlüsselfaktoren. Durch diesen Schritt können die Faktoren kategorisiert werden (in Deskriptoren, Prämissen und unkritische Faktoren).

Die Kategorisierung wurde nach der *Uncertainty-Impact-Analyse* (Intuitive Logics) durchgeführt.

Abgefragt wurde in Bezug auf die Unsicherheit: „Wie unsicher ist die Entwicklung des Umfeldfaktors bis 2028/2035?“.

In Bezug auf den Einfluss wurde gefragt: „Welchen Einfluss hat der Umfeldfaktor auf die Fragestellung 2028/2035?“.

Die Ergebnisse der Teilnehmer wurden konsolidiert, um ein Gesamtergebnis aus allen Teilnehmern zu erhalten und die Faktoren einordnen zu können (Deskriptoren, Prämissen und Unkritische Faktoren). Faktoren die einen Einfluss von 1,5 oder mehr haben einen überdurchschnittlichen Einfluss auf die Fragestellung bzw. die Zukunft und werden als Deskriptoren bezeichnet. Diese werden im weiteren Verlauf genauer Betrachtet und sind zentral für die Erstellung der Szenarien. Faktoren mit einer Unsicherheit von weniger als 1,5 und einem Einfluss von über 1,5 können als Prämissen angesehen werden.

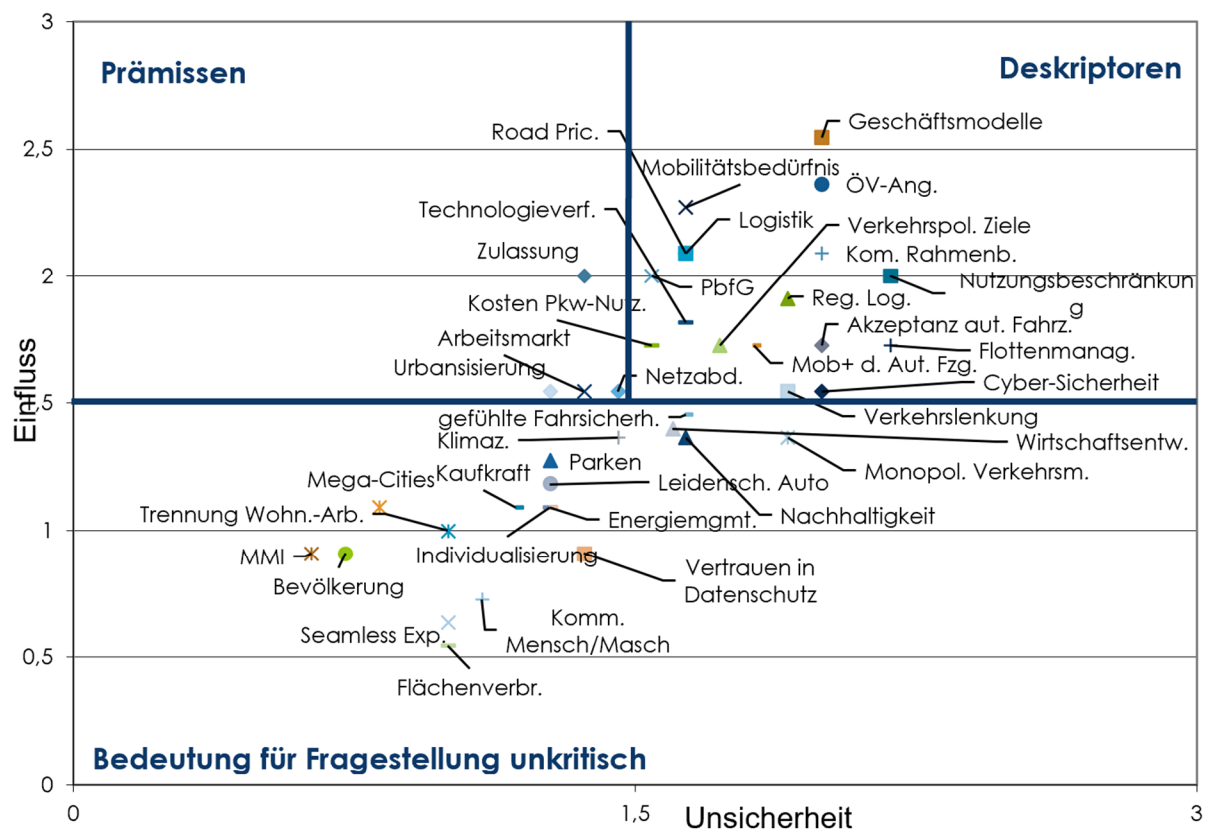


Abbildung 16: Graphische Auswertung der Bewertungen UI

PAVE

Nach Konsolidierung der Ergebnisse ergab sich folgende graphische Auswertung:

Deskriptoren	Nr.	Umfeldfaktor	Unsicherheit	Einfluss	Rang
Wirtschaft	1	Geschäftsmodelle: Wie kann man als Betreiber Geld verdienen ? Business Cases, neue Player am Markt	2,00	2,55	1
Urbane Reg.	15	ÖV-Angebote (Verfügbarkeit / Netzabdeckung, Qualität, Kosten ggf. neue Services)	2,00	2,36	2
Gesellschaft	5	Mobilitätsbedürfnis Personen und Güter (Verkehrsleistung- / -aufkommen / Multimodalität)	1,64	2,27	3
Urbane Reg.	8	Kommunale Rahmenbedingungen für Verkehr und öffentlicher Verkehr (Lenkungsmaßnahmen für den Personen- und Güterverkehr)	2,00	2,09	4
Wirtschaft	7	Logistik Konzepte, Einzelhandel, Mini-Hubs, letzte Meile	1,64	2,09	5
Urbane Reg.	20	Road Pricing Einfluss auf IV, Mobility Services (subsummiert alle Kosten der Mobilität/km)	1,64	2,09	6
Urbane Reg.	3	Nutzungsbeschränkungen & rechtliche Rahmenbedingungen für automatische / autonome Fahrzeuge	2,18	2,00	7
Politik	13	Rechtlicher Rahmen Öffentlicher Nahverkehr (PbfG, Konzessionen im Kontext automatisches Fahren)	1,55	2,00	8
Politik	2	Zulassung von Technologien (Sicherheit)	1,36	2,00	9
Urbane Reg.	12	Regulation der Lieferverkehre	1,91	1,91	10
Technologie	10	Verfügbarkeit notwendiger Technologien im Bereich AVF	1,64	1,82	11
Technologie	16	Flottenmanagement (Multi-Use Fahrzeuge, Beladung Güterverkehr)	2,18	1,73	12
Gesellschaft	28	Akzeptanz autonomer Fahrzeuge (Security, Safety, Ethik Diskussion, Haftungsregelung)	2,00	1,73	13
Gesellschaft	17	Erhöhte Mobilitätsnachfrage durch neue Technologien	1,82	1,73	14
Politik/Recht	30	Verkehrspolitische Ziele (Visionen, Zielsetzung, Bundespolitik, Kommunen)	1,73	1,73	15
Gesellschaft	18	Kosten der Pkw Nutzung privat / shared	1,55	1,73	16
Technologie	11	Sicherheit (Cyber-Sec, Safety & Security, Datensicherheit, Netzsicherheit)	2,00	1,55	17
Urbane Reg.	38	Verkehrslenkung Ausstattung von Ampeln mit V2X, Intelligente Verkehrssteuerung & Infrastruktur)	1,91	1,55	18
Urbane Reg.	19	Verfügbarkeit Verkehrsmittel / Netzabdeckung	1,45	1,55	19
Wirtschaft	22	Arbeitsmarkt (Ort d. Tätigkeit, Arbeitsmodelle, Arbeitsplatz) aber auch Fahrermangel (Zuverlässigkeit, Kosten)	1,36	1,55	20
Urbane Reg.	37	Urbanisierung / Metropolisierung, Siedlungsstruktur, Randgebiete, ländlicher Raum	1,27	1,55	21
Prämissen					
Gesellschaft	26	Erlebnis von Fahrsicherheit in automatischen /autonomen Fahrzeugen	1,64	1,45	
Wirtschaft	39	Wirtschaftsentwicklung, Haushaltseinkommen Mobilitätsbudget (auch zeitl.)	1,60	1,40	
Urbane Reg.	32	Monopolisierung des Verkehrsmarktes (eine App für alles)	1,91	1,36	
Ökologie	4	Nachhaltigkeit vereinbar mit steigender Mobilität	1,64	1,36	
Unterkritische Bedeutung für die Fragestellung					
Politik/Recht	34	Klimaziele (Gefahren erleben durch Klima-Konfusion)	1,45	1,36	
Urbane Reg.	21	Ruhender Verkehr, Parkraumbewirtschaftung und -beschränkungen)	1,27	1,27	
Gesellschaft	33	Leidenschaft Auto (Produkt, Fahrgefühl, Spaß, Besitzen vs. Nutzen)	1,27	1,18	
Technologie	27	Energiemanagement	1,27	1,09	
Gesellschaft	35	Individualisierung (Gesellschaftliche Trends und Wertsysteme)	1,27	1,09	
Gesellschaft	9	Kaufkraftentwicklung, Konsumverhalten Mobilitätsbudget (monetär u. zeitl.)	1,18	1,09	
Urbane Reg.	23	Mega City Entwicklung Stadt als City-Zentrum, Siedlungsstruktur	0,82	1,09	
Gesellschaft	14	Raumstrukturelle Trennung von Wohnort und Arbeitsplatz	1,00	1,00	
Technologie	6	Mensch-Maschine Schnittstelle, Digitalisierung, Applifizierung	0,64	0,91	
Gesellschaft	24	Bevölkerungsentwicklung (Zusammensetzung, Alter)	0,73	0,91	
Gesellschaft	29	Vertrauen in Datenschutz	1,36	0,91	
Gesellschaft	25	Kommunikation z.B. Zwischenmenschlich aber auch Mensch-Maschine, Maschine-Menschen	1,09	0,73	
Gesellschaft	31	Seamless Experience (Relax, Work, Entertain)	1,00	0,64	
Ökologie	36	Flächennutzung (Flächenkreislaufwirtschaft)	1,00	0,55	

Tabelle 4: Ergebnistabelle zur Bewertung der Faktoren

PAVE

In Tabelle 4 ist die graphische Auswertung noch einmal ausführlich und übersichtlich tabellarisch dargestellt. So kann festgestellt werden, welche Faktoren besonders kritisch sind. Beispielsweise der Punkt ‚Geschäftsmodelle: Wie kann der Betreiber Geld verdienen?‘ hat den größten Einfluss und gleichzeitig eine hohe Unsicherheit.

Im nächsten Schritt werden die Deskriptoren näher beschrieben bzw. definiert und es werden für jeden jeweils zwei mögliche Ausprägungen in der Zukunft herausgearbeitet.

4.1.6.1 Deskriptoren-Beschreibung

Nachdem im Schritt zuvor Faktoren aussortiert wurden, die für die Fragestellung unkritisch sind, liegt der Fokus nun auf den kritischen Faktoren, den Deskriptoren bzw. Schlüsselfaktoren. Diese wurden zunächst näher definiert, um ein gemeinsames Verständnis der Deskriptoren zu schaffen. Zusätzlich wurden für jeden Deskriptor jeweils zwei Ausprägungen formuliert, wie dieser sich in der Zukunft entwickeln wird. Dabei wurde mit den zwei Zeithorizonten 2028 und 2035 gearbeitet.

Die Ausprägungen dienen als Grundlage dafür, im Anschluss die Szenarien zu entwickeln, indem in jedem Szenario die Ausprägungen der Deskriptoren unterschiedlich miteinander kombiniert werden. Die Deskriptoren-Beschreibungen bilden quasi das Skelett für die Ausgestaltung der Szenarien. Auch dies wurde in einem Gruppenprozess durchgeführt, um ebenfalls wieder intuitive-kreative Aspekte nutzen zu können.

4.1.6.1.1 Geschäftsmodelle Personenverkehr (1a)

Mit diesem Deskriptor ist gemeint, ob es wirtschaftlich für einzelne Akteure möglich ist Angebote mit AVF (Automatisierten-Vernetzten-Fahrzeuge) darzustellen und wie die Geschäftsmodelle dazu aussehen.

Deskriptorenausprägung 1 – 2028

ÖPNV Anbieter wie die BVG (Berliner Verkehrsbetriebe) können die AVF als Erschließung für neue Wohngebiete als Busersatz nutzen. Dadurch werden die Fahrzeuggrößen (Gefäßgrößen) kleiner und die Strecken individualisieren sich.

Deskriptorenausprägung 1 – 2035

ÖPNV Anbieter sind weiter aktiv, der Angebotsbereich weitet sich auch in die urbanen Randbereiche aus und das Angebot wird kundenindividueller.

Deskriptorenausprägung 2 – 2028

Der ÖPNV bietet weiterhin massenverkehrswirksame Verkehre an. Private Anbieter bieten Sammeltaxitouren und wenn technisch möglich auch individuelle Routen.

Deskriptorenausprägung 2 – 2035

Der ÖPNV bietet weiterhin massenverkehrswirksame Verkehre an. Hoch individualisierte autonome Verkehre sind möglich und bezahlbar, Geschäftsmodelle sind damit gewinnbringend möglich. Daraus entstehen Angebote für Sammeltaxis und individuelle Robotaxis.

PAVE

4.1.6.1.2 Geschäftsmodelle schwerer Lieferverkehr (1b)

Mit diesem Deskriptor ist gemeint, ob es wirtschaftlich für einzelne Akteure möglich ist Angebote mit AVF darzustellen und wie die Geschäftsmodelle dazu aussehen. In diesem Fall wird dabei der urbane Lieferverkehr betrachtet. Weitere Effekte des Wirtschaftsverkehrs werden im Personenverkehr gesehen bzw. für „Handwerker“ wurde eine Prämisse gebildet.

Deskriptorenausprägung 1 – 2028

Logistikanwendungen nur auf privatem Gelände wirtschaftlich darstellbar, technisch wäre es aber machbar (siehe Personenverkehr)

Deskriptorenausprägung 1 – 2035

Fahrerlose Verkehre nur zwischen definierten Versendern und Empfängern und auf definierten Routen (B2B) wirtschaftlich darstellbar.

Deskriptorenausprägung 2 – 2028

Technologieaffine und kapitalstarke Unternehmen bieten auf definierten Routen fahrerlose Verkehre an (B2B).

Deskriptorenausprägung 2 – 2028

Konsolidierung der Logistikanbieter auf wenige große technologieaffine kapitalstarke Anbieter (z.B. OEM, Amazon & Schenker). Vollautomatische Logistikkette vom Versender bis zum Empfänger oder einem Übergabepunkt (B2C & B2B) optimiert nach UseCases wirtschaftlich möglich.

4.1.6.1.3 Zulassung von Technologien (Sicherheit) (2)

Bei diesem Deskriptor geht es um die ethischen Bedenken und datenschutztechnischen Hindernisse sowie Fragen der Netzabdeckung, die die Zulassung von Technologien behindern. Der Schutz vor Hackerattacken und Haftungsfragen müssen noch geklärt werden. Beschreiben werden technische und zivilrechtliche Voraussetzungen zur Zulassung. Diese können auch räumlich und zeitlich beschränkt werden.

Deskriptorenausprägung 1 – 2028

Ethische Fragen und Haftungsfragen sind noch nicht ausreichend geklärt, um eine flächendeckende Zulassung zu ermöglichen.

Deskriptorenausprägung 1 – 2035

Sehr restriktive Zulassungsvoraussetzungen bestimmen die technologische Entwicklung. Die Fahrzeuge haben hohe Anforderungen an die Infrastruktur und dürfen sich nur langsam bewegen. Zulassung von AVF Systemen erfolgt auf eine bestimmte Strecke und ist sehr restriktiv.

Deskriptorenausprägung 2 – 2028

Eine Typzulassung mit geringen oder moderaten Anforderungen an die Infrastruktur erlaubt einen schnellen Einsatz von Fahrzeugen in unterschiedlichen UseCases.

PAVE

Deskriptorenausprägung 2 – 2035

Eine hohe Standardisierung der Technologien ermöglicht eine hohe Durchdringung mit Fahrzeugen.

4.1.6.1.4 Regulative Nutzungsbeschränkungen (3)

Regulative Nutzungsbeschränkungen umfassen Gesetze und Verordnungen zur Freigabe und Lenkung automatisierter / autonomer Verkehrsangebote. Die Nutzungsbeschränkungen zielen vorwiegend von Liefer- und Mobilitätsservices. Private Nutzer sind davon weitgehend unberührt.

Deskriptorenausprägung 1 – 2028

Fahrerlose Fahrzeuge werden nur auf ausgewählten Strecken oder Flächen zugelassen. Die Anzahl der Lizenzen für gewerbliche Anbieter ist begrenzt. Fahrerlose Fahrzeuge für den Individualverkehr kommen praktisch nicht vor, da die Fahrzeuge noch von einer Infrastruktur abhängig sind.

Deskriptorenausprägung 1 – 2035

Die Anzahl der Fahrzeuge im kommunalen Raum hat so stark zugenommen, dass Zulassungen eingeschränkt werden (räumlich, zeitlich, Anzahl der Zulassungen). Kollektive Verkehrsanbieter werden weniger stark diskriminiert.

Deskriptorenausprägung 2 – 2028

Alle Anbieter fahrerloser Fahrzeuge bekommen Konzessionen für alle Gebiete. Die Anzahl der Teilnehmer erfordert noch keine Regulierung

Deskriptorenausprägung 2 – 2035

Fahrerlos fahrende Fahrzeuge (Stufe 5) übernehmen den Lieferverkehr und Teile des ÖV im kommunalen Raum. Einschränkungen können durch die Kommune nicht durchgesetzt werden, auch nicht für den Individualverkehr.

4.1.6.1.5 Mobilitätsbedürfnis von Personen (5a)

Bei diesem Deskriptor geht es um die Frage, ob sich das Mobilitätsbedürfnis der Personen hin zu individuellem oder kollektivem Verkehr entwickelt (bzw. öffentlich vs. privat). Zurzeit gibt es eine ausgeprägte individuelle Mobilität mit einem Trend zur kollektiven Mobilität bei bestimmten Personen.

Deskriptorenausprägung 1 – 2028

Es herrscht ein hoher Wunsch nach selbstbestimmter individueller Mobilität und Fahrspaß. Dazu wird entweder das eigene Fahrzeug genutzt und oder mit geteilten Fahrzeugen je nach Fahrtzweck.

Deskriptorenausprägung 1 – 2035

Es herrscht ein hoher Wunsch nach selbstbestimmter individueller Mobilität zu günstigen Preisen. Genutzt werden dazu die verfügbaren Technologien.

PAVE

Deskriptorenausprägung 2 – 2028

Es herrscht ein hoher Wunsch nach umweltfreundlicher, effizienter und kostengünstiger Mobilität. Daher gibt es mehr Nachfrage nach u.a. multimodaler und kollektiver Mobilität (Bike, RideSharing, pooling, CarSharing) bei zurückgehendem Individualverkehr.

Deskriptorenausprägung 2 – 2035

Die individuelle Mobilität wurde komplett zugunsten umweltfreundlicher, kostengünstiger und kollektiver Mobilität (zeitlich und finanziell optimiert) aufgegeben. Güter und Personen werden gemeinsam befördert bzw. transportiert.

4.1.6.1.6 Mobilitätsbedürfnis Güter (5b)

Es gibt ein Bedürfnis der Versender und Empfänger bezüglich Liefergeschwindigkeit, -kosten, -zuverlässigkeit und -planbarkeit (definierte Anlieferungsfenster).

Deskriptorenausprägung 1 – 2028

Es gibt zunehmende individuelle Anforderungen bezüglich der Qualität, also Schnelligkeit und Planbarkeit.

Deskriptorenausprägung 1 – 2035

Es gibt weiter zunehmende individuelle Anforderungen bezüglich der Qualität (Schnelligkeit & Planbarkeit) und Flexibilität (spontan auf Kundenwünsche reagieren).

Deskriptorenausprägung 2 – 2028

Es gibt zunehmende Anforderungen bezüglich kostengünstiger Services. Es wird eine zeitliche und räumliche Konsolidierung von Lieferanten durch „Bento Boxen“ vorgenommen.

Deskriptorenausprägung 2 – 2035

Es wird auf Qualität verzichtet, um das Bedürfnis nach kostengünstigen Services zu befriedigen. Der Güterverkehr wird auf wenige Lieferanten konsolidiert. Eventuell zusätzlich ein organisatorisches reguliertes Monopol.

4.1.6.1.7 Logistikkonzepte leichte Lieferverkehre KEP (7)

Bei diesem Deskriptor geht es um Logistikkonzepte, den Einzelhandel, Mini-Hubs und die letzte Meile. KEP bedeutet Kurier- Express- & Paketdienste.

Deskriptorenausprägung 1 – 2028

Pakete werden weiterhin standardmäßig konventionell gefahren, aber die Abladepunkte sind in Packstationen und oder Paketshops konsolidiert.

Deskriptorenausprägung 1 – 2035

Selbstfahrende Packstationen liefern die Pakete bis in den Nahbereich der Kunden.

PAVE

Deskriptorenausprägung 2 – 2028

AVF erreichen zentrale Mini-Hubs. Die letzte Meile wird dann von Paketzustellern überwunden (Lastenrad o.ä.).

Deskriptorenausprägung 2 – 2035

Drohnen / Roboter übernehmen die Zustellung auf der letzten Meile von dezentralen Nano-Hubs zu den Endkunden (B2B & B2C). Die Nano-Hubs werden von AVF bedient.

4.1.6.1.8 Kommunale Lenkungsmaßnahmen (8)

Durch diesen Deskriptor werden kommunale Rahmenbedingungen für Verkehr und ÖPNV bestimmt, also Lenkungsmaßnahmen für Personen- und Güterverkehr.

Deskriptorenausprägung 1 – 2028

Erhaltung des Status-Quo, also die Fortführung aktueller Restriktionen wie der Umweltzone oder Parkraumbewirtschaftung. Nur der klassische ÖPNV erhält eine Subvention für kollektive Verkehre.

Deskriptorenausprägung 1 – 2035

Eine weitere leichte Verschärfung hat stattgefunden, die Subventionen für den kollektiven Verkehr bleiben konstant.

Deskriptorenausprägung 2 – 2028

Eine restriktive Steuerung wurde implementiert, um den Straßenverkehr einzuschränken. Dazu wurden eine City-Maut eingeführt, die Parkmöglichkeiten eingeschränkt, Straßenland in nicht Autostraße umgewidmet, Tempo 30 auf das gesamte Straßennetz ausgeweitet (außer überörtliche Straßen) und der Lieferverkehr beschränkt durch Beschränkung von Lieferzeitfenstern und Quartierspeditionen (Ausschreibung von Zustellbezirken). Private Betreiber kollektiver Verkehre haben sich für Subventionen im Rahmen bestimmter Regeln qualifiziert.

Deskriptorenausprägung 2 – 2035

Wie Ausprägung in 2028 nur verschärft.

Deskriptorenausprägung 2 – Wild Card

Zentrale Steuerung des Verkehrs zugunsten eines Gesamtoptimums, durch Begrenzung der Fahrzeuganzahl, Restriktionen auf Zeitslots und Vorgabe von Routen.

4.1.6.1.9 Verfügbare Technologien AVF (10)

Dieser Deskriptor beschreibt die Verfügbarkeit notwendiger Technologien im Bereich der AVF, also Sensoren, Kommunikation, Algorithmen, Rechenleistung, Batterien, Karten, Verkehrslage, Absicherung des automatisierten Fahrens und standardisierte Testumgebung zur Zulassung.

PAVE

Deskriptorenausprägung 1 – 2028

Bestimmte Technologien (z.B. Künstliche Intelligenz) liefern keine stabilen (zulassungsfähigen) Ergebnisse für das automatisierte Fahren. Dazu fehlt auch noch die notwendige Rechenleistung, sodass fahrerloses Fahren nur eingeschränkt möglich ist.

Deskriptorenausprägung 1 – 2035

Durch Bereitstellung von Umgebungsinfrastruktur können Einschränkungen im Fahrzeug überbrückt werden. Fahrerloses Fahren in Teilnetzen ist möglich, setzt aber BackUp Technologien voraus, die teuer sind. Die Technologien stehen nur in dezidierten Korridoren zur Verfügung.

Deskriptorenausprägung 2 – 2028

Die relevanten Fahrzeugtechnologien stehen zur Verfügung. Die notwendige Umgebungsinfrastruktur (Karten, Kommunikation & Verkehrslage) steht in größeren Innenstadtbereichen zur Verfügung, also im Zentrum, in Hauptverkehrskorridoren und im Hauptstraßennetz.

Deskriptorenausprägung 2 – 2035

Die relevanten Technologien stehen zur Verfügung und die notwendige Infrastruktur ist zumindest im urbanen Raum flächendeckend vorhanden. Fahrzeuge können sich frei fahrerlos im urbanen Raum bewegen.

4.1.6.1.10 Multi-Use Fahrzeuge (16)

Mit diesem Deskriptor soll geklärt werden, welche Rolle Fahrzeuge spielen, die für Personen- und Güterverkehr genutzt werden können.

Deskriptorenausprägung 1 – 2028

Personen- und Lieferverkehr sind strikt getrennt, gegebenenfalls kann es gemeinsame Fahrzeugplattformen geben, die sich im Betrieb aber nicht vermischen.

Deskriptorenausprägung 1 – 2035

Gleiche Ausprägung wie 2028

Deskriptorenausprägung 2 – 2028

Die Fahrzeuge können sowohl Personen als auch im begrenzten Umfang Güter transportieren. Eine Umrüstung ist dafür weder erforderlich noch möglich. Der Umschlag erfolgt dabei nach wie vor durch den Menschen. Grundsätzlich ist B2B möglich, aber B2C Belieferungen sind nur eingeschränkt möglich.

Deskriptorenausprägung 2 – 2035

AVF sind selbstfahrende Fahrgestelle, die innerhalb weniger Minuten den Aufbau tauschen können. Die Fahrzeuge werden über eine Vermieterplattform zentral verwaltet. Personen- und Güterverkehr Betreiber verteilen ihre Aufträge dynamisch auf Basis ihrer eigenen Systeme und mieten Fahrzeuge nach Bedarf von Vermieterplattformen.

PAVE

4.1.6.1.11 Mobilitätsnachfrage (Personen & Güter) (17)

Dieser Deskriptor beschreibt das Verkehrsaufkommen (Anzahl an Fahrten, Lieferungen, etc.), die Verkehrsleistung und Fahrleistung. Angenommen wird, eine voranschreitende Urbanisierung, Bevölkerungsentwicklung (demografischer Wandel), Verfügbarkeit neuer Technologien und zunehmende Digitalisierung.

Deskriptorenausprägung 1 – 2028 & 2035

Moderater Anstieg der Personen- und Güterverkehrsnachfrage, also eine Trendfortschreibung (Extrapolation) oder sogar unterhalb der Trends.

Deskriptorenausprägung 2 – 2028 & 2035

Ein starker Anstieg der Personen- und Güterverkehrsnachfrage, aufgrund geringer Kosten, Unabhängigkeit von Führerschein und Auto und Zeitgewinn durch wegfallenden Parksuchverkehr.

Deskriptorenausprägung 2 – Wild Card

Eine Energiekrise 2031 führt zu einem Einbruch der Energieversorgung, da es keine alternativen Energieträger gibt. Dies führt zu einem Zusammenbruch des Verkehrsangebots.

4.1.6.1.12 Nutzerkosten privater bzw. geteilter Fahrzeuge (18)

Dieser Deskriptor beschreibt die monetären Nutzerkosten privater bzw. geteilter Fahrzeuge und vergleicht dabei die Kosten für die Nutzung eines eigenen privaten PKW mit On-Demand Mobilitätskonzepten. Aktuell ist die intensive Nutzung von On-Demand Mobilitätskonzepten teurer als die Benutzung eines privat vorgehaltenen PKW.

Deskriptorenausprägung 1 – 2028 & 2035

Nutzerkosten für fahrerlose geteilte Fahrzeuge liegen weit unterhalb derer für individuell genutzte PKW, sowie anderer Dienste wie z.B. klassisches CarSharing oder Taxi. ÖPNV bleibt unter diesen Kosten.

Deskriptorenausprägung 2 – 2028 & 2035

Aus verschiedenen Gründen liegen die Nutzerkosten für geteilte autonome Fahrzeuge ungefähr auf dem heutigen Niveau von Taxis und CarSharing und damit deutlich über den Verbundpreisen des ÖPNV.

4.1.6.1.13 Arbeitsmarkt (22)

Dieser Deskriptor beschreibt den Arbeitsmarkt und den Fahrermangel, der sich auf Zuverlässigkeit und Kosten auswirkt bzw. auswirken kann.

Deskriptorenausprägung 1 – 2028 & 2035

Eine Verlangsamung der wirtschaftlichen Entwicklung und die Freisetzung vieler Arbeitskräfte aus anderen Branchen durch Digitalisierung übt starken Druck auf halböffentliche ÖPNV Betreiber aus Fahrerarbeitsplätze zu erhalten (Maschinenstürmer).

PAVE

Deskriptorenausprägung 2 – 2028 & 2035

Ein insgesamt prosperierender Arbeitsmarkt führt zu einer wachsenden Knappheit von Fahrpersonal und allgemein von Arbeitskräften. Dies übt einen spürbaren Druck auf Betreiber aus Strecken zu automatisieren, um den Fahrplan zu stabilisieren.

4.1.6.1.14 Akzeptanz autonomer Fahrzeuge (28)

Dieser Deskriptor beschreibt, ob Personen bereit sind mit fahrerlosen Fahrzeugen mitzufahren.

Deskriptorenausprägung 1 – 2028 & 2035

Fahrerlose Fahrzeuge werden von der breiten Masse im Individualverkehr abgelehnt, aufgrund von Sicherheitsbedenken, Datenschutzaspekten, geringeren Geschwindigkeiten und hohen Kosten. Anwendungen von AVF im ÖPNV und Güterverkehr werden eher akzeptiert.

Deskriptorenausprägung 2 – 2028 & 2035

Autonome Fahrzeuge werden von der breiten Masse akzeptiert, da die Technik und Sensorik zuverlässig ist, Vertrauen in den Datenschutz herrscht, der Komfort hoch ist, völlig neue Mobilitätsformen angeboten werden, etc.

4.1.6.1.15 Verkehrspolitische Ziele (30)

Mit diesem Deskriptor sind die Visionen und Zielsetzungen auf bundespolitischer und kommunaler Ebene in Bezug auf die Verkehrspolitik gemeint. Diese Ziele umfassen diese drei Bereiche: Erhaltung der Funktionsfähigkeit, Stadtverträglichkeit und Reduzierung von Umweltbeeinträchtigungen im Straßenverkehr.

Deskriptorenausprägung 1 – 2028

Reduzierung von Umweltbeeinträchtigungen im Straßenverkehr, durch eine verstärkte Förderung und Ausbau des öffentlichen Verkehrsnetzes und der Fahrradinfrastruktur. Förderung lokaler emissionsfreier Antriebssysteme und Maßnahmen zur Erhöhung der Bündelungseffekte im Personen- und Warenverkehr.

Deskriptorenausprägung 1 – 2035

Stadtverträglicher Umbau der Verkehrsinfrastruktur, durch z.B. Rückbau von Parkflächen, Umwidmungen und Rückbau von Fahrstreifen zugunsten des Umweltverbundes des Lieferverkehrs. Erzwungene Partnerschaft von KEP-Anbietern.

Deskriptorenausprägung 2 – 2028

Erhaltung der Funktionsfähigkeit des (Straßen-) Verkehrs, Status-Quo wird fortgesetzt. Keine verkehrspolitischen Maßnahmen, die den individuellen Verkehr und den Lieferverkehr einschränken.

Deskriptorenausprägung 2 – 2035

Erhalt und Ausbau der bestehenden Straßeninfrastruktur (A100). Erhalt der Funktionsfähigkeit durch Optimierung der Verkehrsflüsse durch die Verkehrsmanagementzentrale (VMZ).

PAVE

4.1.6.1.16 Urbanisierung (37)

Dieser Deskriptor beschreibt die Urbane und suburbane Entwicklung.

Deskriptorenausprägung 1 – 2028

Die Siedlungsstruktur bleibt weitgehend unverändert. Die neuen Mobilitätsangebote konzentrieren sich auf den Bereich innerhalb des S-Bahnringes, analog zu bisherigen CarSharing Betreibern, da nur hier ein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist.

Deskriptorenausprägung 1 – 2035

Ausweitung des Angebots auf angrenzende Gebiete ist möglich. Aufgrund der hohen Preisgestaltung werden diese Angebote seltener genutzt und haben daher weniger Auswirkungen auf die Siedlungsflächenentwicklung.

Deskriptorenausprägung 2 – 2028

Es entstehen neue Angebotskonzepte für die Anbindung an die städtischen (Rand-) Gebiete. Vor allem konzentrieren sich diese neuen Angebote auf neu entstehende Wohn- und Gewerbegebiete.

Deskriptorenausprägung 2 – 2035

Ein verstärkter Trend zur Suburbanisierung aufgrund der Angebotsvielfalt autonomer Systeme verändert städtische Siedlungsstrukturen insbesondere auch schlecht angebundene Wohn- und Gewerbegebiete profitieren dadurch, des Weiteren wird der Immobilienmarkt im Stadtzentrum entlastet.

4.1.6.1.17 Intelligente Verkehrssteuerung & Infrastruktur (38)

Die Vernetzung von Verkehrszeit-, Infrastruktur- und Fahrzeugdaten sowie Mobilitätsdaten ist die Voraussetzung für eine intelligente Verkehrssteuerung.

Deskriptorenausprägung 1 – 2028

Fehlende Standards erschweren die Harmonisierung und gemeinsame Nutzung der Verkehrsdaten. Es existieren bisher parallele, meist Herstellerabhängige Kommunikationssysteme (proprietäre Systeme).

Deskriptorenausprägung 1 – 2035

Durch Marktkonsolidierung entstehen gemeinsame genutzte Standards, die eine durchgängige Kommunikation ermöglichen.

Deskriptorenausprägung 2 – 2028

Teilweise Vernetzung der Informationen, aber keine zentrale Steuerung möglich. Informationen haben Empfehlungscharakter.

Deskriptorenausprägung 2 – 2035

Zentrale Steuerung sämtlicher verfügbarer Informationen zur Optimierung der Verkehrsflüsse und Bevorrechtigung ausgewählter Fahrzeuge. Berlin ist flächendeckend mit intelligenten Ampelsystemen ausgestattet.

4.1.6.2 Szenariogerüst

Auf Grundlage der entwickelten möglichen Deskriptorenausprägungen wurden diese so miteinander kombiniert, um daraus möglichst konsistente Szenariogerüste zu erhalten. Dabei sollten Szenarien entstehen, die sich klar voneinander differenzieren lassen, aber trotzdem stichhaltig sind. Als Ergebnis kamen fünf Szenariogerüste heraus, wobei eines davon (Szenario 1) eine Abbildung des Status Quo darstellt. Dieses dient zum Vergleich zu den anderen Szenarien und wird im weiteren Verlauf nicht so intensiv betrachtet, wie die anderen Szenarien. Das Ergebnis der Szenariogerüst-Generierung ist in LLLL dargestellt. Es wurde sich auf vier (neue) Szenarien beschränkt, um noch eine sinnvolle Unterscheidung und Interpretation sicherstellen zu können und damit der Prozess handhabbar bleibt.

Wie in der Tabelle zu sehen ist, wurde der Deskriptor ‚Mobilitätsnachfrage (Personen & Güter) (17)‘ herausgenommen, da er im Diskussionsprozess aussortiert wurde. Dafür wurden zwei neue Faktoren aufgenommen, die die Experten für zentral halten. Dies sind die Faktoren ‚Durch neue Technologien induzierte Personenverkehr-Nachfrage‘ und ‚Durch neue Technologien indizierte KEP-Nachfrage‘ aus dem Umfeld ‚Technologie/ Wirtschaft/ Gesellschaft‘. Die Zahl vor der Ausprägung in der Tabelle bezieht sich jeweils auf die entsprechende Ausprägung des Deskriptors, wie sie im vorangegangenen Kapitel beschrieben sind.

			Status Quo Restriktiv	Das schöne individuelle Szenario	Güterverkehr-Szenario	Das schöne kollektive Szenario	AVFIV Personenverkehr-Szenario	
			Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5	Umfeld
#	1a	Geschäftsmodelle Personenverkehr	1 öffentliche	2 Alle Fahren	1 öffentliche	2 Alle Fahren	2 Alle Fahren	Wirtschaft
	1b	Geschäftsmodelle schwere Lieferverkehre	1 KMU-bieten AVF	2 Kap. Techn. Unt.	2 Kap. Techn. Unt.	2 Kap. Techn. Unt.	1 KMU-bieten AVF	Wirtschaft
#	5a	Mobilitätsbedürfnis von Personen	2 kollektiv	1 individuell	1 individuell	2 kollektiv	1 individuell	Gesellschaft
	5b	Mobilitätsbedürfnis von Gütern	2 Kosten	1 Qualität	2 Kosten	2 Kosten	2 Kosten	Wirtschaft
*	8	Kommunale Lenkungsmaßnahmen	2 Starke Steuerung	2 Starke Steuerung	1 Status Quo	2 Starke Steuerung	2 Starke Steuerung	Urbane Regulation
	7	Logistikkonzepte leichte Lieferverkehre	1 Packstation	2 Drohnen	1 Packstation	1 Packstation	1 Packstation	Wirtschaft
(#)	3	Regulative Nutzungsbeschränkungen	1 Restriktiv	2 Konzession für alle	1 Restriktiv	2 Konzession für alle	1 Restriktiv	Urbane Regulation
*	2	Zulassung von Technologien	1 Restriktiv	2 Typ-zulassung	2 Typ-zulassung	2 Typ-zulassung	2 Typ-zulassung	Politik
*	10	Verfügbarkeit Technologien AVF	1 Rudimentär	2 Techn. Verfügbar	2 Techn. Verfügbar	2 Techn. Verfügbar	2 Techn. Verfügbar	Technologie
	16	Multi-Use Fahrzeuge	1 Trennung	2 Multi-Use	1 Trennung	2 Multi Use	1 Trennung	Wirtschaft/ Technologie
	28	Akzeptanz autonomer Fahrzeuge	1 Ablehnung	2 Akzeptanz	1 Ablehnung	2 Akzeptanz	2 Akzeptanz	Gesellschaft
	30	Verkehrspolitische Ziele	2 Status Quo	1 Progressiv	2 Status Quo	1 Progressiv	1 Progressiv	Politik
	18	Nutzerkosten privater und geteilter Pkw	1 AVF günstig	1 AVF günstig	2 Kosten hoch	1 AVF günstig	2 Kosten hoch	Gesellschaft/ Wirtschaft
*	38	Intelligente Verkehrssteuerung und Infrastruktur	1 Fehlende Standards	2 Vernetzung	2 Vernetzung	2 Vernetzung	2 Vernetzung	Urbane Regulation
*	22	Arbeitsmarkt	1 schwache Entw	2 Prosperierend	2 Prosperierend	2 Prosperierend	2 Prosperierend	Wirtschaft/ Gesellschaft
*	37	Urbanisierung	1 unverändert	2 Suburbanisierung	1 unverändert	2 Suburbanisierung	2 Suburbanisierung	Urbane Regulation
	neu	Durch neue Technologien induzierte PV Nachfrage	1 moderat	2 starke Zunahme	1 moderat	2 starke Zunahme	2 starke Zunahme	Technologie/Wirtschaft/Gesellschaft
	neu	Durch neue Technologien indizierte KEP Nachfrage	1 moderat	2 Zunahme	2 Zunahme	1 moderat	1 moderat	Technologie/Wirtschaft/Gesellschaft
	17	Mobilitätsnachfrage Personen+Güter						
Legende:			#	= Mögliche Szenarioachse	*			= Mögliche Prämisse

Tabelle 5: Übersicht der Szenariogerüste

PAVE

Die Szenarien 2 – 5 wurden dann für den weiteren Szenarioprozess verwendet und werden im Folgenden noch einmal kurz dargestellt und zusammengefasst.

Szenario 2 – das schöne individuelle Szenario (anything goes)

- RoboTaxi à mehrere Anbieter
 - Konzentration auf individuellen Verkehr (insbesondere Premium)
- MultiUse Fahrzeuge
- Verkehrssteuerung dezentral
- Geplante Ankunftszeit
- Delivery-Agent

Szenario 3 – Güterverkehrsszenario (Smart Robo City)

- RoboVan à One Load Einheiten
- Keine RoboTaxis
- AVF nur in ÖPNV und Logistik (nicht PV)
- Konzessionierte Liefergebiete
- Mobile Packstationen (Bento Box)
 - Flächen Logistikprozesse optimiert und atomatisiert
- Letzte-Meile-Dienstleistungen (inklusive in-house logistics)

Szenario 4 – das schöne kollektive Szenario

- RoboTaxi à insbesondere RideSharing
- Innenstadtbereich gesperrt für private PKWs
- AVF im ÖPNC: Linienverkehr
- Dynamischer Delivery-Agent
- Multi-Use Fahrzeuge

Szenario 5 – AVFIV (Automatisierte vernetzte Fahrzeuge – individual Verkehr)

- Slotbasierte Verkehrssteuerung
- Robotaxis (on-demand)
 - Premium, Standard & RideSharing
 - Schnittstellen & Bündelung in MiniHubs
- Fahrplanbasierter ÖPNV
- Private Mobilitätsbörsen (passende Versicherungen)
- UNIROB (gewerbliches AVF à Plattformkonzept, schnell wechselbarer Aufbau)

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden zu jedem Szenario Storys entwickelt (entspricht der normativ-narrativen Szenariotechnik). Diese sollen das jeweilige Szenario veranschaulichen und so transparent, verständlich und konkret vorstellbar machen für alle Beteiligten oder auch externe Personen. Dieser

PAVE

Schritt fand auch in Gruppen statt, um sich gegenseitig anzuregen und sich interdisziplinär und interinstitutionell austauschen zu können.

4.1.6.3 Szenariostorys

4.1.6.3.1 Szenario 2 – das schöne individuelle Szenario

Ein Tag im Leben von Kurt

Kurt wohnt am Rand von Berlin in einem neuen Neubaugebiet. Die Neubaugebiete wurden bereits bei der Planung mit neuen Mobilitätsangeboten und Technologien geplant und gebaut – das war für ihn ein wichtiger Grund an diesen Ort zu ziehen. Das konnte er nur deshalb tun, da er am Hackeschen Markt arbeitet und diese neuen Wohngebiete exzellent mit neuen AVF vernetzt sind.

Er nutzt für seinen Arbeitsweg ein D2D Shuttle in dem er schon auf dem Weg anfangen kann zu arbeiten – er würde am liebsten immer alleine fahren, aber das ist ihm für jeden Tag zu teuer – andererseits steigt sowieso nicht immer jemand zu. An Tagen mit wichtigen Telekonferenzen bucht er sich einfach ein exklusives Blacklane Fahrzeug, den Aufpreis zahlt die Firma und die Vertraulichkeit ist trotzdem gewährleistet.

Gern nutzt er das Feature „Garantierte Ankunftszeit“ Der Aufpreis ist gering und wird bei Meetings von der Firma übernommen. Bei diesem Feature sind Mitfahrer noch seltener was ihm sehr angenehm ist. Die Firma refinanziert diese zusätzlichen Kosten durch den kompletten Wegfall von Dienstwagen und Parkplätzen im Innenstadtbereich.

Ein Wermutstropfen ist, dass seine neue Wohnung soweit vom Hackeschen Markt entfernt ist. Auf Grund des Staus durch die vielen neuen AVF Shuttle kann es so schon mal bis zu einer Stunde dauern, bis er bei der Arbeit ist. An guten Tagen würden auch 30 Minuten reichen – die gibt es aber nur zwischen Weihnacht und Neujahr, wenn alle im Urlaub sind. Wenn es dann gar nicht mehr vorangeht, nutzt er auch schon mal die S-Bahn ab Jungfernheide.

Der einzige Nachteil seines Wohnortes ist, dass die Einkaufsinfrastruktur nicht mitgewachsen ist. Shopping ist daher nur im Internet so richtig möglich. Dafür ist die Wohnung zustelloptimal eingerichtet mit Multi Warenschleuse und Drohnenanflugschneise. Er liebt die Zustellung bis an die Haustür, insbesondere da mit der neuen Wohnung der lästige Marsch zur Packstation entfällt und er stattdessen früher auf das geliebte Laufband kann.

Kurt ist sehr sportlich. Montags, mittwochs und samstags fährt er mit dem Shuttle in die Tanzfabrik in Kreuzberg. Da hat er früher gewohnt. Eigentlich ist es jetzt zu weit, aber er nutzt die Zeit mit seiner neuen Flirtapp, mit der aus dem Fahrzeug heraus neue Partner kennen lernen kann. Damit ist die Zeit gut genutzt und er gut unterhalten. Er schaut jetzt auch schon nach einem Fitnessstudio in Lichterfelde, damit er noch ein bisschen unterwegs sein kann.

4.1.6.3.2 Szenario 3 – GüterverkehrszENARIO (Smart Robo City)

Die Story: Buchsendung in der „Smart Robo City“

Frau Schnabelspinner aus Kreuzberg bestellt für ihre Tochter, die gerade ihr Abitur gemacht hat, bei Amazon ein Buch mit dem Titel „Jetzt fängt das Leben an“. Das Buch soll am nächsten Tag da sein.

PAVE

1. *Güterverteilzentrum (Robo HUB)*

Die Buchsendung ist in der Nacht per Robo-Truck (-Schiff/-Bahn) im vollautomatisierten Güterverteilzentrum^{4*} am Westhafen angekommen. Dort wird die Tageslieferung für das Zielgebiet automatisch kommissioniert (ggf. in einem Baukastenregalsystem, mit wiederverwertbaren Untereinheiten) und in einem elektrischen autonom fahrenden Robo Van intelligent verstaute. Das Baukastenregalsystem ermöglicht größere Lieferungen für ein Ziel zusammenzufassen oder für mehrere Ziele aufzusplitten. Die Robo Vans werden mit „One-Load-Einheiten“ bestückt, die für KEP-Verkehr und B2B Warenverkehr optimiert sind (siehe VisionVAN).

Die wenigen Transportanbieter (Logistikunternehmen, KEP-ler), die aufgrund von Kostendruck und staatlicher Regulierung den Markt unter sich aufteilen, erwerben Konzessionen für definierte Zielgebiete. Damit soll die Anzahl der Fahrten im Stadtgebiet minimiert werden. Das Fahrzeugdepot der autonomen Robo Vans und -Trucks befindet sich ebenfalls im oder in der Nähe des Güterverteilzentrums, wo die Fahrzeuge gereinigt, geladen und ggf. gewartet und instandgehalten werden.

2. *MicroHubs*

Der Robo Van hat definierte Zeitfenster für Versender und Empfänger und bewegt sich auf definierten Routen zum innerstädtischen „Micro-Hub“, Standort des Geschäftskunden, oder zum Bento Box Parkplatz. Zur Optimierung der Warenflüsse sind die Fahrzeuge, Baukastenelemente und Pakete vernetzt, sie kommunizieren mit der Infrastruktur (sowohl V2X, V2V) und werden zentral gesteuert. Es gibt Bevorrechtigungen (z.B. Fahren auf der Busspur) für autonome Fahrzeuge.

3. *Letzte Meile*

Das Buch kann nun auf drei verschiedenen Wegen in den Besitz von Frau Schnabelspinner gelangen. Sie hat die Möglichkeit sich per App für einen Lieferweg zu entscheiden:

- a) Das Buch wird auf einen als Bento-Box fungierenden Hänger geladen, der hinten am Robo-Van hängt. Parkplätze für die mobilen Paketstationen befinden sich auf Tankstellengeländen, Parkhäusern, Eingangsbereichen von Bürozentren, Verwaltungsgebäuden (z.B. Sarotti-Höfe, Rathaus Schöneberg, Charlottenburg) oder in Laufdistanz in Wohngebieten. Der BentoBox Anhänger mit dem Buch wird am frühen Morgen vor ihrem Bürozentrum abgestellt.
- b) Das Buch kann sie aber auch optional an „konventionelle“ Packstationen z.B. Spätis oder Poststationen liefern kostenneutral lassen.
- c) Für einen Aufpreis kann sie das Buch auch zu sich nach Hause liefern lassen. Diese Feinverteilung erfolgt überwiegend noch mit menschlichem Personal per Transporter oder Fahrradkurier. (Idee: „Umweltaufpreismodell“; Fairer Preis für faire Arbeit)

Zwar gibt es nach wie vor die Möglichkeit der individuellen Zustellung an die Haustür, diese kostet aber mehr für sie, als Berufstätige ist es praktisch und kostengünstig, Sendungen im Paketspäti oder in der Bento-Box abzuholen. Aufgrund der Konsolidierung der Anbieter werden Lieferungen an Privathaushalte auf einmal täglich reduziert (Ausschreibung von Zustellbezirken;

⁴ Die größeren innerstädtische HUBs können auch nach dem „Les Chapelle Konzept“ als Logistik Hotel angelegt sein als sog. innerstädtisches Logistikterminal. (Bahn-, Wasser- und Straßenanbindung) z. B. auf dem Westhafengelände an der Spree.

PAVE

„Quartierspeditionen“), es sei denn der Lieferpreis spielt keine Rolle. Aber dann kostet die Lieferung fast so viel wie das Buch selbst.

Die Familie Schnabelspinner kennt nun seit ein paar Jahren die fahrerlosen Logistikfahrzeuge und ist positiv Ihnen gegenüber aufgeschlossen, da Sie bemerken, dass viel weniger Fahrzeuge als früher auf den Straßen zu sehen sind. Die Fahrzeuge bewegen sich sicher und kommunizieren über Licht und Geräusche mit den Menschen, die sich ihnen nähern. Über eine intuitive App auf dem Smartphone ist jederzeit einzusehen, wo sich bestellte Pakete befinden und es ist möglich Anpassungen der Liefervariante und –zeit vorzunehmen. Die Robo Vans werden auch vermehrt im B2B Warenverkehr genutzt, insbesondere bei standardisierten täglichen Lieferungen, wo die Annahme durch autorisierte Mitarbeiter durchgeführt wird. (Bspw. Versorgung von Werkstätten, Warenlieferungen, Apothekenversorgung)

Ausblick 2035 – auch die letzte Meile zum Endkunden wird autonom realisiert. (Bspw. Über standardisierte abstellbare „Hausboxen“ oder „Delivery Dogs“)

4.1.6.3.3 Szenario 4 – das schöne kollektive Szenario

Alex wohnt in einem neuen Stadtquartier vor den Toren Berlins. Seine Tochter Anna wird um 7:20 Uhr, wie die meisten anderen Kinder, von einem privaten Anbieter für fahrerloses Ride-Sharing zur Schule abgeholt. Alex fährt wenig später um 7:30 Uhr ebenfalls mit einem Ride-Sharing Anbieter zu Hause los. Er ist begeistert von den neuen, umweltfreundlichen und kostengünstigen Ride-Sharing Angeboten. Außerdem freut er sich über den morgendlichen Austausch mit den regelmäßigen Mitfahrern aus seiner Nachbarschaft welche er nun auch häufiger in seiner Freizeit trifft und somit als neue Freunde gewinnen konnte. Auch der konventionelle ältere Herr, welcher gelegentlich mit im Fahrzeug sitzt und seine Zeitung liest, wird von Alex als sympathisch wahrgenommen. Nach der kurzen Fahrt im Shuttle steigt er in die S-Bahn um, welche ihn zügig und direkt zu seiner Arbeitsstelle in Treptow bringt.

Durch den effektiven Ausbau des ÖPNV und der Einbindung von autonomen Fahrzeugen und Elektrorädern/ e-Scootern für die letzte Meile zur Haustür, stört es ihn nicht das politisch die privaten Fahrzeuge aus den urbanen Gebieten verbannt wurden. Im Gegenteil, er freut sich über die neu gewonnenen Grünflächen und Straßencafés welche an Stelle der grauen Parkflächen entstanden sind. Die in der Innenstadt lebenden Haushalte haben sich überwiegend dazu entschieden auf ihr privates Fahrzeug zu verzichten. Andere parken ihre Fahrzeuge in speziell eingerichteten Parkhäusern am „Stadtrand“.

In der Mittagspause bringt Alex ein Lieferdienst seine Lunch-Box direkt in das Büro. Mit dem gleichen Fahrzeug wird auch die Pizza seines Kollegen geliefert. Währenddessen tauscht eine selbstfahrende Lafette den leeren Packstationscontainer in seiner Wohngegend durch einen vollen Container, in dem sich auch eine Paketlieferung für Alex befindet.

Um 15 Uhr teilt Alex's Chef ihm mit, dass er heute Überstunden machen muss. Daher kann Alex seine Tochter nicht wie geplant um 16 Uhr von der Schule abholen, um mit ihr ins Schwimmbad zu gehen. Also bestellt er spontan ein RoboTaxi, welches seine Tochter von der Schule sicher zu den Großeltern bringt.

Als Alex um 18 Uhr mit der Arbeit fertig ist, fährt er mit der S-Bahn zur Wohnung der Großeltern, um seine Tochter abzuholen. Dort angekommen müssen sie auch nicht lange auf ihre RideSharing-Mitfahrgelegenheit warten, welche sie ohne viele Umwege nach Hause bringt. Bevor sie in ihre Wohnung gehen, holt Alex noch seine Paketlieferung von der Packstation.

PAVE

Am Abend sitzt Alex in seinem Wohnzimmer und macht sich Gedanken über den kommenden Urlaub im Schwarzwald. Er stellt sich die Frage, ob er den neuen langstrecken on-demand Schlaf-Shuttle-Bus ausprobieren soll. So würden er und seine Tochter komfortabel und ohne Umsteigen über Nacht zum Ziel kommen, ohne eine umständliche Bahnfahrt mit mehrmaligem Umsteigen auf sich nehmen zu müssen.

4.1.6.3.4 Szenario 5 – AVFIV

(Automatisierte vernetzte Fahrzeuge – individual Verkehr)

Montag 7.53 Uhr

Alexa: Du bist drei Minuten zu spät. In 7 Minuten kommt die Business Cab, Alternative? Paul: Ja.
Alexa: Die ÖV Cab erreichst Du in 12 Minuten, Ankunftszeit 8.45 gegenüber 8.35 mit der Business Cab. Paul: Wenn ich schon den Service teuer bezahle, könnte ich mir auch noch einen Snack in der Cab leisten. Alexa, wann ist der nächste Business Slot? Alexa: In 27 Minuten, Ankunft 9.02. Paul: Die Business Cabs sind toll, komfortabel, schnell und mit Büroarbeitsplatz. Aber teuer und das Angebot hat Lücken, besonders morgens. Alexa, Business Cab stornieren, die nächste 2er ÖV Cab. Alexa: OK - jetzt musst du los. Paul geht zur ÖV Cab, gleich um die Ecke seiner Straße. Die Cab erkennt ihn und öffnet die Tür. In der Cab trifft er seinen Kollegen Marcel. Begrüßung. Paul: Fährst Du öfter um diese Zeit, dann könnten wir auch mit meinem Wagen fahren. Wir bekommen als double Passenger den gleichen Slot wie mit dem ÖV. Marcel: Aber ohne Parkplatz müssen wir neben der Citymaut die Leerfahrt teuer bezahlen, oder gibst Du deinen Wagen zur ÖV Nutzung frei. Paul: Auf gar keinen Fall. Marcel: Außerdem fahren wir abends doch meist zu unterschiedlichen Zeiten. Heute Abend muss ich noch in den Baumarkt, da nehme ich nach Hause einen Robovan. Paul: Ich muss heute auch noch zur Paketstation. Marcel: Wir lassen uns relativ selten unsere paar Bestellungen in die Paketstation liefern. Bei uns im Haus wohnt eine ältere Frau, die ihre Bestellungen mit Boten bekommt. Das zahlt die Pflegeversicherung. Über die bestellen wir ab und zu – das muss aber unter uns bleiben. Paul: Und dass macht die? Marcel: Dadurch ist ein fast freundschaftliches Verhältnis entstanden, auch mit unseren Kindern. Paul: Ja, der wirkliche Luxus wäre ein Firmenparkplatz, aber die sind bis auf 2 betriebsnotwendige Plätze gestrichen worden. Marcel: Ich habe auch Riding probiert, dafür musst du aber Zeit mitbringen. Die Fahrzeit ist klar länger, sie haben aber mehr Slots und sind billiger. Paul: Den ÖPNV kann man von uns aus vergessen. Allein das Umsteigen ist mühsam, es gibt viel zu wenig Halteplätze für die ÖV Cabs an den S-Bahnhaltestellen. Meistens musst du stehen und bis du abends am Bahnhof deine Cab hast, kannst du fast nach Hause laufen. Marcel: Das Gute an den Mobilitätsdiensten ist, dass meine Frau den Wagen tagsüber hat. Paul: Meine nutzt unser Auto kaum noch, die Kinder werden mit der Kinderlogistik zu ihren Aktivitäten gebracht. Einkaufen läuft super über ALEXA, nur Kochen kann sie noch nicht – nur Anweisungen geben. Auf unser Auto wollen wir nicht verzichten, schon wegen der Urlaubsfahrten. Es ist eben doch trotz aller Einschränkungen ein bisschen Freiheit und Privatheit. Früher haben wir den Kinderwagen drin gelassen, heute die Fahrräder und Krimskrams. Marcel: Braucht ihr denn die Fahrräder nicht täglich, wo es jetzt ein so schönes Radwegenetz gibt. Paul: Mit den neuen Mobilitätsdiensten gibt das gar keinen Sinn. Die Räder nutzen wir nur in der Freizeit, zum Sport oder für Familienausflüge. (ÖV Cab: Ziel in 2 min erreicht) Marcel: Eins muss man ihnen lassen, zuverlässig und pünktlich sind sie mit ihrem Verkehrssteuerungssystem. Und heute hält sie wenigstens direkt vor dem Eingang.

4.1.7 Use Case Steckbriefe

In diesen Workshops wurden zu den einzelnen Szenarien UseCases entwickelt, die in Steckbriefen erklärt werden. Diese UseCases erklären und definieren einzelne Bestandteile des Szenarios genauer und zeigen die Grenzen auf, die die bisherige Betrachtung noch hat. So können möglich notwendige Optimierungen entdeckt und geklärt werden, was noch zu tun ist. Dies hilft die Szenarien final auszugestalten, damit diese für die weitere Projektarbeit genutzt werden können. Die Ergebnisse dazu sind im Folgenden eingefügt.

4.1.7.1 Szenario 2 das schöne individuelle Szenario

Problembeschreibung <ul style="list-style-type: none"> • Kunden: Bedürfnis nach möglichst günstiger Fortbewegung (d.h. Haltepunkt zu Haltepunkt wobei beliebiges Teilen – ohne Umwege toleriert wird) • Wunsch nach berechenbarer Fahrzeit und kurzen Wartezeiten und optimierten Umsteigemöglichkeiten • Insgesamt Wunsch nach einer kostengünstigen Mobilitätslösung im Umfang des heutigen ÖPNV 	Stakeholder <ul style="list-style-type: none"> • Private und öffentliche Verkehrsunternehmen (BVG, DB, Flixbus möglw. In Zukunft ergänzt um Google, Uber...) • Kunden: Alle Bevölkerungsschichten • Ausbildungsverkehre 	Offene Fragen, Risiken & Painpoints <ul style="list-style-type: none"> • Wie verändern sich die Subventionen im ÖV vor dem Hintergrund der gesunkenen Kosten (freier ÖV) • Wie wird ein Zusammenbruch durch Überlastung mit Robotaxis des Verkehrssystems verhindert? • Welche Wechselanreize/ Restriktionen im Verhältnis zum Individualverkehr gibt es?
Beschreibung der Lösung <ul style="list-style-type: none"> • Fahrerlose Fahrzeuge fahren im Linienverkehr ähnlich heutiger Busse nach Fahrplan in Randzeiten on demand • Die Fahrzeuge sind massenverkehrstauglich im Sinne von Sitz- und Stehplätzen - die Größe ist so nicht zu bestimmen und sollte ein Modellierungsergebnis sein • Um die zentrale Planung zu optimieren können Fahrtwünsche per App übergeben werden und die Fahrzeuge können so auch Haltepunkte überfahren oder in Randzeiten individuell fahren und halten (entlang der Linie) 	Erwartete Potentiale (allgemein) <ul style="list-style-type: none"> • Aus Unternehmenssicht <ul style="list-style-type: none"> • Bedienung großer Bevölkerungsanteile im urbanen Raum • Aus Kundensicht <ul style="list-style-type: none"> • Günstigster Service und etwas kürzerer Vor- und Nachlauf, • Aus gesellschaftlicher Sicht (für das Verkehrssystem) <ul style="list-style-type: none"> • Interessant um höhere Anteile vom IV in kollektive Verkehre dazu zu gewinnen – bietet auch Services in Randzeiten effizient an 	

Abbildung 17: UseCase 2.1 AVF im ÖPNV

Problembeschreibung <ul style="list-style-type: none"> • Kunden: Bedürfnis nach möglichst individueller günstiger Fortbewegung (d.h. Anspruch an Tür zu Tür, eingeschränktes Teilen der Strecke und Wunsch nach einem ansprechenden aber kostengünstigen Interieur und Exterieur des Fahrzeugs) • Wunsch nach berechenbarer Fahrzeit und nicht zu großen Umwegen durch das Teilen der Strecke • Insgesamt Wunsch nach einer kostengünstigen Mobilitätslösung im Umfang des heutigen ÖPNV 	Stakeholder <ul style="list-style-type: none"> • Private und öffentliche Verkehrsunternehmen (BVG, Google, Uber, DB, Flixbus) • Kunden: Alle Bevölkerungsschichten, Privatkunden, Firmenshuttle, • Ausbildungsverkehre 	Offene Fragen, Risiken & Painpoints <ul style="list-style-type: none"> • Wie sieht die preisliche Einordnung von Premium und Standard Robotaxi • Wie wird ein Zusammenbruch durch Überlastung mit Robotaxis des Verkehrssystems verhindert? • Welche Wechselanreize/Restriktionen im Verhältnis zum Individualverkehr gibt es?
Beschreibung der Lösung <ul style="list-style-type: none"> • Standard RoboTaxis sind ähnlich den bekannten fahrerlosen Shuttle von Navya, Easy Mile alternative Konzepte könnten auch aussehen wie heutige Transporter oder Großraum Pkw • Sie werden individuell über eine App o.ä. (vor) bestellt • Es gibt verschiedene private / halböffentliche und öffentliche Anbieter • Die Systeme sind eher Haltepunktbasiert und insbesondere am Anfang des Szenariozeitraums an Routen gebunden 	Erwartete Potentiale (allgemein) <ul style="list-style-type: none"> • Aus Unternehmenssicht <ul style="list-style-type: none"> • Bedienung großer Bevölkerungsanteile im urbanen Raum • Aus Kundensicht <ul style="list-style-type: none"> • Günstiger Service mit einem Zugewinn an Komfort durch Zeitgewinn, weniger Umsteigevorgänge und kürzerer Vor- und Nachlauf, kleinere Gefäße • Aus gesellschaftlicher Sicht (für das Verkehrssystem) <ul style="list-style-type: none"> • Interessant um höhere Anteile vom IV in kollektive Verkehre dazu zu gewinnen 	

Abbildung 18: UseCase 2.2 RoboTaxi Standard

Problembeschreibung <ul style="list-style-type: none"> • Kunden: Ein hohes Bedürfnis an individueller Fortbewegung (d.h. Anspruch an Tür zu Tür, kein Teilen der Strecke und hohe Anspruch an Interieur und Exterieur des Fahrzeugs) • Zusätzlich ist eine möglichst genaue Planung der Fahrzeit „Premium“ im Sinne von so spät wie möglich abfahren und trotzdem pünktlich ankommen • Kostenvorteile und privacy sind starke Treiber ggü. konventionellen Taxidiensten 	Stakeholder <ul style="list-style-type: none"> • Private Technologieunternehmen im Bereich der bisherigen premium OEM oder Technologieunternehmen (BMW, MB, Cadillac, Tesla, Apple) • Kunden: Einkommensstarke Bevölkerungsschichten, Geschäftskunden 	Offene Fragen, Risiken & Painpoints <ul style="list-style-type: none"> • Wie sieht die preisliche Einordnung von Premium und Standard Robotaxi • Wie stelle ich garantierte Ankunftszeiten ab: Gibt es freigehaltene Slots? Oder ist die Prognose besser • Wie wird ein Zusammenbruch durch Überlastung mit (Premium) Robotaxis des Verkehrssystems verhindert?
Beschreibung der Lösung <ul style="list-style-type: none"> • Premium RoboTaxis sind ähnlich heutigen luxuriösen Pkw Limousinen • Sie werden individuell über eine App o.ä. (vor) bestellt • Es gibt verschiedene private Anbieter • Es gibt eine Reihe von Möglichkeiten zur Individualisierung (Getränke, Essen, Licht, Musik, Konnektivität) • Garantierte Ankunftszeit ist ein besonders teures Feature – da aufwändig darzustellen • Das Angebot richtet sich in erster Linie an Tür zu Tür Verkehre 	Erwartete Potentiale (allgemein) <ul style="list-style-type: none"> • Aus Unternehmenssicht <ul style="list-style-type: none"> • Bedienung einer zahlungskräftigen Kundenschicht mit klarer Gewinnerzielungsabsicht • Aus Kundensicht <ul style="list-style-type: none"> • Bestser Service im Sinne von höchstem Komfort • Expressiver Konsum / Soziale Differenzierung • Garantierte Reisezeiten bei dem entsprechenden Dienst • Aus gesellschaftlicher Sicht (für das Verkehrssystem) <ul style="list-style-type: none"> • Erheblicher Leerfahrtenanteil (Problematisch) 	

Abbildung 19: UseCase 2.3 RoboTaxi Premium

4.1.7.2 Szenario 3 Güterverkehrsszenario

<p>Problembeschreibung</p> <ul style="list-style-type: none"> • E-Commerce wird in Zukunft weiterwachsen. • Pain Point bei der Belieferung: Übergabe der Sendung • Lieferzeitpunkt und Entgegennahme sind schwer koordinierbar; beide Vertragspartner müssen anwesend sein. (Abholung beim Nachbarn oder entlegene Filiale) • Logistikunternehmen: Fahrermangel, Kostendruck insb. auf der letzten Meile, steigendes Güteraufkommen • Urban: Verkehrsprobleme durch „letzte Meile Lieferverkehr“ (Redundanzen, schlechte Auslastung & Umweltauswirkungen) 	<p>Stakeholder</p> <ul style="list-style-type: none"> • Logistikunternehmen, Lieferservices und KEP'ler • Hersteller • Online-Versandhändler dieser Welt (Amazon, Ebay, Alibaba, Google) • Kunden: Versender und Empfänger • Städte & Kommunen • Verkehrssystem 	<p>Offene Fragen, Risiken & Painpoints</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ausgewiesene Parkplätze für Paketstationen (In- und Outdoor) • Betreibermodell • Timing Markt & Kunden • Fahrzeuggrößen • Infrastruktur & Investitionen • Ladestruktur für Antriebe/ ggf. Kühlung integrieren • Automatisierte Verladung • Autorisierung & Usability
<p>Beschreibung der Lösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Autonom fahrende Packstationen beliefern ein festes Netz von Standplätzen mehrmals täglich. • Die „mobilen Paketboxen“ (Abladestationen) sind standardisiert (Maße, Software, Pins und TANs) und können von allen Logistikunternehmen gegen Gebühr genutzt werden. • Private und kommunale Anbieter stellen definierte Standplätze (z.B. vor öffentlichen Behörden, an Tankstellen, Supermärkten, vor oder in großen Bürogebäuden) zur Verfügung. • Vernetzung & digitale Logistiksteuerung (IT-Systeme, Apps) • Ziel ist es, ein dichtes Netz aufzubauen, das gut erreichbar für den Endkunden ist und autonom beliefert werden kann. 		<p>Erwartete Potentiale (allgemein)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aus Unternehmenssicht <ul style="list-style-type: none"> • Effizienzsteigerung in der Lieferkette • Kosteneinsparungen auf der letzten Meile • Sicherere Zustellung • Aus Kundensicht <ul style="list-style-type: none"> • Kostenreduzierung, Flexibilität • Kurze Wege • Transparenz (Wo befindet sich mein Paket?) • Aus gesellschaftlicher Sicht (für das Verkehrssystem) <ul style="list-style-type: none"> • Geringeres KEP-Verkehrsaufkommen

Abbildung 20: UseCase 3.1 RoboVan

<p>Problembeschreibung</p> <ul style="list-style-type: none"> • E-Commerce wird in Zukunft weiterwachsen. • Pain Point bei der Belieferung: Übergabe der Sendung • Lieferzeitpunkt und Entgegennahme sind schwer koordinierbar; beide Vertragspartner müssen anwesend sein. (Abholung beim Nachbarn oder entlegene Filiale) • Logistikunternehmen: Fahrermangel, Kostendruck insb. auf der letzten Meile, steigendes Güteraufkommen • Urban: Verkehrsprobleme durch „letzte Meile Lieferverkehr“ (Redundanzen, schlechte Auslastung & Umweltauswirkungen) 	<p>Stakeholder</p> <ul style="list-style-type: none"> • Logistikunternehmen, Lieferservices und KEP'ler • Hersteller • Online-Versandhändler dieser Welt (Amazon, Ebay, Alibaba, Google) • Kunden: Versender und Empfänger • Städte & Kommunen • Verkehrssystem 	<p>Offene Fragen, Risiken & Painpoints</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ausgewiesene Parkplätze für Paketstationen (In- und Outdoor) • Betreibermodell • Timing Markt & Kunden • Fahrzeuggrößen • Infrastruktur & Investitionen • Ladestruktur für Antriebe/ ggf. Kühlung integrieren • Automatisierte Verladung • Autorisierung & Usability
<p>Beschreibung der Lösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Autonom fahrende Packstationen beliefern ein festes Netz von Standplätzen mehrmals täglich. • Die „mobilen Paketboxen“ (Abladestationen) sind standardisiert (Maße, Software, Pins und TANs) und können von allen Logistikunternehmen gegen Gebühr genutzt werden. • Private und kommunale Anbieter stellen definierte Standplätze (z.B. vor öffentlichen Behörden, an Tankstellen, Supermärkten, vor oder in großen Bürogebäuden) zur Verfügung. • Vernetzung & digitale Logistiksteuerung (IT-Systeme, Apps) • Ziel ist es, ein dichtes Netz aufzubauen, das gut erreichbar für den Endkunden ist und autonom beliefert werden kann. 		<p>Erwartete Potentiale (allgemein)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aus Unternehmenssicht <ul style="list-style-type: none"> • Effizienzsteigerung in der Lieferkette • Kosteneinsparungen auf der letzten Meile • Sicherere Zustellung • Aus Kundensicht <ul style="list-style-type: none"> • Kostenreduzierung, Flexibilität • Kurze Wege • Transparenz (Wo befindet sich mein Paket?) • Aus gesellschaftlicher Sicht (für das Verkehrssystem) <ul style="list-style-type: none"> • Geringeres KEP-Verkehrsaufkommen

Abbildung 21: UseCase 3.2 Mobile Packstationen

<p>Problembeschreibung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Das Einsammeln von Müll und das Recyceln oder die Wiederverwertung von Mehrwegverpackungen ist eine große Herausforderung für jede Stadt. • Neben den Privatkunden benötigen auch Handel, Gastronomie und Industrie umfangreiche Dienstleistungsangebote zur Entsorgung. 	<p>Stakeholder</p> <ul style="list-style-type: none"> • Städte und Kommunen • Private und städtische Entsorgungsunternehmen • BSR, Alba, Veolia, Bartscherer 	<p>Offene Fragen, Risiken & Pain Points</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ausgewiesene Sammelplätze für die Entsorgungsbehälter (In- und Outdoor) • Investitionen in die Infrastruktur • Timing (Markt, Kunden)
<p>Beschreibung der Lösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Autonom fahrende Fahrzeuge sammeln von festgelegten Standorten Wertstoffe aller Art. • Die Ladungsträger auf den Sammelfahrzeugen zur Entsorgung sind schon heute stark standardisiert. • Automatisierte Entleerung der Papierkörbe im öffentlichen Raum (Straßen, Parks...) 		<p>Erwartete Potentiale (allgemein)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aus Unternehmenssicht <ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung der Reinigungssequenz • Personaleinsparungen • Aus gesellschaftlicher Sicht (für das Verkehrssystem) <ul style="list-style-type: none"> • Reduktion des Mülls im Stadtgebiet

Abbildung 22: UseCase 3.3 Automatisierte Sammler

PAVE

<p>Problembeschreibung</p> <ul style="list-style-type: none"> Die Liberalisierung des Markts hat zu einer Vervielfachung der Anbieter und der Lieferfahrzeuge auf der letzten Meile geführt. Die Vervielfachung der Anbieter verhindert heute eine Konsolidierung der Warenströme. Die unkoordinierten Lieferungen, Parken in der zweiten Reihe und die Vielzahl der Lieferfahrzeuge führen zu einer starken Behinderung des fließenden Verkehrs. 	<p>Stakeholder</p> <ul style="list-style-type: none"> Städte und Kommunen Logistikunternehmen, Lieferservices und KEP'ler Endkunden Amazon, DHL, Hermes, UPS... 	<p>Offene Fragen, Risiken & Pain Points</p> <ul style="list-style-type: none"> Gebietsregelungen durch die Kommune (Vergabe eines Zustellgebiets an Unternehmen, autonom- und elektrisch fahrende Fahrzeuge einsetzen) Pro Gebiet gäbe es nur noch ein oder zwei Anbieter <ul style="list-style-type: none"> Fertigstellung der Technologie
<p>Beschreibung der Lösung</p> <ul style="list-style-type: none"> Autonom und elektrisch fahrende Fahrzeuge werden eingesetzt. Pro Zustellbezirk werden nur ein oder zwei lizenzierte Lieferanten zugelassen. Die unterschiedlichen Anbieter müssten ihre Sendungen konsolidieren 	<p>Erwartete Potentiale (allgemein)</p> <ul style="list-style-type: none"> Aus Unternehmenssicht <ul style="list-style-type: none"> Keine Fahrer mehr nötig Schnellere Zustellung möglich Aus Kundensicht <ul style="list-style-type: none"> Schnellere Zustellung Aus gesellschaftlicher Sicht (für das Verkehrssystem) <ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Lieferfahrzeuge im jeweiligen Bezirk 	

Abbildung 23: UseCase 3.4 Lizenzierte Zustellgebiete

4.1.7.3 Szenario 4 das schöne kollektive Szenario

<p>Problembeschreibung</p> <ul style="list-style-type: none"> Kunden: <ul style="list-style-type: none"> Bedürfnis nach besonders günstiger aber auch individueller Fortbewegung (d.h. Tür zu Massentransport oder Tür zu Tür, uneingeschränktes Teilen der Strecke möglich, längere Fahrzeiten/Umwege werden akzeptiert) Wunsch nach abschätzbarer Fahrzeit und nicht zu großen Umwegen durch das Teilen der Strecke Sehr kostengünstig aufgrund der überwiegend geteilten Nutzung, geringere Kosten als privater PKW (~Standard RoboTaxi) 	<p>Stakeholder</p> <ul style="list-style-type: none"> Siehe RoboTaxi Standard 	<p>Offene Fragen, Risiken & Painpoints</p> <ul style="list-style-type: none"> Wie lange Umwege werden akzeptiert Sollten Anschlussverbindungen sichergestellt sein
<p>Beschreibung der Lösung</p> <ul style="list-style-type: none"> Implementierung eines entsprechenden Systems <ul style="list-style-type: none"> Einfache Äußerung des Mobilitätswunsches (z.B. App) Garantierte Ankunftszeiten ggf. mehrstufig <ul style="list-style-type: none"> Berücksichtigung von realen Verkehrsdaten 	<p>Erwartete Potentiale (allgemein)</p> <ul style="list-style-type: none"> Aus Unternehmenssicht <ul style="list-style-type: none"> Ggf. neues Kundensegment (zwischen ÖPNV und Privat) Potentiell günstiger als ÖPNV (in entsprechenden Gebieten) Aus Kundensicht <ul style="list-style-type: none"> Günstige individuell anpassbare Fortbewegung Aus gesellschaftlicher Sicht (für das Verkehrssystem) <ul style="list-style-type: none"> Wenn akzeptiert, effizientere Nutzung der vorhandenen Verkehrsinfrastruktur Schonung der Umwelt 	

Abbildung 24: UseCase 4.1 - RoboTaxi RideSharing

<p>Problembeschreibung</p> <ul style="list-style-type: none"> Kunden: <ul style="list-style-type: none"> Bedürfnis nach möglichst günstiger Fortbewegung (d.h. Haltepunkt zu Haltepunkt wobei beliebiges Teilen – ohne Umwege toleriert wird) Wunsch nach berechenbarer Fahrzeit und kurzen Wartezeiten und optimierten Umsteigemöglichkeiten Insgesamt Wunsch nach einer kostengünstigen Mobilitätslösung im Umfang des heutigen ÖPNV Einfache und spontane Nutzung bekannter Strecken (allgemeingültiger und bekannter Fahrplan) 	<p>Stakeholder</p> <ul style="list-style-type: none"> Siehe AVF im ÖPNV 	<p>Offene Fragen, Risiken & Painpoints</p> <ul style="list-style-type: none"> Abgrenzung zum UseCase „AVF im ÖPNV“
<p>Beschreibung der Lösung</p> <ul style="list-style-type: none"> Seamless mobility – Ganzheitliches Ökosystem zur Abfrage von Routenplanung und Realisierung der Bezahlung (verkehrsmittelübergreifend) Große und kleine Busse ggf. PKW übernehmen Randgebiete (max. 500m zur nächsten Station) Option welche die Fahrzeugeinsatzplanung unterstützen könnte: Durch Anmeldung von gewünschten Fahrten durch die Kunden soll sichergestellt werden, dass ausreichend große und getaktete Verkehrsmittel zur Verfügung stehen (auch spontane Aufstockungen sollten möglich sein) Ansonsten wird wie bisher (oder smarter) geplant wie viele Fahrzeuge/Kapazitäten für mehr oder weniger regelmäßige (sowie spontane) Kunden benötigt werden 	<p>Erwartete Potentiale (allgemein)</p> <ul style="list-style-type: none"> Aus Unternehmenssicht <ul style="list-style-type: none"> ÖPNV günstiger und hoffentlich beliebter Aus Kundensicht <ul style="list-style-type: none"> Flächendeckende Verfügbarkeit des Linienverkehrs (ÖPNV) Aus gesellschaftlicher Sicht (für das Verkehrssystem) <ul style="list-style-type: none"> Wenn akzeptiert, effizientere Nutzung der vorhanden Verkehrsinfrastruktur Schonung der Umwelt 	

Abbildung 25: UseCase 4.2 - AVF im ÖPNV: Linienverkehr

PAVE

Problembeschreibung <ul style="list-style-type: none"> • Kunden: • Wollen weiterhin mobil sein und die Möglichkeit haben Einkäufe zu erledigen • Ausreichend Mobilitätsangebote um aktuelle private Fahrten zu ersetzen: siehe Linienverkehr und RoboTaxis • Möglichkeit des privaten Fahrzeugs sollte erhalten bleiben (für außerstädtisches Fahren oder als „Hobby“) 	Stakeholder <ul style="list-style-type: none"> • alle 	Offene Fragen, Risiken & Painpoints <ul style="list-style-type: none"> • Lage des Handels ist zu berücksichtigen, ggf. verschwindet dieser aus der Innenstadt • (reiner Wohn-/Dienstleistungsbereich)
Beschreibung der Lösung <ul style="list-style-type: none"> • Ggf. Lieferdienste anbieten um die Familieneinkäufe oder Baumarkt nach Hause zu bringen und/oder es werden spezielle „Einkaufs-RoboTaxis“ angeboten (ggf. das Standard-RoboTaxi) • Möglicherweise (nur) Ausstellungshäuser in der Stadt und Lager am Stadtrand etc., welche nach Bestellung direkt liefern • Biete die Möglichkeit private Fahrzeuge am Stadtrand oder ähnliches abzustellen (ggf. auch in der Mitte mit einer großen Straße in jede Himmelsrichtung ...) 	Erwartete Potentiale (allgemein) <ul style="list-style-type: none"> • Aus Unternehmenssicht <ul style="list-style-type: none"> • Neue Service potentiale, Lieferung in die Stadt nur bei tatsächlichem Bedarf • Aus Kundensicht <ul style="list-style-type: none"> • Schöneres und sauberes Stadtbild • Aus gesellschaftlicher Sicht (für das Verkehrssystem) <ul style="list-style-type: none"> • Freiere Straßen? 	

Abbildung 26: UseCase 4.3 - Innenstadt ohne privaten PKW

Problembeschreibung <ul style="list-style-type: none"> • Zeitlich genaue (vorher geplant) und/oder spontane Bestellungen von Lebensmitteln (ähnlich der heutigen Lieferdienste) • Dabei kostengünstigere Lieferungen aufgrund von Bündelungen verschiedener Lebensmittel Anbieter • Sendungen/Produkte lassen sich in real-time umleiten/erweitern/reduzieren • („RideSharing“ für Express Paket Lieferungen) 	Stakeholder <ul style="list-style-type: none"> • Vorhandene Lieferdienste (DHL, Hermes und Co) • Neue Lieferdienstanbieter mit Fokus auf selbstfahrende Fahrzeuge • Anbieter von Expresslieferungen <ul style="list-style-type: none"> • Jegliche Unternehmen • Restaurants, Bistro, etc. • Kunden: Versender und Empfänger von Gütern 	Offene Fragen, Risiken & Painpoints <ul style="list-style-type: none"> • Wie kann ich Lieferungen abgeben und entgegennehmen? Fahrende Packstation?
Beschreibung der Lösung <ul style="list-style-type: none"> • Ähnlich wie RideSharing nur mit Gütern? • Spezielle Fahrzeuge müssen entwickelt werden <ul style="list-style-type: none"> • Die fahrende Packstation • Möglichkeit verschiedenste Temperaturen zu halten <ul style="list-style-type: none"> • Passiv (Isolation) oder aktiv 	Erwartete Potentiale (allgemein) <ul style="list-style-type: none"> • Aus Unternehmenssicht <ul style="list-style-type: none"> • ... • Aus Kundensicht <ul style="list-style-type: none"> • Zeitgleiche Lieferung von unterschiedlichen Versendern <ul style="list-style-type: none"> • Z.B. Pizza und Subway • Aus gesellschaftlicher Sicht (für das Verkehrssystem) <ul style="list-style-type: none"> • Weniger Verkehr 	

Abbildung 27: UseCase 4.4 - Dynamischer Delivery Agent

Problembeschreibung <ul style="list-style-type: none"> • Logistikunternehmen: Autonome Fahrzeuge sind teuer • Urbane Infrastruktur: Straßen sind kostbar und sollten nicht für leere Fahrzeuge verschwendet werden 	Stakeholder <ul style="list-style-type: none"> • Große Logistikunternehmen • Fahrzeughersteller • Industrie & Handel 	Offene Fragen, Risiken & Painpoints <ul style="list-style-type: none"> • Stationen/Lager für „Behälter/Gefäße“ werden benötigt • Wie soll der Austausch stattfinden <ul style="list-style-type: none"> • Stationär oder ist das Fahrzeug selbst in der Lage
Beschreibung der Lösung <ul style="list-style-type: none"> • Fahrzeuge werden effizienter eingesetzt (da sie ggf. in eine Richtung mit Kunden und in die andere Richtung mit Paketen fahren, bspw. der tägliche Pendelverkehr; morgens: bringe Paketboxen und hole Kunden; Abends: bringe Kunden und nimm Paketboxen wieder mit) 	Erwartete Potentiale (allgemein) <ul style="list-style-type: none"> • Aus Unternehmenssicht <ul style="list-style-type: none"> • Kleinere Fahrzeugflotten benötigt • Selbstfahrende Fahrzeuge könnten insb. zu Beginn teurer sein als herkömmliche Fahrzeuge, durch multi-use erscheinen diese deutlich attraktiver, da ein Fahrzeug mehrere Einsatzmöglichkeiten bietet • Aus Kundensicht <ul style="list-style-type: none"> • Weniger Fahrzeuge unterwegs • Aus gesellschaftlicher Sicht (für das Verkehrssystem) <ul style="list-style-type: none"> • Weniger Fahrzeuge unterwegs 	

Abbildung 28: UseCase 4.5 - Multi-Use Fahrzeuge

4.1.7.4 Szenario 5 AVFIV

(Automatisierte vernetzte Fahrzeuge – individual Verkehr)

<p>Problembeschreibung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nutzen von AVF-Fahrzeugen für Mobilität und Verkehr • Vergleich IV, Mobility on demand und ÖV Heute gegenüber AVF IV, Robotaxi, Ride-Sharing, ÖV nach Nutzen, Kosten, Akzeptanz • Systemuntergrenze • Abschätzung aussichtsreicher Fahrzeugkonzepte, Fzg.Klassen in Verbindung mit Servicelevel von Mobilitätsdienstleistungen 	<p>Stakeholder</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mobilitätsdienstleister, VDV Betriebe • Intermediäre • Hersteller Verkehrstechnik, Systemsoftware • Fahrzeughersteller • Kunden 	<p>Offene Fragen, Risiken & Painpoints</p> <ul style="list-style-type: none"> • Generelle Akzeptanz AVF, Datenschutz • Mobilitäts-/Wegeplanung der Verkehrsteilnehmer • Nutzenfunktionen der Verkehrsteilnehmer • Datenbasis, erf. Detaillierungsgrad • Instrumentarien zur Optimierung unter Unsicherheit <ul style="list-style-type: none"> • Welche Robotaxi-Anbieter gibt (Fahrpreis, Flottengröße)
<p>Beschreibung der Lösung</p> <p>Abschätzung der potentiellen Nachfrage nach AVF-IV und AVF- Mobilitätsdienstleistungen qualitativ und quantitativ</p> <ul style="list-style-type: none"> • Leistungen und Kosten AVF-Konzepte • Empirische Untersuchungen der Anforderungen an AVF-Konzepte • Simulation und Optimierung • Konzepte Benutzeroberfläche für Planung, Durchführung, Dokumentation Wegekett 		<p>Erwartete Potentiale (allgemein)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Marktanteile AVF-Konzepte • Beschreibung aussichtsreicher AVF-Konzepte • Gesamtnutzen Mobilität • Gesamtnutzen Verkehr (Verkehrsvermeidung, Verkehrsverlagerung)

Abbildung 29: UseCase 5.1 - RoboTaxi et al

<p>Problembeschreibung</p> <ul style="list-style-type: none"> • AVF können für die Nutzung durch Dritte freigegeben werden. • Der Besitzer des Fahrzeuges kann Personenkreis, Art und Dauer der Nutzung vorschreiben/vereinbaren. • Rechtsform und Versicherung, • Software zur Organisation, Abrechnung, Dokumentation der Nutzung, Benutzeroberfläche • Besitzer kann als Fahrzeugbetreiber das Fahrzeug in einen Mobilitätsdienst, Intermediär, einbringen (Uber), damit könnte nahezu jede Fahrzeugart, Fahrzeugklasse vermittelt werden 	<p>Stakeholder</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fahrzeugbesitzer, Mobilitätsanbieter • Intermediäre • Hersteller Systemsoftware 	<p>Offene Fragen, Risiken & Painpoints</p> <ul style="list-style-type: none"> • Empirie
<p>Beschreibung der Lösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Empirische Untersuchung über die Bereitschaft das eigene Fahrzeug gegen Bezahlung ausgewählten Dritten zu überlassen, Fahrzeugart, Zeitdauer, Mindesteinnahmen • Bereitschaft von Nutzern, Privatfahrzeuge in Form von Robotaxis zu nutzen, Zahlungsbereitschaft • Alternative Rechtsformen, Versicherungen, Tarifgefüge • Software zur Organisation, Abrechnung, Dokumentation der Nutzung, Benutzeroberfläche • Abschätzung des Marktvolumens nach Fahrzeugart 		<p>Erwartete Potentiale (allgemein)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bewertung Geschäftsmodell • Marktvolumen Σ Einzelunternehmen und/oder Intermediär

Abbildung 30: UseCase 5.2 - private Mobilitätsbörse

<p>Problembeschreibung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die individuelle Massenmobilität führt zu zeitlich, räumlichen Kapazitätsengpässen im Verkehrssystem, die durch Bündelung zu kollektiven Verkehren vermieden werden sollen. • Bündelungen erfordern einen Systemwechsel (Umsteigen) • Systemwechsel werden akzeptiert, wenn dadurch ein höherer Nutzen entsteht (z.B. Bus-Bahn) und die Schnittstelle den reibungslosen Übergang erlaubt. 	<p>Stakeholder</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kommune, Mobilitätsanbieter • Intermediäre • Hersteller Verkehrstechnik, Systemsoftware • Fahrzeughersteller 	<p>Offene Fragen, Risiken & Painpoints</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mengengerüst an sich in den Betrachtungen, Simulationen, Optimierungen des Verkehrssystems/ der Mobilitätskonzepte enthalten. • AVF-Anforderungen an Umsteigepunkten können beispielhaft skizziert und daraus Ideen für Konzepte abgeleitet werden • Direkt vs. Umsteigen (Akzeptanz bei kleineren Fahrzeugen noch umzusteigen)
<p>Beschreibung der Lösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identifikation des bündelungsfähigen Verkehrs • Systeminterne Bündelungsfähigkeit, z.B. AVF-Konvoibildung (dichteres Auffahren), Feederverkehre (alle Fahrzeuggröße) • Systemübergreifendes Integrationskonzept, Optimale Standorte für Systemwechsel (Umsteigepunkte, aus Kunden- und betrieblicher Sicht), organisatorische, technische und wirtschaftliche Voraussetzungen • Zeitlich räumlicher Kapazitätsbedarf der zu integrierenden Mobilitätssysteme, der Umsteigeknoten • Zu- und Ablaufsteuerung zu und von Umsteigepunkten (z.B. Bahnhöfe). • Dimensionierung und Design von Umsteigepunkten <p>Betrachtung: Robotaxi/ Ride-Sharing auf ÖPNV; Robotaxi auf Ride-Sharing (MiniHub)</p>		<p>Erwartete Potentiale (allgemein)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identifikation und Gestaltung von Umsteigepunkten • Neues, effizienteres(?) ÖV-Bedienkonzept

Abbildung 31: UseCase 5.3 - Schnittstellen & MiniHub

PAVE

Problembeschreibung <ul style="list-style-type: none"> • Kapazitätsengpässe zeitlich, räumlich im Verkehrssystem • Vermeidung von Staus, Parksuchverkehr • Garantierte Mobilität für Jedermann • Dynamische Bepreisung 	Stakeholder <ul style="list-style-type: none"> • Kommune, Mobilitätsanbieter • Intermediäre • Hersteller Verkehrstechnik, Systemsoftware • Fahrzeughersteller 	Offene Fragen, Risiken & Painpoints <ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung der Verkehrslage, zentrale Verfügbarkeit Fahrzeugstati • Genaue Verkehrsvorhersagen, Bestehen und zentrale Verfügbarkeit aller Mobilitätspläne • Nutzenfunktionen der Verkehrsteilnehmer • Instrumentarium zur Optimierung unter Unsicherheit • Akzeptanz „planwirtschaftlicher“ Steuerung • Diskriminierung nicht so zahlungsfähiger Personen? • Gilt es für alle oder nur für AVF?
Beschreibung der Lösung <ul style="list-style-type: none"> • Identifikation des Kapazitätsstatus des Verkehrssystems • Optimale Verkehrssteuerung von Verkehrssystemen ohne und mit Kapazitätsengpässen • Benutzeroberfläche für Planung, Durchführung, Dokumentation Wegekettens, Kosten • „Bepreisung“: Sozialverträglichkeit, Modus/Fahrzeugtypabh. • Routingvorschläge vom System mit verschiedenen Preisen. Kunde wählt aus und erhält „Slot“ oder entscheidet sich dagegen und nimmt anderes Verkehrsmittel oder fährt zu anderem Zeitpunkt 		Erwartete Potentiale (allgemein) <ul style="list-style-type: none"> • Deutlich bessere Ausnutzung der vorhandenen Infrastruktur • Verkehrsvermeidung, Verkehrsverlagerung (zeitlich, räumlich), • Individuell beste Mobilitätslösung • Revenue für Infrastrukturbetreiber

Abbildung 32: UseCase 5.4 – Slotmanagement

Problembeschreibung <ul style="list-style-type: none"> • Veränderung der Struktur des Verkehrssystems • Ziele für die Gestaltung von Mobilität und Verkehr • Optimierung des Systems bei gegebenen Mobilitätsnachfragen und Mobilitätsangeboten (AVF-Fahrzeuge und Dienste) • Integration der Verkehrsträger, der Mobilitätskonzepte. Gibt es eine neue Struktur der Bahn- und Bus Linien, der Halte- und Umsteigepunkte. • Anforderungen an Design und Dimensionierung Halte-/Umsteigepunkte 	Stakeholder <ul style="list-style-type: none"> • Verkehrswissenschaft 	Offene Fragen, Risiken & Painpoints <ul style="list-style-type: none"> • Geeignetes Instrumentarium zur simultanen oder sukzessiven Lösung • Datenbasis
Beschreibung der Lösung Kombination/ Integration der untersuchten Use Cases, IDEAL: Simulation und Optimierung des Gesamtsystems MINDESTENS: Qualitative Beschreibung auf Basis einer Argumentation im Sinn einer Kausalkette	Erwartete Potentiale (allgemein) <ul style="list-style-type: none"> • Vision eines automatisierten Verkehrssystems • Erreichbarer Gesamtnutzen (Σ (Nutzen Mobilität u Nutzen Verkehr)) 	

Abbildung 33: UseCase 5.5 - Gesamtsystem / Integration

Problembeschreibung <ul style="list-style-type: none"> • Im gewerblichen Verkehr werden eine Vielzahl von Sonder-/ Spezialfahrzeugen eingesetzt, wobei die Sonderfunktionen häufig nur befristet benötigt werden (Stunden – Saison). • Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch kurzfristige Bereitstellung des erforderlichen Funktionsumfangs • Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch Trennung von Basisfahrzeug und Aufbau 	Stakeholder <ul style="list-style-type: none"> • Gewerbebetriebe, Fahrzeugbesitzer, Fuhrparks • Vermietung, Leasing Gesellschaften • Fahrzeughersteller 	Offene Fragen, Risiken & Painpoints <ul style="list-style-type: none"> • Empirie • Technische Machbarkeit
Beschreibung der Lösung <ul style="list-style-type: none"> • AVF-Universalfahrzeug für den gewerblichen Einsatz, das auf einem Plattformkonzept mit automatisch schnell wechselbarem Aufbau beruht • Empirische Untersuchung über den Bedarf an Sonderfunktionen und Ersatz von Sonderfahrzeugen durch ein Basisfahrzeug mit wechselbaren Auf-, Ein- und Anbauten, Geräteträger, • Wechselaufbau: Packstation, Personenkabine, Manueller Fahrbetrieb, bis 4 Sitzplätze • Zahlungsbereitschaft • Abschätzung des Marktvolumens nach Fahrzeugart/ Funktionen • Geschäftsmodelle, Kauf, Vermietung, Leasing, Kurzzeitmiete 	Erwartete Potentiale (allgemein) <ul style="list-style-type: none"> • Bewertung Geschäftsmodelle • Marktvolumen Σ Einzelfunktionen und Basisfahrzeug 	

Abbildung 34: UseCase 5.6 – UNIROB

4.1.8 Zusammenfassung

Die Szenarien wurden mit einem in sieben Schritte strukturierten Szenarioprozess entwickelt, wobei der Untersuchungsbereich abgegrenzt wurde: räumlich : Berlin, verkehrlich: Personen-, Wirtschafts-, Öffentlicher-, & Güterverkehr und technologisch/organisatorisch: automatisches / autonomes Fahren. Als Zeithorizont wurde 2035+ gesetzt mit einem Zwischenschritt 2028.

Für diesen Untersuchungsraum wurde das Umfeld mit mit sechs Dimensionen beschrieben, für die relevanten Faktoren in Workshops bestimmt wurden.

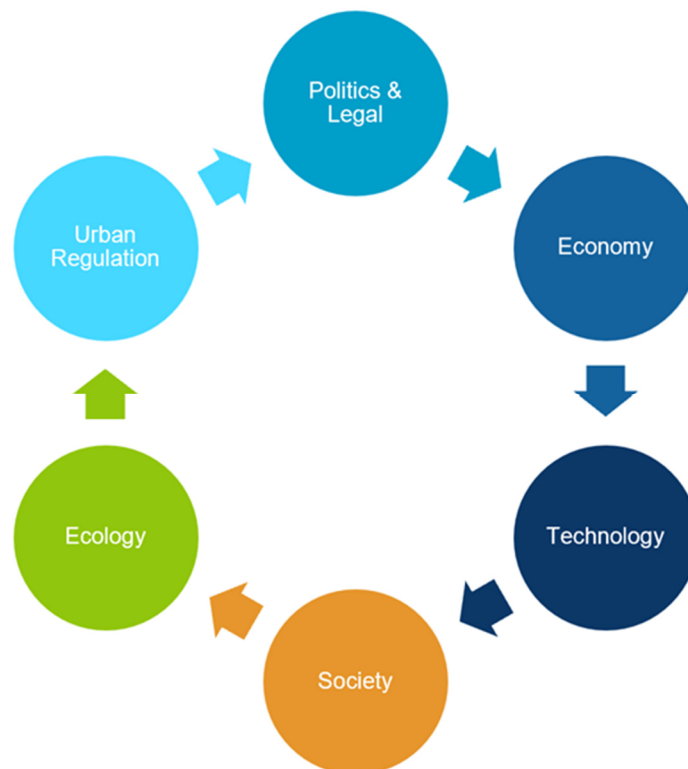


Abbildung 15: Dimensionen der Umfeldanalyse (siehe auch Kapitel 4.1.1)

Im Szenarioprozess erfolgt jetzt die Faktorenbewertung und die Ermittlung der Schlüsselfaktoren/ Deskriptoren. Die alternativen Deskriptorenausprägungen sind die Grundlage für die Ableitung konsistenter, voneinander abgrenzenden Szenarien.

Von den fünf gefundenen Szenarien wurden vier für die weitere Bearbeitung ausgewählt. Zu den einzelnen Szenarien wurden UseCases entwickelt, die in Steckbriefen beschrieben wurden.

Szenario 2 das schöne individuelle Szenario

Das 2 Szenario beschreibt eine Zukunft in der AVF stark individualisiert und auf die jeweiligen Bedürfnisse des Kunden abgestimmt sind. Diese reichen vom AVF im ÖPNV der auf kostengünstige Nutzung ausgerichtet ist bis hin zu Premium Services mit exklusiven Leistungen auf Basis von AVF. Das Szenario ist damit sehr breit aufgestellt und stellt hohe Anforderungen an die Flexibilität bzw. Angebotsvielfalt der AVF Angebote.

Szenario 3 das Güterverkehrsszenario

Das Szenario 3 fokussiert auf die Anforderungen des Güterverkehrs. Es definiert UseCases aus dem Güterverkehr die vom spezialisierten kostengünstigen AVF Fahrzeug über spezielle Lösungen im Sammel- und Lieferverkehr bis hin zu regulatorischen Lösungen für Zustellgebiete zur Bündelung von Verkehren auf Basis von AVF. Das 3 Szenario hat klar die Kosten im Sinne von kostensparenden Lösungen mit Hilfe von AVF im Blick. Vor allem die Reduktion von Personal durch AVF wird thematisiert.

Szenario 4 das schöne kollektive Szenario

Szenario 4 stellt vor allem auf kollektive Verkehre mithilfe von AVF ab. Anders als in Szenario 2 werden hier vor allem Lösungen mithilfe von AVF im und um den ÖPNV vorgeschlagen. Dies reicht vom Ersatz des Linienverkehrs durch AVF Angebote über, schon im Einsatz befindliche, RideSharing Dienste bis hin zu Lieferdiensten. Auch regulative Maßnahmen wie zeitliche oder räumliche Gebietssperrungen sind angedacht um den Einsatz bzw. die Einführung von AVF zu unterstützen.

Szenario 5 AVFIV (Automatisierte vernetzte Fahrzeuge – individual Verkehr)

Szenario 5 betrachtet den Einsatz von innovativen Organisationsformen rund um AVF. So könnten private Mobilitätsbörsen das Aushandeln/Organisieren von geteilten Nutzungen zwischen AVF Besitzern, Betreibern und Nutzern möglich machen. AVF könnten auch zeitliche und räumliche Engpässe im Verkehrssystem reduzieren oder beseitigen. Dies sowohl auf der Fahrzeugebene durch z.B. Bündelung von Verkehren als auch auf der Infrastrukturebene z.B. durch Slotmanagement auf hochfrequentierten Straßen-/ Schienenabschnitten. Im Verlauf des Projekts werden aus den im Szenarioprozess entwickelten USCases relevante UseCases weiter ausgearbeitet und im Rahmen von empirischen Untersuchungen und Modellrechnungen genauer untersucht.

4.2 Empirische Ergebnisse (INA)

4.2.1 Individuelle Mobilität - Mobilitätstypen & Akzeptanz (INA/Iff)

4.2.1.1 Einleitung

Simulationen zukünftiger Entwicklungen unter Berücksichtigung individuellen menschlichen Verhaltens ist ein bekanntes komplexes Aufgabengebiet. Zu deren Durchführung stellt die Psychologie ein Methodenrepertoire bereit, das zukünftiges Verhalten von Individuen als Cluster-Verhalten versteht, das durch die Erfassung von gegenwärtigen Überzeugungen, Haltungen und Handlungsgrenzen ermöglicht, über Abschätzung von Änderungsbereitschaft, Beharren, Flexibilität, Waghalsigkeit, Status u.ä. Persönlichkeitseigenschaften, auf zukünftiges Verhalten zu schließen und dadurch präziser als bisher "Massenverhalten" (als mehrdimensionales Clustergeschehen) zu prädictieren.

Wir haben in diesem Projekt erfolgreich einen Ansatz zur Methodenentwicklung entwickelt, der strukturelle Erkenntnisse liefert, hier insbesondere in der Anwendung auf dem Gebiet der Modellierung zukünftigen Mobilitätsverhaltens unter den Möglichkeiten Autonomes Fahrens, Elektromobilität und neuer Mobilitätsdienste.

Im Ergebnis stellen wir 6 Cluster relevanter Mobilitätstypen dar, deren unterschiedliche Einstellungen, Entscheidungsfaktoren und Restriktionen Einfluss auch auf zukünftige Entscheidungen haben könnten. Hierdurch wurde die Multi-Agenten Simulation in Kapitel 4.5 (TU Berlin) durch Verhaltensparameter aus der Faktoren- und Clusteranalyse ergänzt und verfeinert, um damit zusätzliche Erkenntnisse für verhaltensrelevante Entscheidungsmechanismen unterschiedlicher Mobilitätscluster bei der Modellbildung zu gewinnen.

Es wurde, ausgehend von individualpsychologischen, qualitativen Tiefeninterviews mit ausgewählten Teilnehmern, ein Fragebogen für eine repräsentative quantitative Onlinebefragung entwickelt. Der Fragebogen wurde nach den Interviews über interventionistische Gruppenerlebnisse in Fokusgruppen weiterentwickelt und die gewonnenen qualitativen Hypothesen wurden überprüft und ausgewertet. Im Ergebnis wurden Mobilitätstypen mit charakteristischen Verhaltensclustern als sozialpsychologische Segmente entwickelt mit besonderem Fokus auf Schätzung zukünftiger Akzeptanz und potenzieller Nutzung von autonomen Fahrzeugen.

Das Ergebnis zeigt zwischen den Clustern eine Diskrepanz der relevanten Ebenen der Entscheidungsfaktoren von Umweltbewusstsein über Zahlungsbereitschaften, Flexibilität, Interesse an Neuem ("Sensation-Seeker"), alltägliche Gewohnheiten bis hin zur "Liebe zum Automobil" auf.

Insgesamt hat die Untersuchung einen Beitrag zur Methodenentwicklung der Präzisierung qualitativer Faktoren in quantitativen Modellierungen menschlichen Verhaltens geliefert, die die wissenschaftliche Vorgehensweise dazu entwirft und verprobt.

Inhaltliche Erkenntnisse aus der Anwendung sollten jedoch nur als verfeinerte Hypothesen für weitere Modellbildungen verstanden werden, weil das Auftreten der Corona-Pandemie während der qualitativen Phase der Untersuchung zeigte, dass nicht alle bis dahin als stabil geglaubten Grundeinstellungen von Menschen auch tatsächlich gegen disruptive Veränderungen der Wirklichkeit resilient sind (Gruppe der bewussten Nutzer öffentlicher Verkehrsmittel, teilte sich in "Angstfreie", "durch Budget Restriktierte" und "Rückkehrer zum Individualverkehr"). Die Auslöser dieser Verhaltensänderungen erscheinen zwar nachvollziehbar, zeigen aber auch auf, dass tiefenpsychologische Erkenntnisse diese Tiefe menschlicher Verhaltensentscheidungen nicht komplett

PAVE

vorhersagen können. Ebenso ist das in der Corona-Pandemie oft diskutierte Vorhersage-Paradoxon überhaupt nicht berücksichtigt, das in zukünftigen Modellierungen als eine Art kaskadisches Stufen-Szenario entwickelt werden könnte. Immer dann, wenn prädiktive Modell-Simulationen zu Erkenntnissen führen, die so von bestimmten Clustern von Menschen als nicht hinnehmbar empfunden werden, führen sie zu Verhaltensänderungen – bis hin zum Anstoßen von politischen Gesetzgebungsprozessen. Diese modellbasierten Interventionen machen jedoch die Modellsimulations-Aussage ungültig, könnten aber in einem kaskadischen Modellrechenlauf berücksichtigt werden.

4.2.1.2 Ziele, Methodik & Untersuchungsdesign

Die empirische Untersuchung zur Identifikation von Mobilitätstypen (Clustern) im PAVE Projekt hatte das Ziel eine Typologie von Nutzergruppen zu entwickeln, die die Verkehrsteilnehmer hinsichtlich ihres Mobilitätsverhaltens und den dahinter liegenden Mobilitätseinstellungen, insbesondere in Bezug auf das autonome Fahren erfasst. Themenbereiche wie Komfortbedürfnisse, Gewohnheiten, Sicherheit, Inter- & Multimodalität, Umsteigebereitschaft und Affinitäten zu neuen Angeboten wurden dabei umfassend qualitativ und quantitativ untersucht.

Neben der täglichen Mobilität von heute wurden insbesondere Einstellungen und Erwartungen in Bezug auf das autonome Fahren ermittelt und analysiert. Eine wichtige Rolle dabei spielte die Akzeptanz von autonomen Mobilitätslösungen im privaten und öffentlichen Bereich sowie Technologie-Affinität, "Sensation Seeking", Vertrauen in Systeme und die Akzeptanz aus Nutzer- und gesellschaftlicher Sicht. Daneben wurden auch emotionale Faktoren wie Liebe, Angst, Neugier und Frustrationstoleranz berücksichtigt sowie das Umweltbewusstsein und dessen Auswirkung auf Mobilitätsentscheidungen.

Zur Entwicklung der Mobilitätstypen wurde ein "Mixed-Method"-Verfahren in Form eines explorativen Untersuchungsdesigns angewendet. (Hussy et al., 2007) Bei diesem Forschungsansatz werden qualitative und quantitative Verfahren kombiniert. In der ersten Phase wurden qualitative Forschungsmethoden in Form von Tiefeninterviews und Fokusgruppen angewandt, um Hypothesen für eine Typisierung aufzustellen und Items für die quantitative Befragung zu generieren. In der zweiten, quantitativen Phase wurden die Prävalenzen der verschiedenen Typen in der Population festgestellt und geprüft, ob die Taxonomie stimmig ist oder gegebenenfalls angepasst werden muss.

Die Identifikation der Mobilitätstypen in Bezug auf das autonome Fahren wurde somit in drei empirischen Schritten durchgeführt:

- A) Tiefenpsychologische Interviews (qualitativ, Einzelbefragung)
- B) Fokusgruppen (qualitativ, Gruppenworkshops)
- C) Onlinebefragung (quantitativ, repräsentative Population)

Das Untersuchungsdesign (Abbildung 35) vereinte Elemente aus den Fachgebieten Mobilität, Psychologie, sowie Zukunfts- und Szenarienforschung, um Einstellungen, Motive und Änderungsbereitschaften für heutiges und zukünftiges menschliches Handeln zu identifizieren. Unter Berücksichtigung von Zwischenergebnissen erfolgte eine iterative Anpassung des Hypothesendesigns.

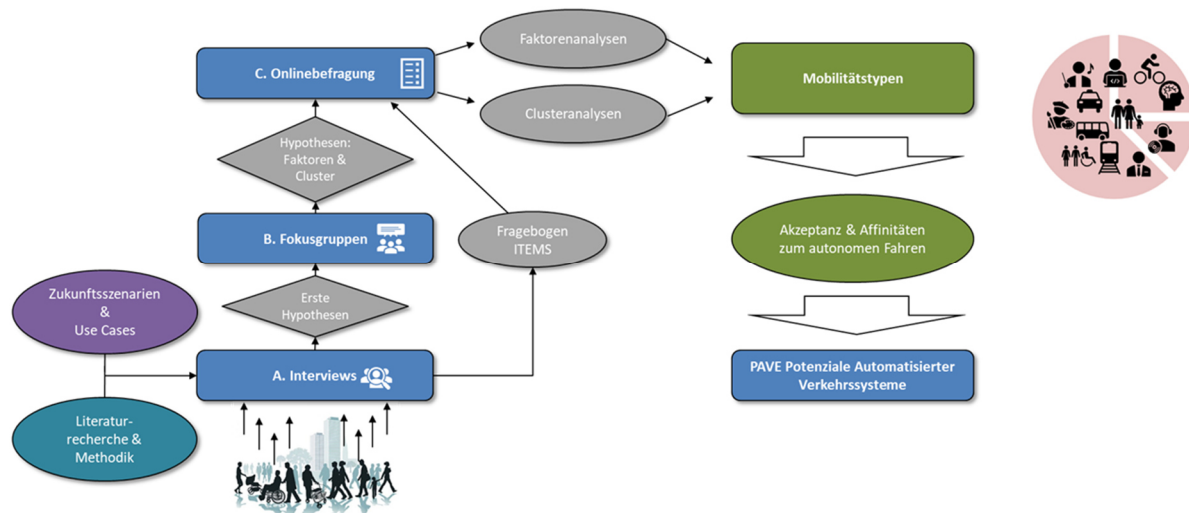


Abbildung 35: Vorgehensweise zur Ermittlung der Mobilitätstypen

Die gesamte Untersuchung wurde durch die INA (Internationale Akademie Berlin) in Zusammenarbeit mit der CBA (Carl Benz Academy) durchgeführt.

Bei der Durchführung der tiefenpsychologischen Interviews und Ausführung der Fokusgruppen wurde eine Methode zur Verknüpfung von tiefenpsychologischen Aussagen mit den individuellen Persönlichkeitsprofilen der Interviewten entwickelt. Mit einer relativ kleinen, aber gezielt nach Normalverteilung der Persönlichkeitstest-Ergebnisse, qualitativ repräsentativen Stichproben wird eine hohe Prädiktionssicherheit und Hypothesenplausibilität für quantitative Verfahren ermöglicht. Aufgaben waren die Organisation & Konzeption der Fokusgruppen, psychologische Analysen von Probanden und deren Aussagen, sowie Beratung bei der Konzeption der Onlinebefragung.

Für die Durchführung der quantitativen Onlinebefragung wurde die Info GmbH beauftragt, deren Ergebnisse im Projektteam ausgewertet wurden. In den folgenden Abschnitten werden die Durchführung und Ergebnisse der einzelnen Untersuchungsschritte beschrieben.

4.2.1.3 Tiefenpsychologische Interviews

Methodik und Vorgehensweise

Um einen Überblick über die vielschichtigen Einstellungen und Mobilitätsbedürfnisse von Nutzern zu erhalten, wurden im ersten Schritt tiefenpsychologische Interviews durchgeführt. Dafür wurden 30 Probanden mit heterogenen soziodemographischen Merkmalen und Mobilitätsverhalten ermittelt und nach vorhandenen Ergebnissen eines standardisierten Persönlichkeitsfragebogens (Freiburger Persönlichkeitsinventar = FPI) interviewt. (Hatscher 1999)

Die Auswahl der Teilnehmer repräsentierte die Normalverteilung des FPI - jeder Skalenwert der Standard-Nine-Skala/Stanine (Amelang 1994) wurde durch Probanden repräsentiert - je 3 Probanden für die Skalenwerte 9, 8, 7 und 3, 2, 1 sowie je 4 Probanden für die Skalenwerte 6, 5, 4 = Dies ergibt ein 55%-Niveau.

Die Verrechnung individueller Persönlichkeitsprofile zu jeweils einem Stanine-Wert wurde nach einer Formel berechnet, die bereits in Untersuchungen zu Segmentierung von Kunden verwendet wurde und als bewährt gilt, aber nicht publiziert ist. Dieser Ansatz wird angewendet, um die Probanden den entsprechenden Prozentintervallen der Gesamtbevölkerung zuzuordnen. Dies reduziert die exakte Wiederholbarkeit, kann aber im aktuellen Zusammenhang als vernachlässigbar gelten, da hieraus

PAVE

zusätzliche Auswertungsmöglichkeiten entstehen, die an dieser Stelle nicht publiziert werden (aufgrund von komplexen Modellberechnungen), aber der Ordnung halber erwähnt werden. Auch ohne diese qualitative Auswahl-Methodik kann davon ausgegangen werden, dass 30 Probanden in der ersten Phase einer Fragebogen-Entwicklung ausreichend Anregung und Formulierungen für umgangssprachliche Formulierungen von Aussagesätzen liefern.

Die tiefenpsychologischen Interviews basieren auf einer Fragetechnik, die tiefe Grundüberzeugungen und -einstellungen hervorbringt, aber auch tiefe Wünsche und Hoffnungen, die im vorbewussten oder unbewussten Bereich liegen und erst in der Zukunft oder bei der Befragung ins Bewusstsein kommen. Die Technik basiert auf gesprächs-psychotherapeutischen Erkenntnissen, dass Befragte, wenn ihre Antworten lediglich wertschätzend umformuliert wiederholt werden, dieselbe Botschaft jeweils eine Ebene tiefer entsprechend einer angenommenen Maslow-Pyramide formulieren. Am Ende werden die tiefsten noch durch das Bewusstsein zugänglichen Botschaften formuliert (analog Means-End-Analyse). Die jeweils tiefsten Formulierungen wurden für den Itempool der Fragebogenentwicklung gesammelt und mit den jeweiligen Stanine-Prozenten des FPI-Ergebnisses jedes Interviewpartners kodiert.

Durch das Gesamtverhalten jedes Interviewten, seine Tiefenaussagen sowie seiner soziodemographischen und Mobilitätsdaten, konnte bereits ein hypothetisches Mengengerüst für den Zusammenhang von Persönlichkeitstypen, Mobilitätspräferenzen und Verhaltensrestriktionen als Modell entwickelt werden. Ziel der gewählten Methoden war die Generierung von Hypothesen für mögliche Nutzertypologien sowie die Ermittlung von Items für die abschließende quantitative Befragung.

Durchführung der Interviews

Im Zeitraum von August bis Oktober 2019 wurden insgesamt 30 Tiefeninterviews durchgeführt und sukzessive jeweils im Forscherteam ausgewertet.

Allgemeines Setting

Ein Interview bestand neben der Auswahl nach FPI-Wert aus 3 weiteren Modulen:

1. Abfrage des Freiburger Persönlichkeitsinventars (FPI-A1) Persönlichkeitstest zur Einschätzung von Eigenschaften, wie u.a. Geselligkeit, Offenheit, Extraversion, Gelassenheit, Gehemtheit, Maskulinität
2. Tiefenpsychologisches Interview zum eigenen Mobilitätsverhalten und zum autonomen Fahren
3. Freies Gespräch zur Reflexion des eigenen Mobilitätsverhaltens an Beispielen
4. Kurzfragebogen zur individuellen Mobilität

Die Interviews wurden nach dem tiefenpsychologischen Teil als offene Gespräche geführt, in denen es darum ging, dass sich die Interviewten als Experten ihres eigenen Mobilitätsverhaltens geschätzt fühlen und sowie ihre eigenen Motivationen, Gründe, Anlassen und Bewertungskriterien äußern. Das diente jedoch hauptsächlich der Wahrnehmungsschärfung der Interviewer, die gleichzeitig die Methodik- und Theorieentwickler waren und damit auch die Chance hatten, sich von eigenen tiefenpsychologisch verankerten Vorurteilen zu befreien, bzw. diese zu erkennen. Die Untersucher erkannten sich auf dieser Ebene als vorbelastet und in ihren Tiefenüberzeugungen selbst drei verschiedenen Mobilitätstypen zugehörig (a) konservativ-autoaffin, b) Sensation Seeker und c) ökologisch orientiert. Ähnliche Typenmuster fanden sich auch bei den Probanden wieder, aus denen im Verlauf die ersten Hypothesen zu Mobilitätstypen entstanden. Diese Selbst- und Gruppenerkenntnis ist bei der kritischen

PAVE

Selbstreflexion von Modellbildungsprozessen sehr wichtig und ein kreativer Disput-Treiber innerhalb der internen Forschungsdiskussionen zur Methodik, Parameterauswahl, Fragetechnik usw.

Nur eine sehr offene Darlegung eigener Grundhaltungen zum Forschungsgegenstand und eine möglichst heterogene Zusammensetzung des Forschungsteams sichert das Erkennen von blinden Wahrnehmungsflecken, "weißen Elefanten" und ideologischer Haltungsimplementierung.

Die Interviewer nahmen an den vorangegangenen Szenarienworkshops teil, in denen die "ganze Breite" des Forschungsfeldes in Gegenwart und Zukunft beleuchtet wurde. Dabei wurden politische, wissenschaftliche und ökonomische Entwicklungen antizipiert und unterschiedliche Interessen- und Gemengelagen in der Gesellschaft miteinbezogen.

Randbedingungen

20 Interviews wurden in den, den Interviewten vertrauten, Forschungsräumen der Carl Benz Academy durchgeführt. Die Interviewten kannten die Interviewer jeweils bereits aus der Durchführung der FPI-Fragebogenuntersuchung. Neutralität und wertschätzende Atmosphäre war gegeben.

10 Interviews wurden im vertrauten privaten Umfeld der Interviewten durchgeführt (aufgesucht).

Zusammengefasster Rahmen der Tiefeninterviews:

- Detaillierte Erörterung des Mobilitätsverhaltens und der dahinter liegenden Motive und Einstellungen
- Einschätzung & Bewertung von möglichen alternativen Verkehrsmitteln und deren individueller Auswahl nach Notwendigkeit, Lust, Erleben und deren Wertung (positive und negative nachhaltige Erlebnisse)
- Tiefenpsychologische Einschätzungen, Erwartungen und Anforderungen an autonome Fahrzeuge und Elektroantriebe sowie tiefe Haltungen dazu

Ergebnisse der Interviews

In diesem Abschnitt sind die Erkenntnisse über die Mobilitätseinstellungen der Probanden und Hypothesen zu möglichen Segmenten von Mobilitätstypen zusammengefasst.

Erkenntnisse zu Mobilitätseinstellungen

Für das Treffen von Mobilitätsentscheidungen spielen Vertrauen, Sicherheit und Verlässlichkeit des Verkehrsmittels eine wesentliche Rolle.

Wenn diese Grundbedürfnisse erfüllt sind, bestimmen die Faktoren Komfort, Schnelligkeit und Kosten die Wahl des Verkehrsmittels. Weitere wichtige Kriterien sind Verfügbarkeit, Usability, soziale Komponenten, Umweltverträglichkeit, Prestige und Gewohnheiten.

Diese Grundbedürfnisse sind bei jedem Menschen individuell ausgeprägt. Probanden mit ähnlichen Bedürfnisschwerpunkten und psychologischen Grundeinstellungen wurden im Ergebnis zu hypothetischen Mobilitätstypen zusammengefasst. Im weiteren Verlauf der Untersuchung wurden diese Typen weiter präzisiert und in der quantitativen Befragung validiert.

Die Tiefeninterviews wurden anhand eines Leitfadens themenorientiert durchgeführt:

Einstellung zum Auto

- Das Auto ist für viele Autobesitzer unverzichtbar. Es wird jedoch öfter verzichtet, wenn man in die Innenstadt möchte. Die Abwägung, ob das Auto genutzt wird, richtet sich überwiegend nach einer individuellen Bewertung möglicher Alternativen, der Tageszeit, aktuellem Verkehrsaufkommen, Parkmöglichkeiten und Grundeinstellungen
- Alternativen wie Fahrrad oder ÖPNV sind teilweise möglich, aber gehen meist mit Komforteinbußen einher:
 - Transportmöglichkeit
 - Unabhängigkeit & Flexibilität
 - Kein „eigener Raum“
 - Wetterabhängigkeit
 - Gewohnheit
- Fahren in der Stadt ist aufgrund der Verkehrslage durchweg negativ behaftet, wird aber trotzdem genutzt, wenn die Alternativen schlechter erscheinen
- Fahrten am Wochenende oder Fahrten ins Umland werden durch die meisten positiv bewertet: „Auto fahren ist Freiheit“

Einstellung zum ÖPNV

- Auch Autobesitzer fahren ÖPNV, insbesondere aufgrund der stressbehafteten Fahraufgabe im Stadtverkehr
- Gründe für den Umstieg vom Auto zum ÖPNV:
 - Starker Verkehr & einhergehende Zeitverluste
 - Parkplatzsituation & -preise
- Positive Aspekte des ÖPNV
 - Relativ kostengünstig im Abonnement bei regelmäßiger Nutzung
 - Umweltfreundlicher als das Auto
 - Sozialer Treffpunkt
- Negative Aspekte des ÖPNV
 - Ausfälle & Störungen – Zuverlässigkeit
 - mögliche Überfüllung, soziales Unbehagen, Komforteinbußen
 - Teilweise schlechte oder nicht vorhandene Anbindung

Einstellung zum Fahrrad

- Gewinn von Freiheit, Individualität & Flexibilität
- Oft anspruchsvolle Auseinandersetzung mit anderen Verkehrsteilnehmern
- Fahrradinfrastruktur teilweise noch sehr mangelhaft – „es würden mehr Leute Fahrrad fahren bei besserer, sicherer Infrastruktur“
- Wetterabhängigkeit
- Limitierte Transportfähigkeit

Einstellung zu Sharing-Angeboten (Car-/Bike-/Scooter)

- Der Großteil der Probanden hat Sharing-Angebote noch nicht oder nur sporadisch ausprobiert
- Insbesondere die jüngere Generation nimmt diese Angebote eher an
- Keine echte Alternative, um auf das eigene Auto regelmäßig genutzte zu verzichten
- Jedoch haben viele Probanden die Absicht geäußert sich damit näher zu beschäftigen, z.Bsp. wenn man auf das Autos verzichten müsste Geschäftsgebiete sind oft zu klein
- Vermietung des eigenen Autos wird abgelehnt

Einstellung zu Taxi & OnDemand Fahrdiensten

- Taxi wird eher sporadisch genutzt und als sehr teuer empfunden
- OnDemand Fahrdienste von den meisten noch nicht ausprobiert
- Junge Zielgruppe nutzte BerlKönig, CleverShuttle & Co aus finanziellen Motiven und wegen der einfachen digitalen Bestellmöglichkeit
- Komfortabler und, je nach Strecke, schneller als der ÖPNV

Einstellung zum autonomen Fahren

- Allgemeine Einstellung zum autonomen Fahren
 - viele Probanden wussten nur marginal über das Thema bescheid
 - von Skepsis bis Aufgeschlossenheit, es waren alle Meinungen gleichmäßig vertreten
 - Autofahrer: Aktuelle Assistenzsysteme in Fahrzeugen (Spurhalteassistent, Bremsassistent, Abstandstempomat) werden gern genutzt, da sie für die Probanden Komfort & Sicherheit steigern
 - jedoch für das vollautonome Fahren „muss die Technologie erprobt und sicher sein, sowie einen klaren Rechtsrahmen besitzen
 - für einen Teil der Probanden war die ökologische Nachhaltigkeit von AVF von hoher Bedeutung
 - ein großes Problem beim autonomen Fahren sahen die Probanden bei der Bewerkstelligung von Mischverkehr (Menschen und Computer teilen sich die Straße)
- Eigenes Auto mit autonomer Fahrfunktion
 - für die meisten Probanden war das vollautonome Fahren im Stadtverkehr nur schwer vorstellbar
 - „Das Lenkrad gehört einfach zum Auto“ – Die Mehrheit der Autofahrer will sich die Möglichkeit erhalten das Steuer noch selbst übernehmen zu können
 - es wird Haftungsausschluss für den Besitzer gefordert, wenn der Computer einen Unfall verursacht
- Autonome „Robotaxis“
 - Preisgestaltung: darf nicht teurer als Taxi sein
 - bei einem Fahrpreis auf Taxi-Niveau würde die Mehrheit der Probanden nicht häufiger mit einem Robotaxi fahren als sie heute mit normalen Taxis fahren
 - günstigere Preise, wie heutige RideHailing Angebote können hier neue Kundengruppen gewinnen
 - zudem hängt eine potenzielle Nutzung auch stark von der individuellen Akzeptanz/Affinität von AVF ab
- Autonome „Sammeltaxis“
 - wird durchweg mit einem öffentlichen Verkehrsmittel in Verbindung gebracht
 - nicht für jeden geeignet
 - geringe Privatheit
 - Sozialisierung ohne „vermittelnden Fahrer“
 - Haltezeiten bei geteilten Fahrten
 - akzeptierter Preis zwischen ÖV und Taxi

Hypothesen zu Mobilitätstypen nach den Interviews

Nach den Interviews wurden erste Hypothesen zu möglichen Mobilitätstypen aufgestellt. Dies erfolgte auf Basis des Freiburger Persönlichkeitsinventars, auf psychologischen Einschätzungen der Probanden

PAVE

sowie der Analyse der Aussagen zum Verkehrsverhalten und zu Grundeinstellungen. Dabei wurde das Mengengerüst des FPI nach der Stanine-Skala zugeordnet.

Nachfolgend sind die vier hypothetischen Typen nach den Interviews beschrieben:

Die Liberalen (Flexible) (Anteil 7 %)

Dieser Typ macht seine Mobilitätsentscheidungen von vielfältigen Faktoren abhängig wie z.B. Preis, Komfort oder Wetter. Seine Verkehrsmittelwahl ist nicht festgelegt und ist für verschiedene Angebote offen. Diese Gruppe ist durchaus aufgeschlossen gegenüber neuen Mobilitätsangeboten.

FPI-Persönlichkeitsprofil: Nervosität = 3, Geselligkeit = 7, Gelassenheit = 7,
 Dominanzstreben = 7, Extraversion = 7, Emotionale Labilität = 3

Auf eine psychotherapeutische Klassifikation der qualitativen Cluster (Typen) wird hier bewusst verzichtet, weil es unethisch wäre, Menschen ohne psychischen Leidensdruck als „normal“ bzw. „abweichend“ von der Norm zu interpretieren. Die gesamte Normalverteilung gilt hier deshalb tatsächlich als „normal“.

Beispielaussagen aus den Interviews:

- „Ich suche mir für jedes Ziel die beste Kombination von Weg und Verkehrsmittel.“
- „Ich habe kein Lieblingsverkehrsmittel.“
- „Komfort und Zuverlässigkeit sind mir wichtig.“
- „Für besondere Anlässe bestelle ich mir gern auch mal ein Taxi oder miete ein CarSharing Fahrzeug.“
- „Wenn das Wetter schlecht ist, lasse ich das Fahrrad stehen und fahre mit der Bahn.“

Die Bezeichnung „Liberales“ ist in diesem Fall nicht politisch motiviert, sondern bezieht sich auf die persönlichen Einstellungen der sozialen Verwirklichung von individueller Freiheit. Dazu gehört auch empfänglich für Neues zu sein und offen für Änderungen von Gewohnheiten zu sein. Wenn diese Einstellungen besonders ausgeprägt sind und Menschen als Multiplikator von Meinungen und Ideen agieren, kann eine neue Gruppe gebildet werden: Die Sensation Seeker.

Die Sensation Seeker (Anteil 7 %)

Dieser Typ legt hohen Wert darauf neue Möglichkeiten und Technologien auszuprobieren und diese auch anderen Personen nahezubringen. Ein Sensation Seeker steht Neuem unvoreingenommen gegenüber und hat keine Scheu unbekanntes Territorium zu beschreiten.

FPI-Persönlichkeitsprofil: Spontane Aggressivität = 7, Erregbarkeit = 7, Geselligkeit = 7,
 Gelassenheit = 8

Beispielaussagen aus den Interviews:

- „Ich probiere Neues sofort aus und erzähle meine Erfahrungen gern anderen.“
- „Mich reizen neue Erlebnisse und Erfahrungen.“
- „Ich habe mir gleich die App geholt als ich von diesen neuen Tretrollern gehört habe.“
- „Ich brauche Abwechslung sonst wird mir der Alltag langweilig.“
- „Das neue Konzept mit den Sammeltaxis des BVG BerlKönigs finde ich Klasse. Ich habe gleich ein paar Freunde damit abgeholt.“

PAVE

Die Gruppe der Sensation Seeker hat ähnliche Attribute wie die Gruppe der Liberalen, jedoch verfügt sie über einen höheren Reiz neue, moderne Möglichkeiten auszutesten. Dazu kommt eine oft hohe soziale Vernetzung mit Multiplikatoreigenschaften. Diese Gruppe ist in der Regel die erste die eine neue Technologie wie das autonome Fahren in ihrem Alltag adaptiert.

Die Konservativen (Starre) (Anteil 12 %)

Dieser Typ ist sehr festgelegt in seinem Verkehrsverhalten und lässt sich auch nur schwer von anderen Möglichkeiten überzeugen. Der Großteil der Probanden in dieser Gruppe fährt häufig Auto, wobei auch ÖPNV oder Fahrradnutzer starr in ihrem Mobilitätsverhalten sein können. Sie sehen ihr gewähltes Verkehrsmittel als Alternativlos an und bewerten andere Mobilitätslösungen negativ oder sie sind auf ihr jeweiliges Fortbewegungsmittel angewiesen.

FPI-Persönlichkeitsprofil: Nervosität = 3, Depressivität = 7, Erregbarkeit = 7, Emotionale
Labilität = 7, Altruismus (Skala Maskulinität) = 3

Beispielaussagen aus den Interviews:

- „Ich bin ein Gewohnheitsmensch und liebe, was ich kenne.“
- „Ich sehe keinen Grund, diese neuen Angebote nutzen zu müssen.“
- „Nur noch autonom zu fahren, würde mir den Spaß am Autofahren rauben.“
- „Ich bin auf mein Auto angewiesen, früher beruflich und heute gesundheitlich.“
- „Ich fahre überall mit dem Auto hin, da darin alle meine Sachen sind.“
- „Ich fühle mich in meinem Auto am sichersten.“

Die Gruppe der Konservativen ist in Ihrem Verhalten eher starr. Es wird zumeist gar nicht in Erwägung gezogen die eigene Verkehrsmittelwahl zu überdenken. Dazu ist das Sicherheitsbedürfnis und das Verharren im „Gewohnten“ sehr ausgeprägt. Um diese Gruppe für autonome Fahrzeuge zu gewinnen, müssen persönliche Vorteile geschaffen und vermittelt werden.

Die Preisbewussten (Anteil 12 %)

Für diesen Typ stehen die Kosten an erster Stelle bei Mobilitätsentscheidungen und er nimmt dafür auch Nachteile in Kauf. Oft ist ein begrenztes Mobilitätsbudget Ursache für eine hohe Preissensitivität. Daneben existiert auch eine Teilmenge die trotz höherem Mobilitätsbudget, eine geringe Zahlungsbereitschaft für die tägliche Mobilität besitzt z.B. um mehr Geld für andere persönliche Lebensinhalte zur Verfügung zu haben.

FPI-Persönlichkeitsprofil: Erregbarkeit= 7, Dominanzstreben = 7, Gehemmtheit = 7,
Altruismus = 3

Beispielaussagen aus den Interviews:

- „Für einen Top-Preis nehme ich auch Umwege und Zeitverzug in Kauf.“
- „Es macht mir Spaß, überall den günstigsten Preis aufzustöbern!“
- „Das Auto ist mir einfach zu teuer für den Nutzen, den es mir der Stadt bringt.“
- „Taxifahren ist viel zu teuer! Das mache ich nur im Notfall.“
- „Ich fahre so oft es geht mit dem Fahrrad, um mir kein BVG Ticket holen zu müssen.“

Diese vier hypothetischen Segmente (siehe Abbildung 36) wurden nach den Interviews gebildet und im weiteren Untersuchungsverlauf präzisiert und erweitert. Aus den Auswertungen der FPI Persönlichkeitsinventare in Verbindung mit den Stanine Skalen konnte ein hypothetischer Anteil von

PAVE

38% in der Bevölkerung erklärt werden. Nach den Fokusgruppen erhöhte sich dieser Wert auf 88%. Um eine repräsentative Verteilung zu ermitteln, wurde abschließend die quantitative Erhebung durchgeführt.

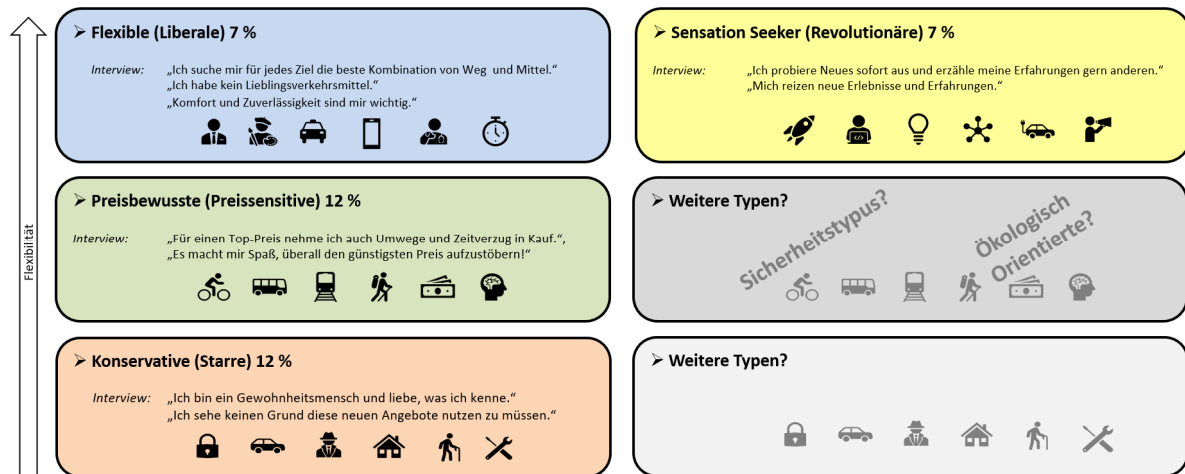


Abbildung 36: Übersicht der hypothetischen Typen nach den Interviews & FPI Auswertung

Die ausführliche Beschreibung der final ermittelten Typen und Verteilungen befinden sich in Kapitel 4.2.1.5 Mobilitätstypen - Beschreibung & Charakterisierung.

4.2.1.4 Fokusgruppen

Vorgehensweise Fokusgruppen

Der nächste Schritt nach den tiefenpsychologischen Interviews war die Durchführung von Gruppenveranstaltungen (Fokusgruppen) mit dem Ziel, emotional und rational verankerte Haltungen der Probanden offenzulegen. Hierbei wurde in einem sozialen Umfeld das gesamte Spektrum unterschiedlicher Erfahrungen, Sichtweisen, Gefühlslagen, Denkweisen und Bewertungen transparent.

Einen Schwerpunkt bildete die Betrachtung möglicher Zukunftsszenarien und Use Cases. Durch das „Live-Erleben“ des automatisierten Fahrens sollten die Probanden angeregt werden, mögliche Anwendungen des autonomen Fahrens zu entwickeln und zu bewerten.

Ein weiteres Ziel war die Identifizierung von Nutzungsmotiven für verschiedene Verkehrsmittel, insbesondere innovativer Konzepte wie z.B. CarSharing oder RideSharing und insbesondere zukünftiges autonomes Fahren.

Die Probanden wurden aus ausgewählten Mobilitätsbereichen basierend auf den Anforderungen des Untersuchungsdesigns rekrutiert. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Teilnehmer ein möglichst heterogenes Spektrum nach den folgenden Kriterien abdecken:

- männlich/weiblich
- jung bis alt,
- Niedriges bis hohes Einkommen
- Wohnlage im Zentrum bis Wohnlage außerhalb der Stadtgrenze
- Autobesitzer & Nicht-Autobesitzer
- Auto-Affine, ÖPNV-Affine, Fahrradfahrer
- Nutzer von neuen Mobilitätskonzepten

PAVE

Daneben wurden, neben gemischten Gruppen, folgende Schwerpunktgruppen gebildet

- Vorruhestand und Alter
- Berufstätige
- Ausbildung/Studium

Durchführung Fokusgruppen

Insgesamt wurden 6 ganztägige Workshops mit je 8-10 Probanden durchgeführt. In „lockerer“, also angst- und wertungsfreier, sowie wertschätzender Atmosphäre wurden zum einen persönliche Erfahrungen zur Mobilität ausgetauscht sowie bestehende Lösungen und Ideen vorgestellt. Zum anderen wurden praktische Erfahrungen gemacht und mögliche Auswirkungen von autonomen Fahrzeugen diskutiert.

Die Fokusgruppen fanden im Hotel am Borsigturm in Berlin Tegel statt, welches sich in der Nähe der BVG SeeMeile befand. Die BVG SeeMeile ist ein Forschungsprojekt in dem ein hochautomatisiertes Shuttle des Herstellers Easymile zwischen dem U-Bahnhof Alt-Tegel und den Tegeler Seeterrassen auf einer Strecke von ca. 600 m mit max. 15 km/h pendelt.

Durch die Wahl dieses Standorts konnte mit 3 Fokusgruppen eine Testfahrt mit dem Shuttle durchgeführt werden, zu drei weiteren Terminen war das Shuttle außer Betrieb. Der Standort Tegel hatte den weiteren Vorteil, dass sich in unmittelbarer Nähe die Autobahn befindet, auf der die autonomen Fahrfunktionen der Test-Pkw optimal demonstriert werden konnten.

Zum Einstieg der Workshops wurde in einer Gruppendiskussion ‘Berlins Mobilität heute’ thematisiert, wobei die Teilnehmer von ihren Bewegungen durch die Stadt und damit verbundene Gewohnheiten, Störfaktoren und Negativerfahrungen berichteten. Durch diesen offenen Austausch von Meinungen und Erfahrungen wurde eine angeregte Basis für die weiteren Erlebnisse und Diskussionen geschaffen. Im Anschluss wurde kurz das Konzept des “selbstfahrenden Pkw” vorgestellt, um die Teilnehmer auf die Testfahrten vorzubereiten.

Mitfahrt im “autonomen Pkw”

In Vorbereitung auf die Diskussion zum autonomen Fahren wurden 20-minütige Mitfahr-Testfahrten durchgeführt, in denen “autonome” Fahrfunktionen wie z. B. Autopilot/Spurhalteassistent, selbstständiges Bremsen, Abstand einhalten und Einparken vorgeführt wurden. Der Testfahrer wurde im Vorfeld in die Fahrfunktionen der Testfahrzeuge eingewiesen, um den bestmöglichen Effekt des “selbstständigen Fahrens” des Autos gegenüber den Probanden zu erzielen. Als Testwagen wurden die Fahrzeuge Mercedes E-Klasse mit DISTRONIC PLUS und Tesla mit Autopiloten eingesetzt. Während der Testfahrten wurden die Reaktionen und Aussagen der Probanden beobachtet. Zur internen Auswertung wurden die Testfahrten nach Einwilligung der Probanden per Video dokumentiert. Nach den Testfahrten fand eine Feedbackrunde statt, in der die Teilnehmer ihre gerade gewonnenen Eindrücke schilderten.

Während vor der Testfahrt die Äußerungen der Teilnehmer in Bezug auf „autonomes Fahren“ wertfrei aufgenommen wurden und nur durch die Gruppendynamik akzentuiert wurden, war das Testfahren wie eine „Verkaufsveranstaltung“ angelegt. Der Fahrer in der Rolle eines „hinter dem Produkt stehenden“ Experten, zeigte Vorzüge, Neues und Unerwartetes an den Referenzfahrzeugen. Danach wurde registriert, ob das konkrete Fahrerlebnis eine Änderung der vorher geäußerten Grundeinstellungen beim Einzelnen und in der Gruppe bewirkte.

PAVE

Mitfahrt im “autonomen Kleinbus” (BVG SeeMeile)

Nach der Testfahrt des teilautonomen Fahrens wurde die Idee des ‘geteilten autonomen Sammeltaxis’ vorgestellt. Die Gruppe begab sich zum U-Bahnhof Alt-Tegel, um das autonome Shuttle “SeeMeile” der BVG zu testen. Auch hierbei wurden die Reaktionen der Teilnehmer beobachtet und Eindrücke gesammelt, um im Anschluss eine Gruppendiskussion zum “autonomen Bus” bzw “autonomen Sammeltaxi” führen zu können.

Das unmittelbare Erleben erleichterte den Probanden den emotionalen Zugang zu der Thematik und förderte die Kreativität in der anschließenden Diskussion. Darüber hinaus wurde das Feedback mit eigenen Erfahrungen von automatisiert vernetztem Fahren verknüpft und die Bereitschaft zur Nutzung von Robotaxis diskutiert.

Abschließend wurde mit der Co-Creation Methode erarbeitet, wie die Probanden nach eigenen praktischen Erfahrungen das autonome Fahren der Zukunft grundsätzlich bewerten und nach ihren Wünschen gestalten würden.



Abbildung 37: Fokusgruppenveranstaltung, BVG SeeMeile Shuttle, Testfahrzeuge

PAVE

- **10:00 Uhr Begrüßung, Projektvorstellung, Kurzes Kennenlernen**
- **10:20 Uhr „Mobilität in Berlin heute“ / „Womit fahre ich am meisten und warum?“**
 - Testfahrten Tesla/Mercedes Autopilot
- **11:30 Uhr Der autonome Pkw - Erlebnisfeedback & Diskussionsrunde**
 - 12:30 Uhr Mittagessen
- **13:30 Uhr Das geteilte autonome Sammeltaxi - RidePooling**
 - Testfahrt/Video „BVG SeeMeile Shuttle“
- **14:30 Uhr Erlebnisfeedback & Diskussionsrunde zum autonomen BVG-Bus**
 - 15:00 Uhr Kaffeepause mit Gebäck, Obst & Snacks
- **15:20 Uhr Co-Creation: Wie sieht das autonome Fahren der Zukunft aus? Würde ich es nutzen?**
- **16:00 Uhr Ende - Fazit & Ausblick**



Abbildung 38: Beispiel - Agenda einer Fokusgruppenveranstaltung

Ergebnisse Fokusgruppen

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Einzelinterviews konnten die Probanden der Fokusgruppen in einem sozialen Setting beobachtet werden, was eine andere Sichtweise auf das Thema erlaubte. Neben der sozialen Komponente war das Live-Erlebnis besonders wichtig, um reale Reaktionen und Eindrücke auf den Stimulus zu gewinnen. Dabei erfolgten auch psychologische Einschätzungen der Fokusgruppenteilnehmer, um die Aussagen nach Persönlichkeitsmerkmalen und Verhalten einordnen zu können.

Im Folgenden werden die Haupterkennnisse aus den Testfahrten und Diskussionen sowie die weiterentwickelten Hypothesen der Mobilitätstypen beschrieben.

Ergebnisse: Diskussion, Erleben & Feedback zum autonomen Fahren

Diskussion zur aktuellen Verkehrssituation in Berlin und den Möglichkeiten sie durch autonomes Fahren zu verbessern

In allen Fokusgruppen wurde in diesem Teil der Diskussion, der auch zur Aufwärmung, dem Schaffen von Vertrauen und wertschätzender Atmosphäre diente, deutlich, dass die bereits aus den tiefenpsychologischen Interviews erkannten Typologien auch gruppenspezifisch wirksam sind. Es gab dabei jeweils eine Polarisierung zwischen Konservativen und Sensation-Seekern, wobei nur die Sensation-Seeker proaktiv für autonome Lösungen offen waren. In den Gruppendiskussionen sollte aber auch die Toleranz der Teilnehmer untereinander trainiert werden, dass es keine richtigen oder falschen Einstellungen gibt, sondern wir an der Vielfalt der unterschiedlichen und im Gruppengeschehen auch antagonistischen Einstellungen interessiert sind. Das verhinderte eine auf Konsensbildung ausgerichtete Gruppendynamik.

Außer Teilnehmern, die bereits Erfahrungen mit der persönlichen Nutzung von batteriebetriebenen Fahrzeugen hatten, war den Teilnehmern ein Zusammenhang von Ökologie und Autonomem Fahren überhaupt nicht repräsentiert (kognitiv oder emotional vorgedacht). Autonomes Fahren wurde fast durchgängig in den Bereich von Zukunftsentwicklungen projiziert und für „heute“ nicht als möglich oder relevant betrachtet. Vorstellungen zur Nutzung von autonomen Fahrzeugen bewegten sich also eher in für utopisch gehaltene Fantasien, sprudelten aber:

PAVE

- Ältere, die ihren Führerschein bereits abgegeben haben, würden als PKW-Verkehrsteilnehmer wieder zurückkehren
- Eine neue Form des Arbeitsplatzes wäre möglich: Das Auto, wobei die Arbeitszeit mit dem Besteigen des Fahrzeuges beginnt, den Büroalltag also verkürzt und mit dem Ende der Heimfahrt endet (was bis zu der Erkenntnis führte, dass es dann ja eigentlich gar kein Büro im herkömmlichen Sinne mehr geben müsste und das Auto der generelle Arbeitsplatz wäre und Treffen mit anderen Kollegen – je nach Verkehrsgeschehen auf Sammelstellen stattfinden könne – analog „Autokino Workspaces“. Hierbei wurde natürlich sofort auf die Möglichkeit des HomeOffice hingewiesen, um von vornherein Energie zu sparen und Verkehr zu reduzieren
- Hotels könnten verzichtbar werden – denn die Nächte könnten, wie im Schlafwagen – auch im fahrenden Auto verbracht werden (was bis zur Konzeption des autonom fahrenden Reisemobils führte)
- Die Fantasie des autonom fahrenden Reisemobils wurde zum Lebensmittelpunkt umphantasiert – bei dem gar keine Immobilien Wohnungen mehr erforderlich seien. Die Gruppe, in der das thematisiert wurde, hatte hierbei jedoch einen tiefen Phantasieabsturz, als sowohl die Nichtnotwendigkeit von Büroarbeitsplätzen als auch das Wegfallen von immobilier Wohnung zusammen gedacht wurde, denn als Nomaden wollten sie auch keine zukünftige Gesellschaft sehen. Hier zeigt sich, dass in spielerischer Atmosphäre vieles phantasierbar, aber nicht alles von positiven Gefühlen begleitet wird.
- Immer wieder tauchte eine WC-Funktion bei der Imagination von Autonomen Fahren auf und stets nach dieser die Wohnlichkeit des Innenraums – stark individualisiert, an die Bedürfnisse des Nutzers angepasst (zwischen Bücherregal, Kaffeemaschine, Möglichkeit aufzustehen, Arbeitsplatz). Hierbei wurde eine Nutzung auch durch andere Verkehrsteilnehmer während der „persönlich ungenutzten Zeiten“ strikt abgelehnt.
- Viele Teilnehmer wollten auch bei autonomen Fahrzeugen „wenn gewünscht“ eine Selbst-Steuerung aktivieren können – einfach, weil Autofahren für viele eine erfüllende Beschäftigung ist, Spaß machen kann, auch Erholung für einige bedeutet und „weil niemand ein ferngesteuertes Wesen“ sein will.
- Die Idee einer zentralen Verkehrssteuerung für den gesamtgesellschaftlichen Vorteil, im Sinne von Ökobilanz, Flächennutzung und Stressreduktion, stieß teilweise auf Zuspruch, da ein optimaler Verkehrsfluss erreicht werden kann. Es überwogen jedoch skeptische Gegenargumente aus der Erfahrungswelt des kapitalistischen Marktes, dass es dann „ein Klassensystem à la Handy-Verträge“ geben könnte, bei dem „Reiche“ immer die kürzeste oder schnellste Route zum Ziel erhalten würden und „Ärmere“ über Umwege mit mehr Zeitaufwand geroutet werden würden. Hier meldeten sich aber auch Stimmen, die wir als Preissensitive einstufen, die auch Vorteile eines solchen Systems sahen, nämlich fast kostenlos von A nach B zu kommen. Viele beriefen sich darauf, dass für sie der Weg das Ziel sei, sie neue Wege kennenlernen würden und Zeit für sie eine untergeordnete Rolle spiele.
- Das „Vermieten“ des eigenen autonomen Fahrzeuges für andere Transporte stehen einige Teilnehmer dann positiv gegenüber, wenn dadurch ein deutlicher Einkommenszugewinn entsteht (über Kosten, Verantwortung und Versicherung hinaus), ansonsten wird das persönliche Fahrzeug ungern an unbekannte Dritte verliehen.

Aus den allgemeinen Bewertungen der Verkehrssituation in Berlin (Aufwärmphase) soll nur erwähnt werden, dass sich alle Gruppen emotional darin einig waren, dass die Situation „furchtbar“ und auf jeden Fall „verbesserungswürdig“ sei. Auf das Gegenargument, dass doch Berlin international für seinen sehr strukturierten ÖPNV berühmt sei, wurden stets individuelle Erlebnisse gesetzt, die Verbesserungswürdiges zeigten (Unpünktlichkeit, Schmutz, heterogene Nutzergruppen, soziale

PAVE

Unerträglichkeiten, Hygienefaktoren, fehlende Sicherheit bei getakteten Anschlüssen, Überfüllung, Preise, unfreundliche Fahrer, komplizierte Tarife).

Im Kern aber wollten wir fokussiert auf unser Thema durch die Fokusgruppen erkennen, ob es noch weitere Mobilitätstypen gibt, Aussagesätze dazu sammeln und erfahren, welche „Grundeinstellungen“ zum Autonomen Fahren allein durch eigenes Erleben bei positiver „Verkaufsberatung“ durch einen Experten, VERÄNDERBAR sind (States – Traits).

Feedback zur Mitfahrt im teilautonomen Pkw

Im Mittelpunkt der Testfahrten standen Situationen, in denen der Fahrer die Hände vom Lenkrad nehmen konnte und das Auto selbst fuhr. Für alle Probanden ohne explizites Vorwissen war diese Situation ungewohnt und löste verschiedene Emotionen wie Erstaunen, Angst, Verblüfftheit, aber auch positive Überraschtheit aus. Es wurde genau beobachtet, wie das Fahrzeug agiert und es wurde mit der eigenen Fahrtechnik und Fahrfähigkeit verglichen. Unter anderem wurden das Einparken und das selbständige Bremsen in Bezug auf Sicherheit als sehr hilfreich angesehen. Während der Fahrt kamen den Probanden Ideen, welche Möglichkeiten sich mit der Nutzung von autonomen Fahrzeugen ergeben könnten, um mehr Lebensqualität zu haben. Insbesondere die Befreiung vom Stress im täglichen Verkehr wurde sehr häufig positiv hervorgehoben.

Reaktionen und Aussagen der Probanden:

- “Ich bin unsicher, ob ich mich 100% darauf verlassen kann.”
- “Endlich kein Stress mehr beim Autofahren.”
- “Bin begeistert, wie sicher das Auto reagiert.”
- “Man muss erst lernen so ein Auto zu bedienen, es wirkt kompliziert.”
- “Wir könnten uns von einer Feier nach Hause fahren lassen.”
- “So eine halbe Lösung wäre nichts für mich, entweder komplett autonom oder gar nicht.”

Insgesamt stieg das Vertrauen in die Technik während der Vorführung der automatisierten Fahrt. Jedoch behielten viele Probanden große Skepsis, ob es auch im Alltag funktioniert. Für die Fahrt auf der Autobahn wurde der Autopilot als sehr hilfreich eingeschätzt. Es ist jedoch anzumerken, dass der aktuelle Stand der Technik das “autonome Fahren Level 3” ist, bei dem nach wie vor ein menschlicher Fahrer das System überwacht und jederzeit eingreifen kann.

Diskussion “Das autonome Robotaxi”

Um sich dem Thema anzunähern, wurde zunächst die Nutzung von heutigen Taxis mit menschlichem Fahrer diskutiert. Bereits dabei gab es große Unterschiede zwischen den Probanden, vom regelmäßigen Nutzer bis hin zum Nutzer nur in Ausnahmefällen. Der bestimmende Faktor bei der Nutzung von Taxi ist der Preis. Bei vielen ist die Preisbereitschaft ein Taxi nur zu besonderen Umständen und Anlässen gegeben, wie z.B. die Fahrt zum Flughafen, zum Arzt, zum Restaurant oder zu anderen Freizeitaktivitäten. Hierbei ist zu beobachten, dass mit steigendem Alter die Nachfrage nach „Punkt zu Punkt Transport“ ansteigt.

Nach der Gesprächsrunde zum heutigen Taxi wurde das Konzept des autonomen Robotaxis vorgestellt und anschließend diskutiert. Erste Reaktionen waren zumeist, dass das Robotaxi aus Nutzersicht eigentlich genau wie ein heutiges Taxi funktioniert mit der Besonderheit, dass kein Mensch mehr das Fahrzeug lenkt. Angenommen der Fahrpreis ist ähnlich hoch wie bei einem normalen Taxi, ändert sich an der Grundfunktionalität kaum etwas. Bei der weiteren Diskussion wurden, die wahrgenommenen Unterschiede durch die Probanden herausgearbeitet:

PAVE

Da kein menschlicher Fahrer anwesend ist, findet keine soziale Interaktion statt. Die Probanden bewerteten diese Tatsache sehr unterschiedlich, da z.B. eher extrovertierte Menschen sozialen Kontakt gegenüber Einsamkeit bevorzugen. Für Introvertierte könnte ein Robotaxi hingegen attraktiv sein, da es einen Ruheraum bieten würde. Um diesen menschlichen Unterschieden zu begegnen bedarf es einer intelligenten Mensch-Maschine KI Schnittstelle, die die Kommunikation mit dem Fahrgast transparent und vertrauensvoll sicherstellt. Auch bereits die Bestellung über eine App oder Telefon sollte benutzerfreundlich und intuitiv sein.

Die Wartezeit auf ein Robotaxi sollte in der Innenstadt maximal 5 bis 10 Minuten und in der Außenstadt 10 bis 15 Minuten bis zur Abholung benötigen. Dabei möchte man auf einer Karte verfolgen können, wo sich das Taxi gerade verbindet und an welchem Punkt es halten wird. Dabei besteht insbesondere die Herausforderung stadtseitig Haltemöglichkeiten sicherzustellen.

Im Laufe der Gruppendiskussionen zum Robotaxi wurden folgende Aussage am häufigsten gemacht:

“Das Robotaxi...

- sollte nicht länger brauchen als ein heutiges Taxi.”
- darf nicht teurer sein als ein heutiges Taxi.”
- kann mir Ruhe bringen.”
- hätte keinen Fahrer zur Unterhaltung und niemand hilft das Gepäck einzuladen.”
- ist wahrscheinlich langsamer als ein Mensch fahren würde.”
- wird bestimmt verschmutzt wenn da niemand aufpasst.”
- führt nur zu mehr Verkehr.”
- bietet mir die Möglichkeit mich während der Fahrt zu entertainen oder zu arbeiten.”

Es ist festzuhalten, dass Robotaxis zunächst als eine weitere Form des herkömmlichen Taxis gesehen werden. Damit sie eine Chance haben sich zu etablieren, müssen die Mehrwerte und Komforteigenschaften kommuniziert und umgesetzt werden. All dies unter der Voraussetzung einer angemessenen Bepreisung.

Feedback zur Mitfahrt im BVG-SeeMeile Shuttle

Die Größe des Easymile EZ10 Shuttle wurde von der Mehrzahl der Probanden im Vergleich zu anderen Massentransportmitteln als sehr klein empfunden. Die sechs zugelassenen Sitzplätze bieten eine persönlichere Atmosphäre als z.B. reguläre BVG Busse. Da jedoch noch ein Fahrbegleiter der BVG zur Überwachung dabei war, ist das Gefährt mehrheitlich als vertrauenswürdig eingestuft worden. In der Diskussion zum Thema autonomes Sammeltaxi (ohne Fahrer) gab es gemischte Reaktionen, sich mit fremden Menschen in einem derart kleinen Fahrzeug zu befinden. Die Reaktionen gingen dabei von Interesse und sozialem Kontakt bis hin zu Kontaktängsten fremden Menschen gegenüber.

Eine wesentliche Erkenntnis war, dass sich Einstellungen und Haltungen nach einem eindrücklichen Erlebnis ändern können. Bei etwa einem Drittel der Probanden mit vorheriger Skepsis oder gar Ablehnung gegenüber dem autonomen Fahren vor den Live-Erlebnissen war im Nachhinein ein positiver Trend in Richtung Zustimmung zu verzeichnen. Die eigene Haltung hatte sich aufgrund der positiven Erfahrung in Verbindung mit Vertrauen gegenüber dem Versuchsleiter und dem Fahrzeug geändert. Dies stellte heraus, dass nach außen geäußerte Haltungen nicht immer belastbar sind.

Aus der Einstellungsänderung gegenüber dem autonomen Fahren kann aber noch nicht geschlossen werden, dass derartige Angebote in der Zukunft auch als Verkehrsmittel gewählt werden. Wie in den Interviews (siehe Kapitel 4.2.1.3) bereits diskutiert, wird die Wahl des Verkehrsmittels anhand

PAVE

vielfältiger Faktoren individuell entschieden. Faktoren wie Komfort, Schnelligkeit, Kosten, Usability, Umweltverträglichkeit und persönliche Präferenzen werden nach wie vor abgewogen und stehen mit den anderen Mobilitätsalternativen in Konkurrenz. Das Durchbrechen der anfänglichen Ablehnung von selbstfahrenden Fahrzeugen ist somit der erste Schritt, um als mögliche Alternative im täglichen Verkehr wahrgenommen zu werden. Der wichtigste Faktor ist dabei ein nachhaltiges Vertrauen gegenüber der Technik zu generieren. Dabei ist zu beachten, dass bereits ein negatives Ereignis, wie z.B. ein Unfall, dieses Vertrauen erschüttern kann und zu einer Rückkehr der Ablehnung führen kann. In den Medien berichtete Unfällen mit selbstfahrenden Fahrzeugen bestärken schon heute die Unsicherheit gegenüber neuen automatisierten Technologien. Obwohl täglich zahlreiche Unfälle aufgrund menschlicher Faktoren geschehen, werden diese als eine gewisse Normalität hingenommen. Im Gegensatz dazu erhalten Unfälle aufgrund fehlerhafter autonomer Software oder Technik regelmäßig ein starkes mediales Echo, wodurch mögliche Gefahren viel stärker wahrgenommen werden.

Das Seemeile Projekt hatte in einer eigenen Befragung der Fahrgäste herausgefunden, dass 95% der Nutzer die Fahrt als sehr gut, bzw. als gut bewertet haben und dass 90% der Fahrgäste den Service wieder nutzen wollen. (www.see-meile.com) Hierzu ist anzumerken, dass die Seemeile kostenlos angeboten wurde. Die Rückmeldung der Nutzer und Anwohner war sehr positiv.

Diskussion “Das autonome Sammeltaxi”

Das Konzept der BVG SeeMeile kann durchaus weitergedacht werden, indem es ohne feste Routen als “On Demand Sammeltaxi” eingesetzt wird. Im Rahmen der Diskussion wurde dieses Konzept vorgestellt und durch die Teilnehmer diskutiert. Das „App-basierte Rufen von Taxis“, Uber, BerlKönig & Co. wurde bisher nur von wenigen Probanden ausprobiert und nur einzelne tun dies regelmäßig. Vielmehr werden Taxis aktuell noch per Telefon bestellt (überwiegend von der älteren Bevölkerung). Das Konzept des On Demand Sammeltaxis ist demnach für die meisten noch unbekannt und müsste den Nutzern durch Öffentlichkeitsarbeit und Marketing einfacher zugänglich gemacht werden.

Das Grundprinzip des Teilens von Fahrzeugen, um Verkehr zu reduzieren und Ressourcen einzusparen, findet große Zustimmung. Bei der sozialen Komponente, andere Menschen zu treffen, spalten sich die Probanden in zwei Gruppen. Die eine begrüßt den Kontakt mit Menschen und hat positive Assoziationen sich mit anderen ein solches Taxi zu teilen, während die andere Gruppe eher skeptisch ist sich in kleineren Fahrzeugen mit Fremden aufzuhalten. Videoüberwachung und Notrufleinrichtungen werden von allen befürwortet, damit das Fahrzeug einen sicheren Raum darstellt. Einige Probanden schlugen das autonome Sammeltaxi als Ergänzung des ÖPNV vor, indem es als Zubringer in schlecht angebundenen Gegenden eingesetzt wird. So könnten sie in der äußeren Stadt Menschen zu S-Bahn-Stationen bringen. Skeptisch waren viele Probanden bezüglich der möglichen Umwege, die entstünden, wenn auf der Fahrt eine andere Person abgeholt werden muss und die Fahrt deswegen länger dauert. Die Bereitschaft eine längere Fahrt in Kauf zu nehmen ist nur bei einem Teil der Probanden vorhanden und sollte mit einer günstigeren Preisgestaltung “schmackhaft” gemacht werden.

Aussagen zur Rolle des Preises von autonomen Angeboten

Bereits bei den Interviews und in den Fokusgruppen spielte der Preis eine tragende Rolle bei der Frage, ob die Probanden ein autonomes Angebot nutzen würden. Durchweg liegt die Preisbereitschaft nicht über dem des heutigen Taxis. Insbesondere das autonome Sammeltaxi oder in den öffentlichen Verkehr integrierte autonome Fahrzeuge sollten keine zusätzlichen Kosten verursachen, sondern sich vielmehr in den Umweltverbund nahtlos integrieren durch reguläre Tickets oder Abo-Lösungen.

Aussagen zur Vermietung des eigenen autonomen Fahrzeugs vs. Robotaxi

Die Möglichkeit der zeitweisen Vermietung des eigenen autonomen Fahrzeugs an Dritte stieß in den Gruppendiskussionen auf wenig positives Feedback. Die Ungewissheit über den Umgang mit dem Fahrzeug, wie z.B. Verschmutzung des Innenraums überwiegt und mögliche Einnahmen durch die Vermietung sind zu gering, um Fahrzeugbesitzer davon zu überzeugen ihr Fahrzeug zu vermieten.

Da autonome Fahrzeuge sich anfänglich eher im Hochpreissegment etablieren werden und viele im Berliner Stadtgebiet auf ein Auto verzichten, wurde in den Diskussionen die Lösung des Robotaxis präferiert, um Anschaffungs- und Haltungskosten zu sparen und trotzdem eine zeitnahe Zugriffsmöglichkeit auf eine adäquate Transportmöglichkeit zu haben.

Die Lösung des Dual-Use Pkw (Kapitel 4.5., TU Berlin), bei der das eigene Fahrzeug vermietet und die Kabine abmontiert wird, erhielt einen deutlich größeren Zuspruch als den eigenen Pkw zu vermieten. Hierbei wird der eigene "Privatraum" des Fahrzeugs nicht durch andere betreten. Es wird lediglich das Fahrgestell samt Akku, Motoren und autonomer Technik an einen Dienstleister vermietet, während die Kabine in einem Hub zwischengelagert wird. Herausforderung aus Kundensicht ist das Angebot monetär attraktiv und organisatorisch reibungslos umzusetzen.

Erkenntnisse zu den Hypothesen der Mobilitätstypen

Während der Fokusgruppen wurden die Teilnehmer nach ihren Mobilitätseinstellungen und Persönlichkeitsmerkmalen analysiert, um die bisherigen Hypothesen zu den Mobilitätstypen aus den Interviews weiter zu verfeinern. Des Weiteren wurden weitere Aussagesätze gesammelt, um die Item-Entwicklung des quantitativen Fragebogens abzuschließen.

Die vier aus den Interviews hervorgegangenen Gruppen „Sensation Seeker“, Liberale (Flexible), Preisbewusste und Konservative (Starre) wurden klar wiedergefunden. Neben den bisherigen Gruppen wurden zusätzlich zwei neue Gruppen identifiziert - die ökologisch Orientierten und die Pragmatischen:

Ökologisch Orientierte

„Für eine gesunde Umwelt würde ich auch auf Dinge verzichten.“

Diese Gruppe basiert ihr Mobilitätsverhalten teilweise oder ganz darauf möglichst umweltfreundlich unterwegs zu sein. Dabei ist zu beobachten, dass in dieser Gruppe niedrige als auch hohe Einkommensschichten vertreten sind. Bei den Interviews und Fokusgruppen wurde jedoch nach tieferem Hinterfragen offensichtlich, dass sich einige Probanden nach außen ökologisch darstellten, während ihr tatsächliches Mobilitätsverhalten nicht ökologisch war. Diese Trennung von „gewünschter“ und tatsächlich „gelebter“ ökologischer Einstellung wurde in der Onlinebefragung durch gezielte Formulierungen versucht zu unterscheiden.

Pragmatische

„Ich nutze die Fortbewegungsmittel, die mir am einfachsten zur Verfügung stehen.“

Die Gruppe der „Pragmatischen“ sind schwieriger einzuordnen. Zunächst zu den Liberal/Flexiblen zugeordnet, stellte sich heraus, dass dieser Typus seine Mobilitätsentscheidungen meist frei von Voreingenommenheit trifft und bei der Wahl hauptsächlich zweckdienlich orientiert ist. Das genaue Verkehrsmittel ist Nebensache, die Ortsveränderung steht im Fokus.

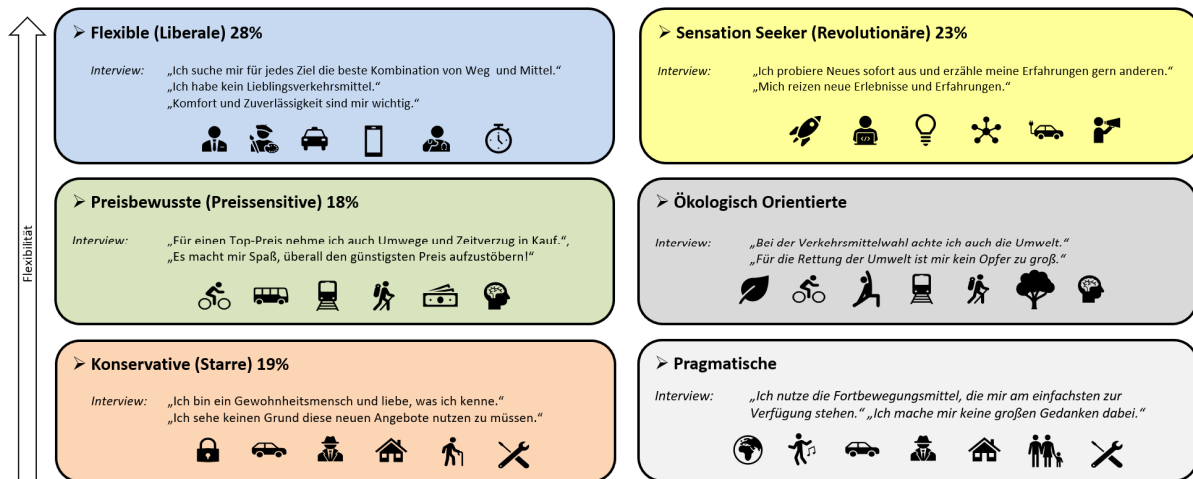


Abbildung 39: Übersicht der sechs hypothetischen Typen nach den Fokusgruppen

Nach Abschluss der Fokusgruppen wurden die sechs gefundenen Mobilitätstypen (siehe Abbildung 39) in der quantitativen Befragung durch gezielte Item-Abfrage auf ihre Prävalenz in der Population untersucht.

Beispiele von Aussagesätzen zu AVF für die Entwicklung von Fragebogenitems

Gruppe 1 (Vorruheständler und Ältere)

- „Also mit autonomen Fahrdiensten würde ich in den Verkehr zurückkehren...“
- „Mit autonomer Unterstützung könnte ich bedeutend länger mobil bleiben (im Alter).“
- „Ein autonomes Auto könnte mich statt Taxi auf Krankenkasse preiswerter zum Arzt bringen.“
- „Mit einem autonomen Auto bräuchten wir bei Städtereisen gar keine Hotels mehr.“

Gruppe 2 (Berufstätige)

- „Da müsste ich nicht mehr mitfahren, die Kinder zur Schule bringen und abholen.“
- „Ich würde mich auf der Arbeit absetzen lassen und dann den Wagen zu meinem Partner schicken.“
- „Herrlich – nie wieder Parkplatzsuche.“
- „Das Ding wäre ja ein Roboter – dann kann er ja ohne mich auch Aufgaben erledigen.“

Gruppe 3 (Autofahrer)

- „Mir macht selbst Autofahren schon Spaß – ich will eine Umschaltmöglichkeit.“
- „Das muss auf jeden Fall MEIN Auto bleiben.“
- „Mit ständigem, sofortigen, preiswerten Zugriff auf Mobilität, bräuchte ich kein eigenes Auto mehr.“
- „An öffentlichen Verkehrsmitteln stört mich das viele Elend, was man sieht.“

Gruppenübergreifend

- „Man müsste „unter sich“ bleiben können – gern in Mini-Bussen.“
- „Das wird sich alles nur durchsetzen, wenn es Vorteile hat – extra zahlen würde ich eher nicht.“
- „Ich würde mir mein kleines fahrendes Kuscheleckchen einrichten: schlafen, arbeiten, spielen, lesen.“
- „In meinem autonomen Auto wird es eine Kaffeemaschine und ein WC geben.“
- „Im autonomen Auto will ich auch mal stehen können.“
- „Das Angebot an Robotaxis sollte vielfältig in Geschmack, Komfort und Design sein.“
- „Ich möchte meine Fahrten planen können, aber auch spontan eine Fahrt anfordern können.“
- „Ich würde mehr zahlen, um schneller (bevorzugt) ans Ziel zu kommen.“
- „Ich würde Umwege und Extra-Zeit in Kauf nehmen, wenn die Kosten dadurch drastisch sinken.“

4.2.1.5 Onlinebefragung zur Ermittlung von Mobilitätstypen

Untersuchungsdesign der Onlinebefragung

Der letzte Schritt der Untersuchung war die Durchführung und Auswertung einer repräsentativen Onlinebefragung in Berlin zum Thema Mobilität. Kernfokus lag hierbei auf der Erhebung von Daten zu Mobilitätsverhalten und -einstellungen, insbesondere in Bezug auf Anwendungen des autonomen Fahrens. Dazu zählen unter anderem Faktoren & Attribute zu den untersuchten Use Cases, wie z.B. Zahlungsbereitschaften, Wechselbereitschaften, Akzeptanz von Wartezeiten und psychologische Affinitäten zu bestimmten Mobilitätsangeboten.

Zwar liefern Onlinebefragungen aus Access-panels keine absolut repräsentativen Ergebnisse, da mit dieser Erhebungsmethode vor allem Internetuser erreicht werden. Allerdings gehen wir davon aus, dass die Zielgruppe der Kommunikation eher internetaffin und damit online gut erreichbar ist. Weiterhin bietet die Onlinebefragung den Vorteil, Motivvorlagen zeigen zu können und eine breite regionale Streuung der Stichprobe sicherzustellen.

Die Onlinebefragung hatte das Ziel, die Mobilitätseinstellungen von ca. 1000 Probanden anhand eines standardisierten Fragebogens zu ermitteln, um Rückschlüsse auf die Verteilung von Mobilitätstypen zu erhalten. Weiterhin sollten valide Kenntnisse bezüglich Differenzierungsfaktoren zwischen verschiedenen Mobilitätstypen sowie mögliche gesellschaftliche Wirkungen von neuen Mobilitätsangeboten gewonnen werden.

Der Fragebogen (Siehe Anhang) umfasste 142 Items, dessen Ergebnisse zur Auswertung der Mobilitätstypen und weiteren Kennzahlen im Projekt analysiert wurden.

PAVE

Um ein möglichst breites Spektrum zu gewährleisten, wurden im Fragebogen folgende Themen integriert:

1. Allgemeine Einstellungen
2. Mobilitätseinstellungen
3. **Autonomes Fahren** & alternative Antriebe
4. Mobilität in der Corona Pandemie
5. Mobilitätsausstattung
6. Verkehrsmittelnutzung & vermutete Nutzung von autonomen Angeboten
7. Big-5 Persönlichkeitsmerkmale
8. Soziodemographische Angaben

Nachfolgend finden sich die Eckpunkte des Untersuchungsdesigns der Befragung.

Untersuchungsdesign der Onlinebefragung

- Grundgesamtheit
 - 1.004 Befragte
 - Deutschsprachige Berliner Wohnbevölkerung zwischen 16 und 75 Jahren.
- Inhalt
 - Statements zum Mobilitätsverhalten, Einstellungen, Autonomes Fahren, Corona Pandemie, Mobilitätsausstattung & Verkehrsmittelnutzung, Big-5 Persönlichkeitsmerkmale, Soziodemographie
- Gewichtung
 - bevölkerungsrepräsentative Gewichtung des vollständigen Datensatzes nach den Merkmalen Alter, Geschlecht, Schulbildung, Stadtbezirk
- Methodik & Auswahlverfahren
 - CAWI: Quotierte Zufallsauswahl aus einem aktiv rekrutierten Online-Accesspanel.
- Fehlerspanne
 - Fehlerspanne +/- 3,1 Prozentpunkte bei 1.004 Befragten (Anteilswert 50%, Sicherheitswahrscheinlichkeit 95%)
- Länge des Fragebogens
 - 142 Items
- Beantwortungsdauer:
 - ø 17 Minuten
- Feldzeit:
 - 18.12.20 – 11.01.2021

Die bevölkerungsrepräsentative Gewichtung nach den Merkmalen Alter, Geschlecht & Haushaltssituation ist in der nachfolgenden Grafik dargestellt.

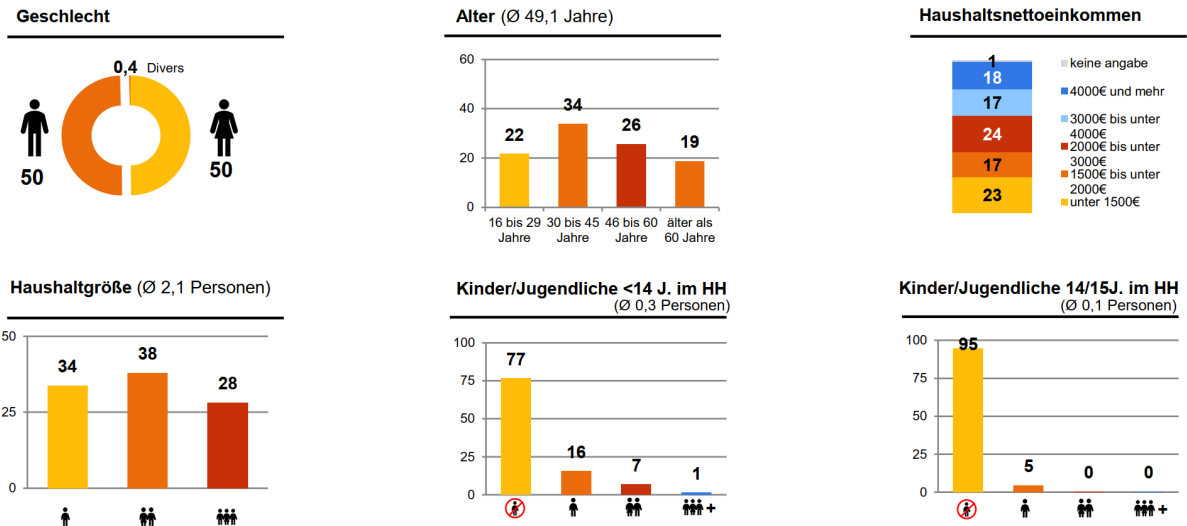


Abbildung 40: Statistik der Probanden (Angaben in %, Basis alle 1.004 Befragten)

Die wissenschaftliche Fragestellung, die Hypothesenbildung und die Gesamtmethodik wurde vom Projektteam INA/CBA entwickelt, inkl. Vorgabe der Auswertungsverfahren.

Mobilitätstypen - Beschreibung & Charakterisierung

Auf Grundlage einer Faktoren- und anschließender Clusteranalyse wurden sechs Mobilitätstypen ermittelt. Hierbei wurden die Hypothesen der qualitativen Tiefeninterviews und der Fokusgruppen überprüft. Vier Typen haben sich direkt bestätigt: Sensation Seeker, Preissensitive, Konservative & Liberale. Die Gruppe der Pragmatischen (nach den Fokusgruppen) hatte in ihren Ausprägungen starke Ähnlichkeiten mit der Gruppe der Liberalen. Aus diesem Grund wurden diese beiden Gruppen in Form der „Liberalen“ (Flexible) zusammengefasst.

Zusätzlich ergab die Auswertung der Clusteranalyse, dass sich die Gruppe der ökologisch Orientierten in zwei Subgruppen unterteilen lässt: Technikaffine und technikskeptische Umweltbewusste.

Die prozentuale Verteilung der sechs ermittelten Mobilitätstypen ist in der folgenden Grafik abgebildet.

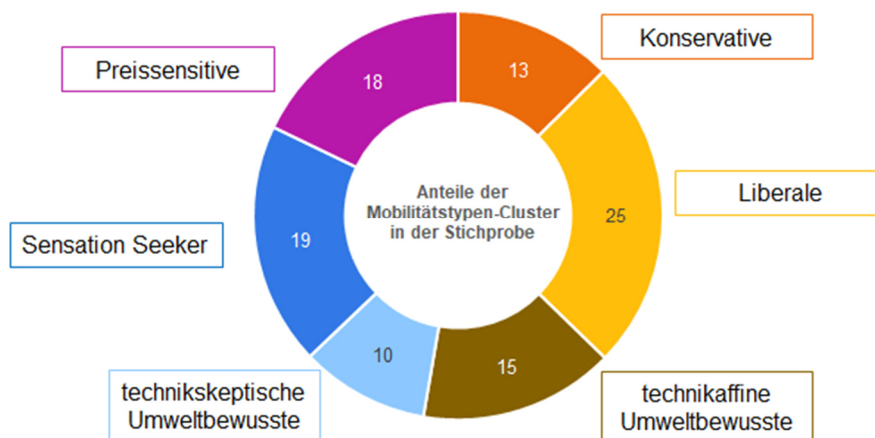


Abbildung 41: Verteilung der Mobilitätstypen (Angaben in %, Basis alle 1.004 Befragten)

Vergleich der Segmente über Big5 Superfaktoren

Die Befragten wurden zudem bezüglich ihrer Persönlichkeitsmerkmale mit Hilfe eines multivariaten Analyseverfahrens in zwei Gruppen unterteilt. Die klassischen Big5 Persönlichkeitsmerkmale können in zwei Superfaktoren verdichtet werden. (DeYoung 2002)

- „**Flexibilität**“ umfasst die Faktoren Extraversion und Offenheit.
- „**Stabilität**“ umfasst die Faktoren Verträglichkeit, Gewissenhaftigkeit und Neurotizismus.

Beide Gruppen haben in der Gesamtstichprobe einen Anteil von 50 Prozent. Die Einteilung in Flexibilität und Stabilität wird in den folgenden Steckbriefen der Mobilitätstypen dargestellt.

Modalgruppen

Zur Bewertung der Teilnehmerstruktur wurden Modalgruppen gebildet, welche ebenfalls in den Steckbriefen der Mobilitätstypen abgebildet ist. Dazu wurden die Teilnehmer nach ihrem hauptsächlich genutzten Verkehrsmittel im Alltag befragt (Nutzung mind. einmal pro Woche oder öfter). Als Einschätzungszeitraum war die Zeit vor der Corona-Pandemie angegeben.

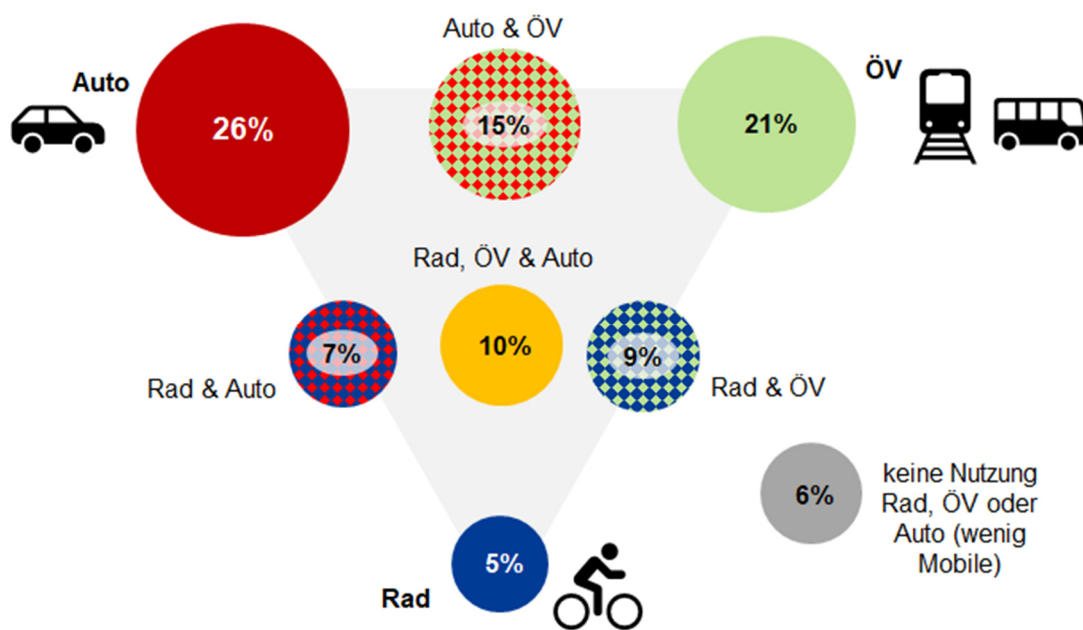


Abbildung 42: Auswertung der Modalgruppen analog MiD 2017

Hauptsächlich genutzte Verkehrsmittel (Angaben in %, Basis alle 1.004 Befragten)

Es ist anzumerken, dass das Mengengerüst der Mobilitätstypen (Differenzierung über Persönlichkeits- und Mobilitätseinstellungen) in der Realität nicht absolut trennscharf sein muss. Menschen können auch Attribute mehrerer Gruppen aufweisen. Für eine Marktsegmentierung zeichnen sich jedoch deutliche Tendenzen übereinstimmender Grundeinstellungen innerhalb der Gruppen ab.

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Einstellungstypen beschrieben, insbesondere in Bezug auf ihre Affinität zum autonomen Fahren.

Sensation Seeker

Die „Sensation Seeker“, die Neugier an neuen Entwicklungen zeigen, haben in der Stichprobe einen Anteil von 19 Prozent. Sie sehen Mobilität als Möglichkeit auf freie Entfaltung, Spaß und Lifestyle. Auch Status & Prestige spielen eine große Rolle.

Das autonome Fahren wird mit 40 % befürwortet, 53 % sind eher unentschieden. Der „Sensation Seeker“ ist im Sinne der Big 5 der flexibelste Mobilitätstyp.

Die Befragten des Typs „Sensation Seeker“ arbeiten im Wesentlichen Vollzeit, haben Abitur und einen Hochschulabschluss. Das Durchschnittsalter beträgt 39 Jahre.

Typische Aussagen:

- „Neues probiere ich gern sofort aus.“
- „Ich erkläre gern anderen neue Trends.“
- „Für mich ist ein aufregendes Fahrerlebnis wichtig“

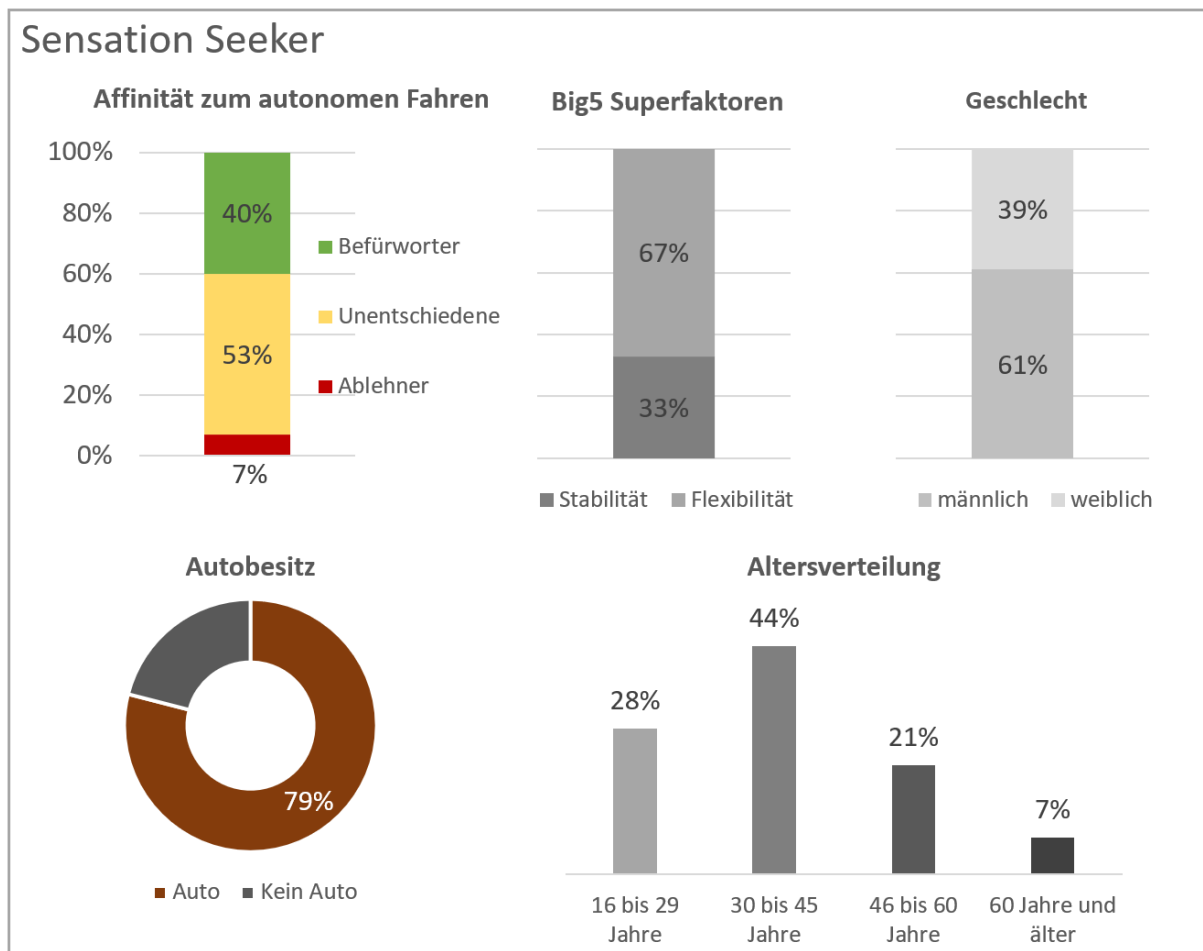


Abbildung 43: Steckbrief Mobilitätstyp „Sensation Seeker“

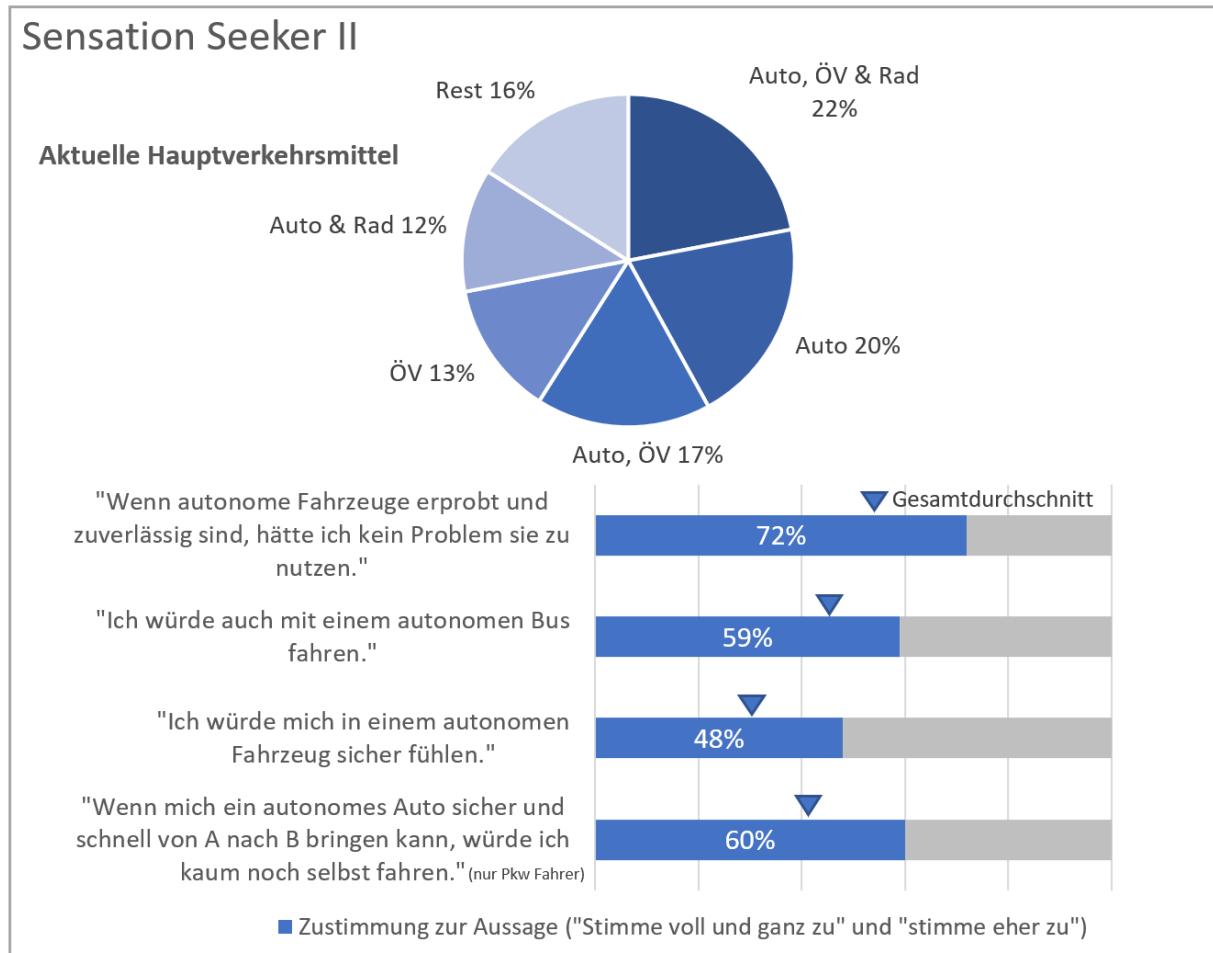


Abbildung 44: Steckbrief Mobilitätstyp "Sensation Seeker"

Sensation Seeker sind in Ihrer Grundeinstellung offen für Neues und scheuen sich nicht Gewohnheiten zu verändern. Digitalisierung wird als klarer Fortschritt gesehen, der die Menschheit voranbringt. Sensation Seeker agieren oft als Meinungs-Multiplikator und legen großen Wert auf ein aufregendes Fahrerlebnis. Sie sind die wichtigste Gruppe in der Hochlaufphase der autonomen Technologien. Sie besitzen Ähnlichkeiten mit der Gruppe der Technologieaffinen und stimmen der Aussage zu, dass „autonom fahrenden Autos die Zukunft gehört“.

Sensation Seeker halten nach den technikskeptischen Umweltbewussten eine City-Maut für Pkw am ehesten für angemessen. In diesem Segment besitzen 79% ein Auto, sind aber trotzdem auch häufig mit anderen Verkehrsmitteln unterwegs. Sie können sich im Vergleich zu den anderen Gruppen überdurchschnittlich oft vorstellen ihr eigenes Auto abzugeben. Sensation Seeker haben die höchste Zahlungsbereitschaft aller Gruppen in der Stichprobe und sie sind am ehesten offen dafür sich ein Elektroauto anzuschaffen. Dazu haben sie eine hohe Wechselbereitschaft bezogen auf das Verkehrsmittel, um schneller am Ziel anzukommen.

Technikaffine Umweltbewusste

Insgesamt 15 Prozent zählen zu den „technikaffinen Umweltbewussten“, die neuen Technologien gegenüber offen sind und trotzdem eine ökologische Grundeinstellung besitzen.

Das autonome Fahren wird mit 65 % befürwortet, womit diese Gruppe an der Spitze der Mobilitätstypen liegt.

Die ökologischen Auswirkungen von Verkehr & Mobilität werden von diesem Typ sehr bewusst wahrgenommen und es besteht eine große Nachfrage nach nachhaltigen, innovativen Lösungen.

Die Befragten des Typs „Technikaffine Umweltbewusste“ arbeiten häufiger im Homeoffice, haben Abitur und einen Hochschulabschluss. Das Durchschnittsalter beträgt 41 Jahre.

Typische Aussagen:

- „Für eine gute Sache kann man auch Einschränkungen in Kauf nehmen.“
- „Digitalisierung wird die Menschheit weiterbringen.“
- „Autonom (also ohne Fahrer/in) fahrenden Autos gehört die Zukunft.“

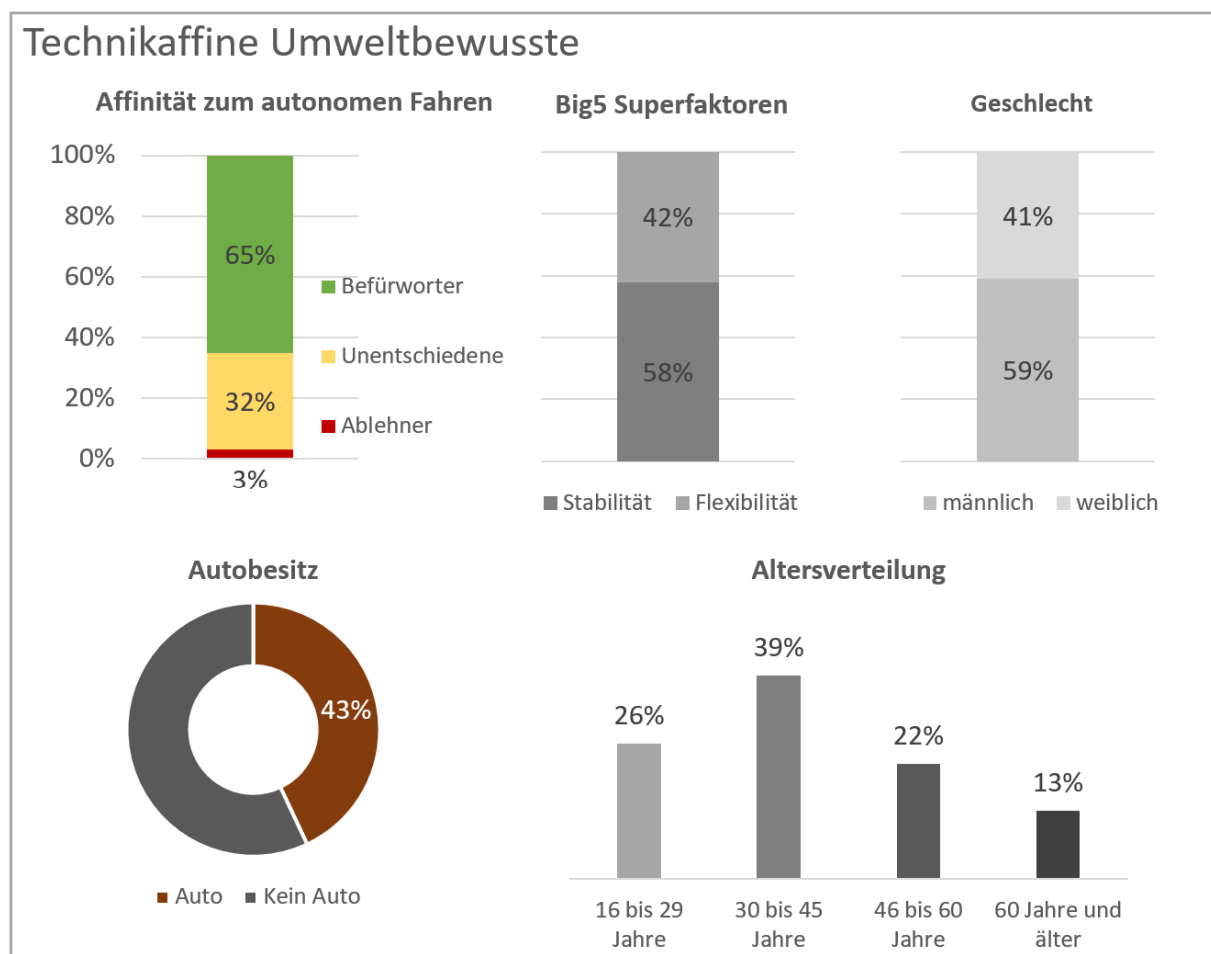


Abbildung 45: Steckbrief Mobilitätstyp „Technikaffine Umweltbewusste“

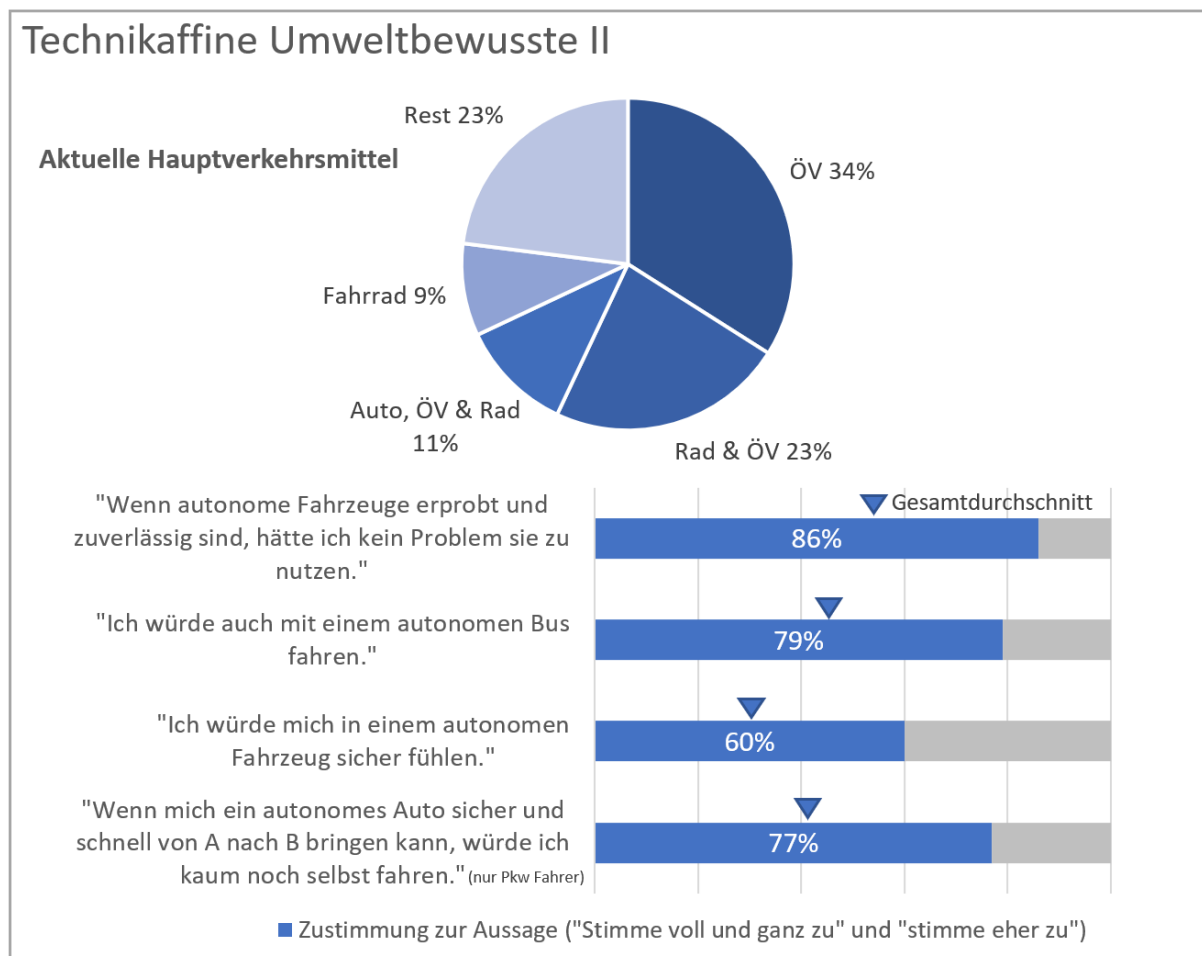


Abbildung 46: Steckbrief Mobilitätstyp "Technikaffine Umweltbewusste"

Das Segment der technikaffinen Umweltbewussten zeichnet sich durch ein hohes Vertrauen in Digitalisierung und autonomes Fahren aus. Neue Technologien wie die Elektromobilität werden stark nachgefragt, während der Besitz eines eigenen Autos an Stellenwert verliert. Diese Gruppe ist am ehesten bereit, Vorgaben des Gesetzgebers, wie z.B. eine City-Maut, in Kauf zu nehmen, um „dem großen Ganzen“ zu dienen. Es besteht eine hohe Toleranz bei der Anpassung an neue Gebote und Angebote. Die Autofahrer in dieser Gruppe könnten, ähnlich wie die technikskeptischen Umweltbewussten, am ehesten auf ihr Auto verzichten.

Diese Gruppe besitzt die höchste Überzeugung, dass „autonom fahrenden Fahrzeugen die Zukunft gehört“. Neben der Affinität für Technologie setzt diese Gruppe einen hohen Stellenwert auf eine ökologisch nachhaltige Gesellschaft. Diese Gruppe besitzt den höchsten Anteil an ÖPNV Nutzern und sie sprechen sich am stärksten für fußgängerfreundlichere Innenstädte aus. Über die Hälfte befürwortet ein grundsätzliches Tempo 30 in der Stadt. Sie sind sehr interessiert an neuen Mobilitätsangeboten und zeigen den meisten Zuspruch zur Idee, sich Fahrten mit anderen zu teilen. Trotz hohem Zuspruch zum autonomen Fahren, wollen Autofahrer dieser Gruppe weiterhin die Kontrolle über das eigene Fahrzeug besitzen. Autonome Shuttle, die erprobt und sicher sind, würden sie jedoch auch zu hohen Anteilen nutzen.

Technikskeptische Umweltbewusste

Die Gruppe der „technikskeptischen Umweltbewussten“, die Verbrennungsmotoren abschaffen möchte und gleichzeitig dem autonomen Fahren gegenüber skeptisch gegenüberstehen, hat einen Anteil von 10 Prozent.

Das autonome Fahren wird mit 49 % abgelehnt, 42 % sind eher unentschieden.

Dieser Typ hat einen eher niedrigen sozioökonomischen Status, eine Ausbildung der mittleren Reife und ist mit 51 Jahren im Durchschnitt am ältesten. Die Befragten des Typs sind häufig nicht berufstätig oder befinden sich bereits im Ruhestand. Auch liegt die Nutzung von Smartphones etwas unter dem Durchschnitt.

Typische Aussagen:

- „Für die Rettung der Umwelt ist mir kein Opfer zu groß.“
- „Verbrennungsmotoren sind Klimakiller.“
- „Wenn der einzelne Mensch sein Verhalten nicht ändert, muss der Gesetzgeber eben nachhelfen.“

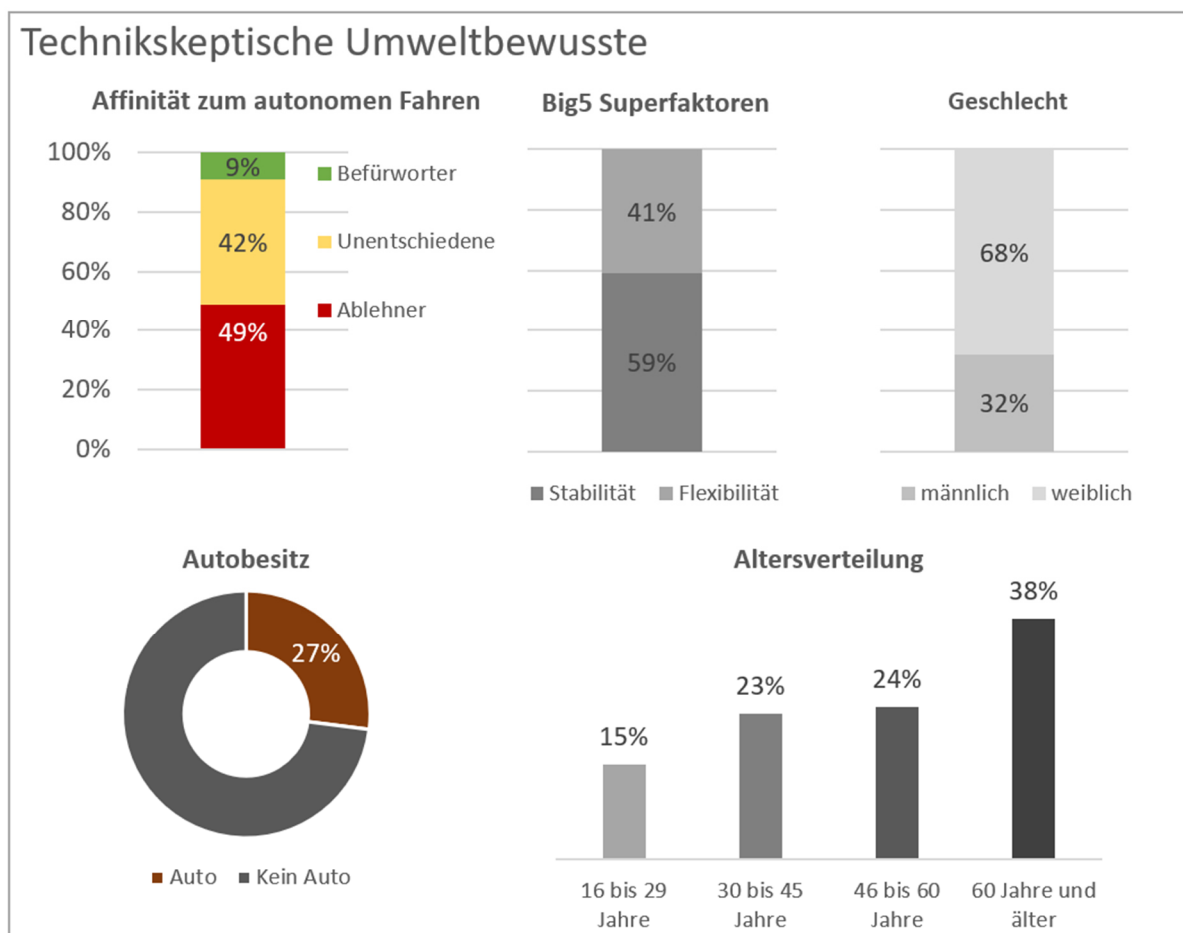


Abbildung 47: Steckbrief Mobilitätstyp „Technikskeptische Umweltbewusste“

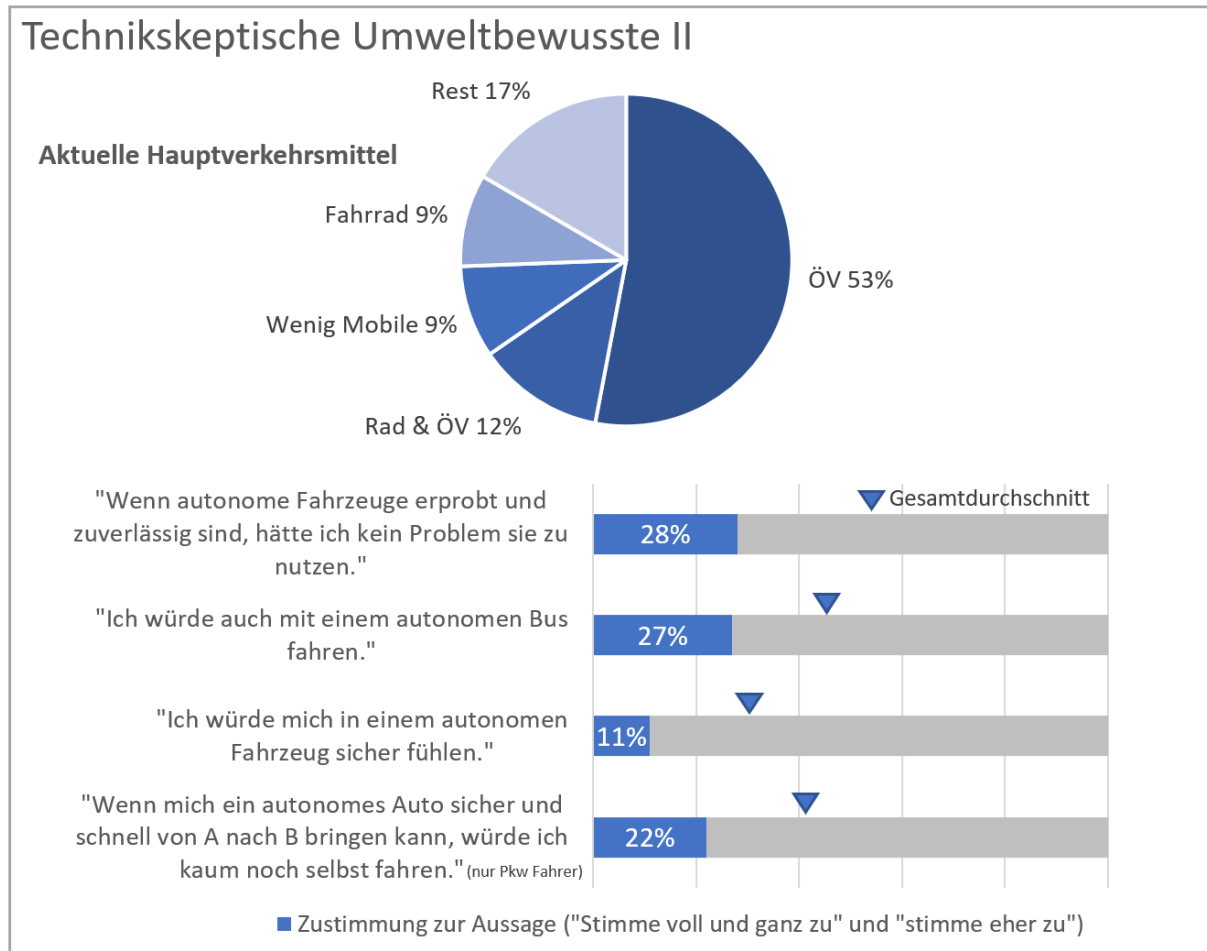


Abbildung 48: Steckbrief Mobilitätstyp "Technikskeptische Umweltbewusste"

Die Gruppe der technikskeptischen Umweltbewussten fällt auf durch ihr hohes Durchschnittsalter und einem hohen ÖPNV Anteil. Im Alltag wird gern zu Fuß gegangen und am wenigsten das Auto genutzt. In neue Technologien, wie das autonome Fahren, haben sie geringes Vertrauen verbunden mit einer geringen Zahlungsbereitschaft für Mobilitätskomfort.

Autobesitzer dieser Gruppe können sich in der Mehrheit sehr gut vorstellen ihr Auto abzugeben. Um diese Gruppe für autonomes Fahren zu begeistern, muss es preisgünstige, einfach zu nutzende Angebote mit geringen physischen und psychischen Eintrittsbarrieren geben.

Preissensitive

Für die „Preissensitiven“ (18%) stehen die Kosten bei der Auswahl eines Verkehrsmittels im Vordergrund. Sie haben ein begrenztes Mobilitätsbudget und suchen häufig nach der preisgünstigsten Alternative. Die Bereitschaft, das eigene Auto abzugeben, ist jedoch begrenzt.

Das autonome Fahren wird von 60 % abgelehnt und ist damit der Mobilitätstyp mit der deutlichsten negativen Meinung. Nur 5% befürworten das autonome Fahren.

Die Befragten des Typs Preissensitive sind im Wesentlichen Facharbeiter, haben einen Abschluss der mittleren Reife und einen mittleren sozioökonomischen Status. Das Durchschnittsalter beträgt 49 Jahre.

Typische Aussagen:

- „Es macht mir Spaß, für meine Fahrten die preisgünstigste Route auszutüfteln.“
- „Lieber bin ich etwas länger unterwegs, als zu viel Geld auszugeben.“
- „Für meine Mobilität habe ich ein begrenztes finanzielles Budget.“

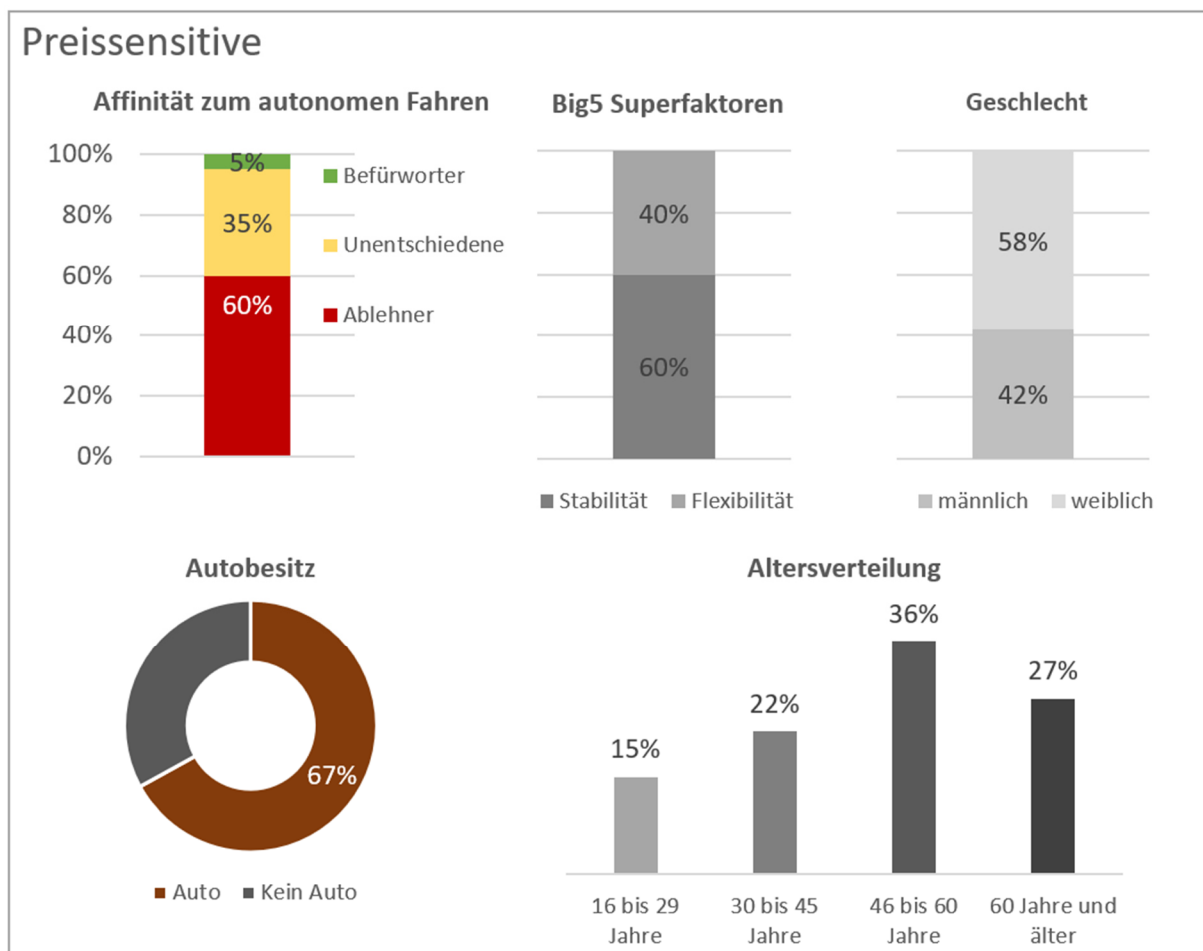


Abbildung 49: Steckbrief Mobilitätstyp „Preissensitive“

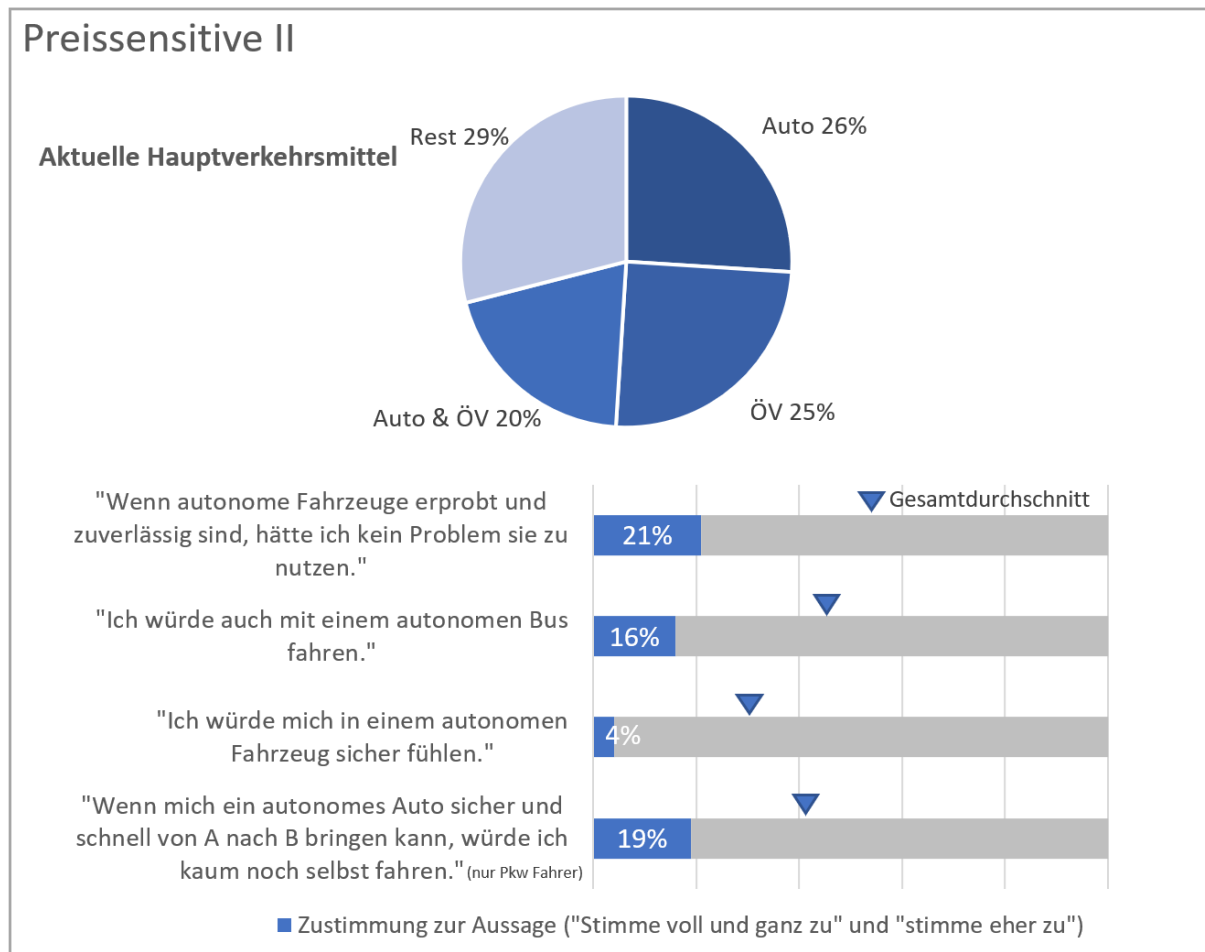


Abbildung 50: Steckbrief Mobilitätstyp "Preissensitive"

Die Art des Verkehrsmittels für Preissensitive ist weniger wichtig, da das Budget die tragende Rolle bei der Wahl spielt. Folglich ist diese Gruppe am ehesten bereit Umwege in Kauf zu nehmen, um günstiger ans Ziel zu kommen.

Diese Gruppe könnte potenziell mit kostengünstigen autonomen Sammeltaxi-Lösungen angesprochen werden, wobei das Angebot idealer Weise Bestandteil des ÖPNV Abonnements sein sollte.

Konservative

Zu den „Konservativen“ zählen 13 Prozent. Sie haben eine starke Bindung an ihren PKW und herkömmliche Fortbewegungsmittel. Sie können sich einen Verzicht auf den PKW kaum vorstellen.

Das autonome Fahren wird von 53 % abgelehnt, 38 % sind unentschieden. Der Konservative liegt hinter den Preissensitiven mit nur 9% Befürwortern für das autonome Fahren.

Die Befragten des Typs Konservative arbeiten im Wesentlichen Vollzeit, haben einen Fach- oder Hochschulabschluss und einen hohen sozioökonomischen Status. Das Durchschnittsalter beträgt 46 Jahre und der Anteil des Big5 Superfaktors Stabilität liegt bei 58%.

Typische Aussagen:

- „Es würde mich traurig machen, auf mein Auto zu verzichten.“
- „Welches Auto ich fahre, sollte immer meine Privatsache bleiben.“
- „Ich will mein Auto stets selbst lenken.“

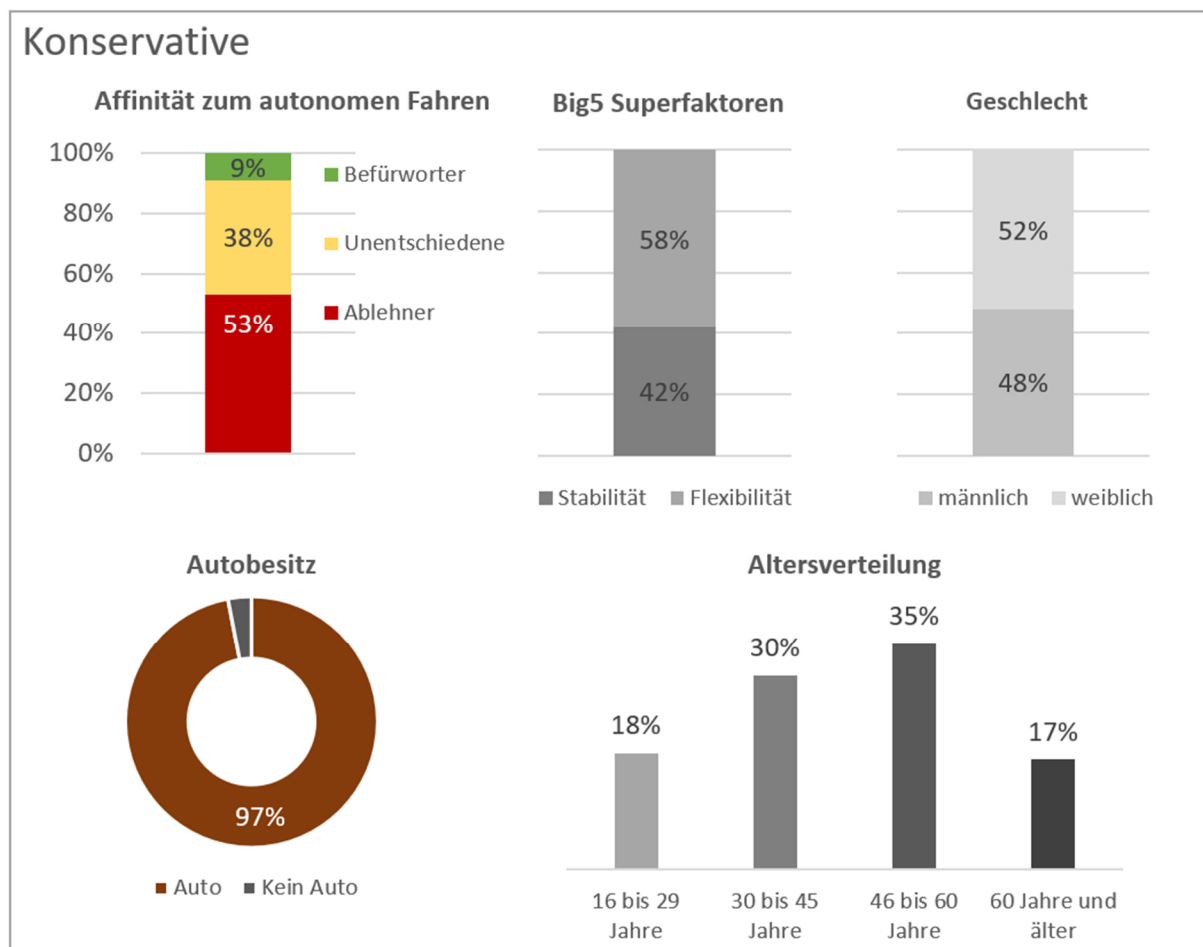


Abbildung 51: Steckbrief Mobilitätstyp „Konservative“

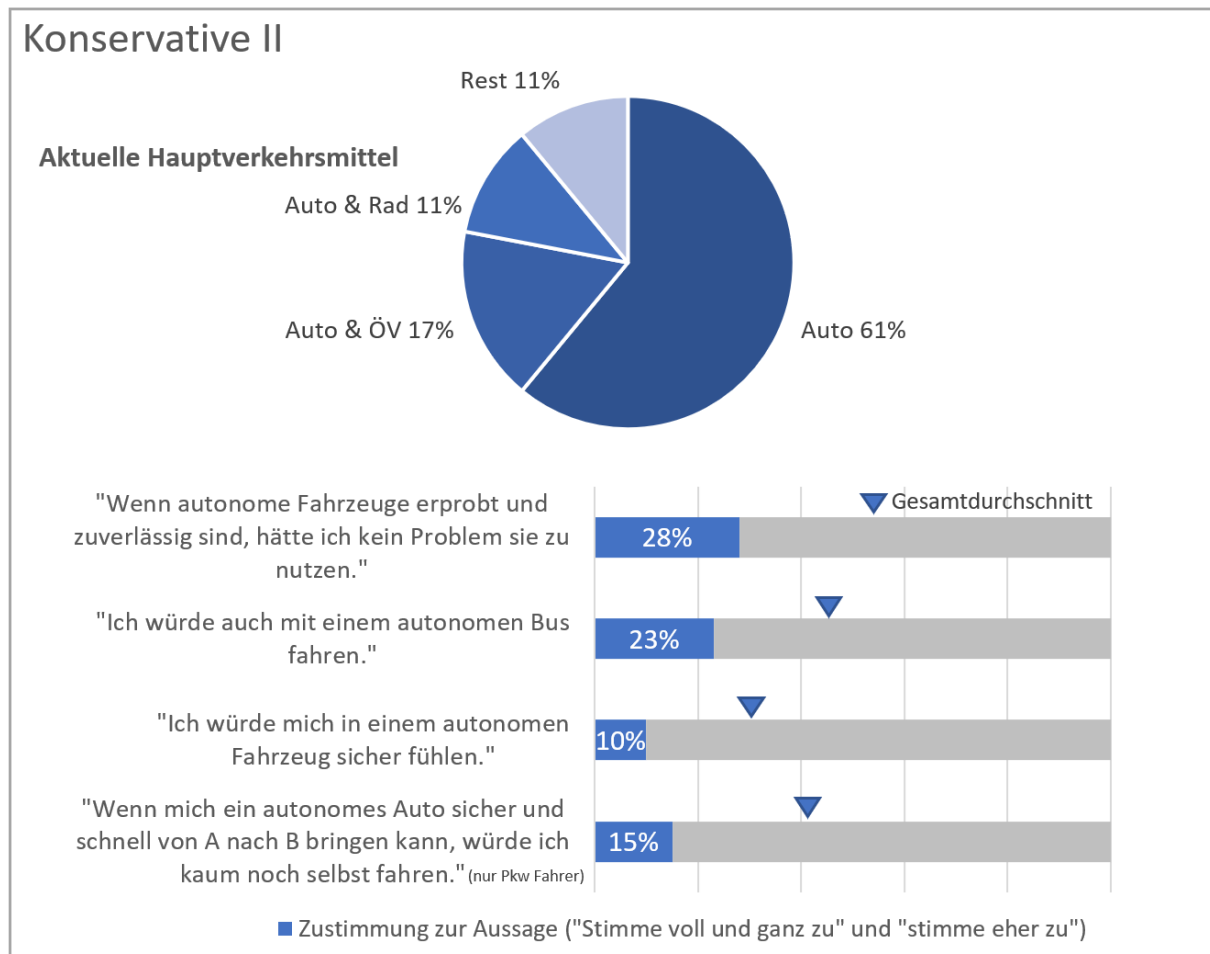


Abbildung 52: Steckbrief Mobilitätstyp "Konservative"

Die Gruppe der Konservativen besteht fast ausschließlich aus Autobesitzern. Sie lehnen es ab ihr Fahrzeug in der Zukunft abzugeben. Auch häufig sind Menschen in der Gruppe der Konservativen, weil sie beruflich auf ihr Auto angewiesen sind, oder da aufgrund körperlicher Beeinträchtigungen der ÖPNV oder das Fahrrad nicht in Betracht kommen.

Sie möchten die Kontrolle nicht einer Maschine überlassen. Um diese Gruppe für autonome Fahrzeuge zu gewinnen, müssen persönliche Vorteile vermittelt und Vertrauen geschaffen werden. Ihr persönliches Fahrzeug wollen sie mehrheitlich stets selbst lenken. Der Verzicht auf Gewohnheiten und Privilegien wird vehement abgelehnt. Ein Angebot mit hohen Komforteigenschaften könnte diese Gruppe für autonome Services gewinnen. Da eine geringe Umsteigebereitschaft besteht, können Punkt zu Punkt agierende Robotaxis hier einen Markt entdecken. Das Teilen von Fahrten wird im Vergleich am stärksten abgelehnt.

Liberale (Flexible)

Den größten Anteil in der Stichprobe haben die „Liberalen“ (25%), für die eigene Wahlfreiheit maßgeblich ist und die Stabilität bevorzugen.

Die Gruppe der Liberalen stellt bei vielen Merkmalen einen Durchschnitt der Bevölkerung dar. Sie zeigen keine großen Auffälligkeiten bei den Mobilitätseinstellungen. Trotz etwas erhöhtem Anteil beim Big5 Superfaktor Stabilität lehnen nur 14% der Liberalen das autonome Fahren ab. Es sticht heraus, dass diese Gruppe mit 57% den größten Anteil an Unentschiedenen besitzt. Liberale sind im Durchschnitt 43 Jahre alt und ausgeglichen in der Geschlechterverteilung.

Typische Aussagen:

- „Ich will niemandem vorschreiben, wie er zu leben hat.“
- „Ich nutze die Verkehrsmittel, die mir am einfachsten zur Verfügung stehen.“
- „Ich möchte mir von niemandem vorschreiben lassen, wie sich ein guter Bürger privat zu verhalten hat.“

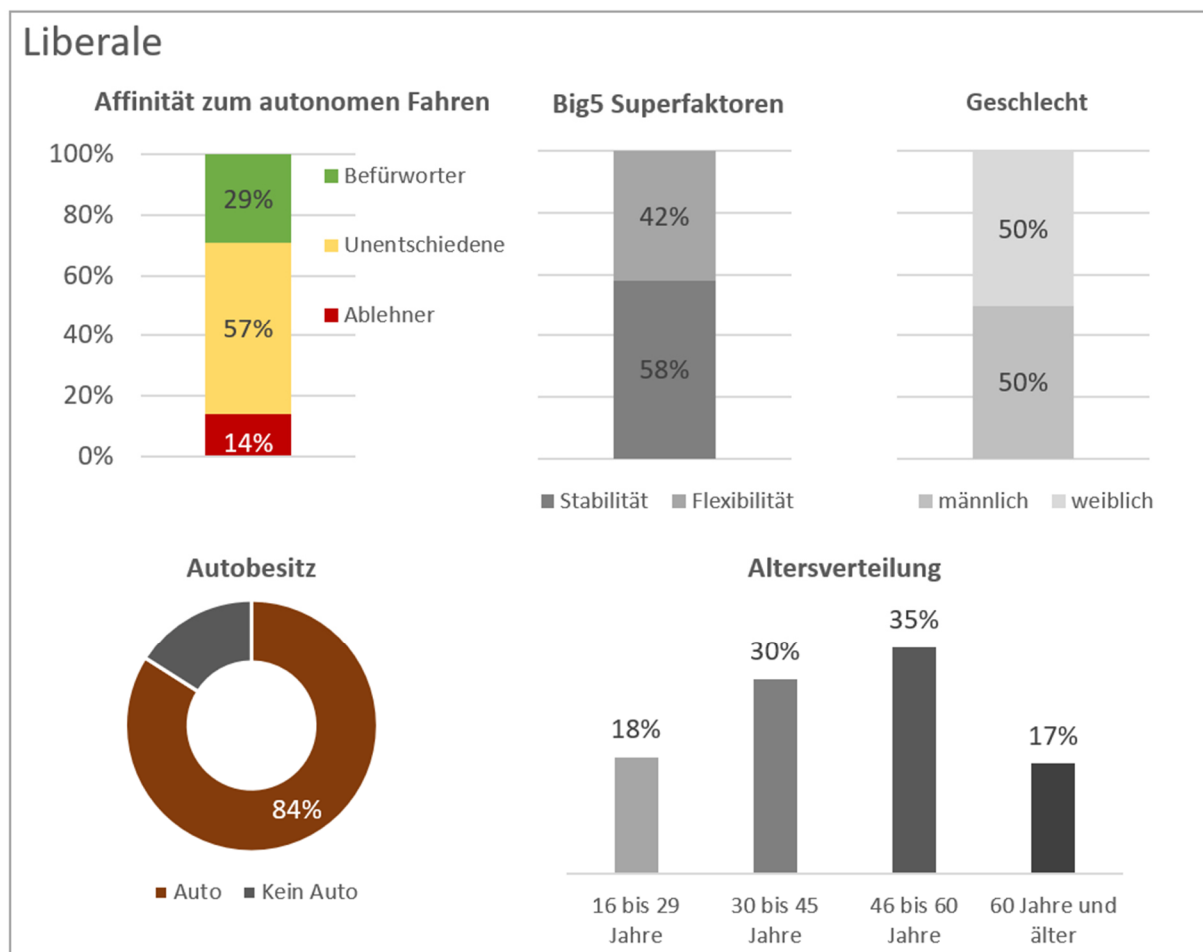


Abbildung 53: Steckbrief Mobilitätstyp „Liberale“

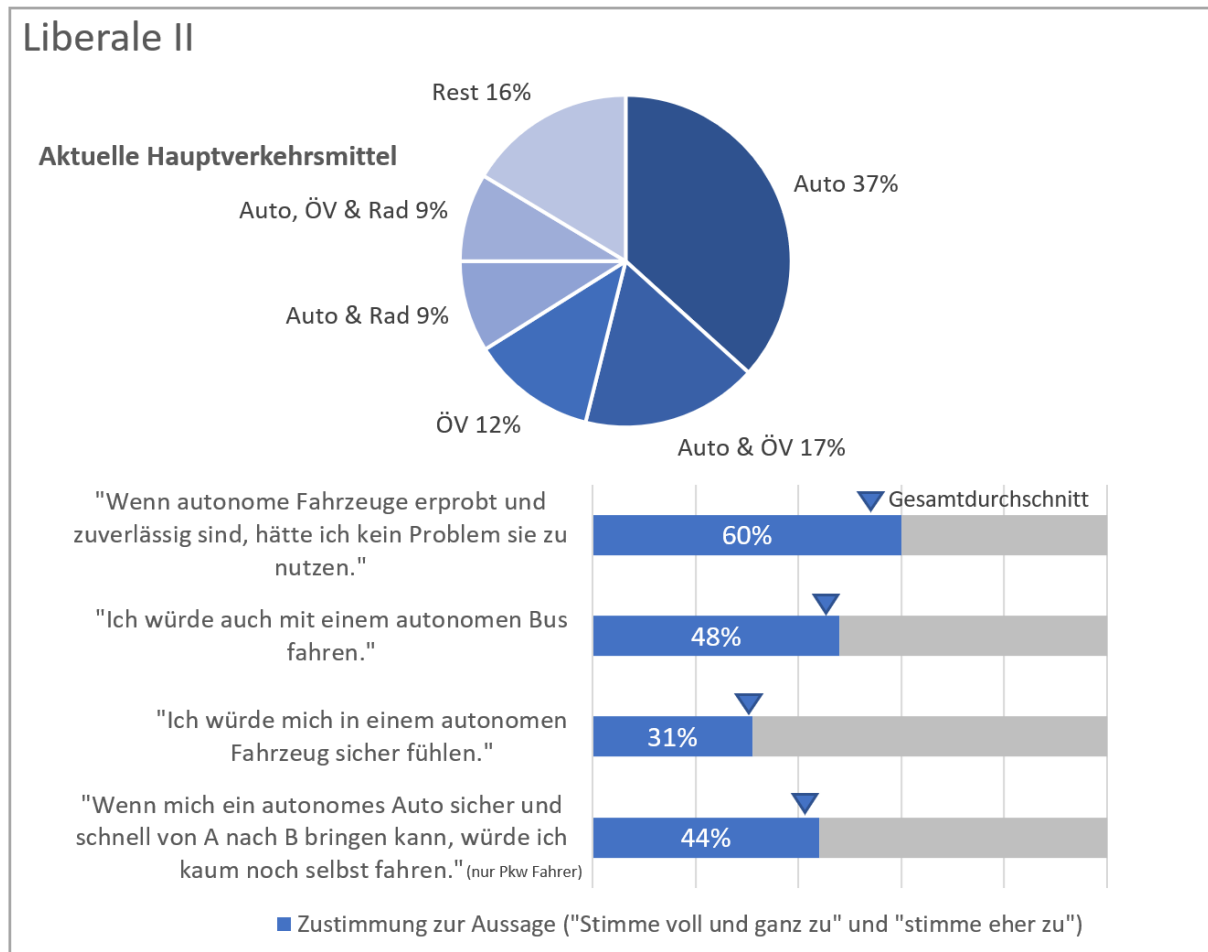


Abbildung 54: Steckbrief Mobilitätstyp "Liberaler"

Die Gruppe der Liberalen, auch Flexible genannt, zeichnet sich dadurch aus, dass sie in ihren Einstellungen und ihrem Verhalten etwa den Durchschnitt der Population repräsentiert. Sie sind in ihrem Verkehrsverhalten sehr flexibel und achten dabei, neben einfacher Verfügbarkeit, auch auf einen angemessenen Preis. Trotz ihrer Flexibilität bei der Verkehrsmittelwahl besitzen Mitglieder dieser Gruppe sehr häufig ein oder mehrere Autos und nur 28% der Mitglieder dieser Gruppe können sich vorstellen, das eigene Auto abzugeben.

In ihrer Einstellung zum autonomen Fahren gibt es im Vergleich zu den anderen Gruppen kaum Auffälligkeiten, da sie wie bereits erwähnt einen Durchschnitt darstellen. Sie sind zwar offen für autonome Angebote, können sich aber noch nicht vorstellen, dass es sich durchsetzen wird. Auch diese Gruppe könnte durch preiswerte, komfortable autonome Angebote gewonnen werden, wobei hier der direkte Konkurrenzkampf des eigenen Autos gegen neue Services eine entscheidende Rolle spielt.

Auswertung der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Befragung & die Eigenschaften der Mobilitätstypen im direkten Vergleich dargestellt und interpretiert. Der Übersicht dienend sind die Abschnitte thematisch gegliedert.

Affinität zum Autonomen Fahren

Auf der Basis von Einstellungen gegenüber dem autonomen Fahren wurden drei sogenannte „Affinitätstypen“ gebildet. Dies erfolgte mittels einer Clusteranalyse. Die Einteilung wurde anhand der Antworten auf die Fragen (siehe Anlage: Fragebogen 2.11, Items 3-15) zum autonomen Fahren getroffen.

Die größte Gruppe bilden die „**Unentschiedenen**“ (45%), die bisher noch keine feste Meinung zum autonomen Fahren haben und bei den Items häufig die neutrale Antwortkategorie belegen.

Die „**Befürworter**“ und „**Ablehner**“ des autonomen Fahrens machen jeweils einen Anteil von 28 Prozent in der Stichprobe aus und halten sich somit die Waage.

Die „Ablehner“ sehen autonome Fahrzeuge eher als eine Spielerei, die sich kaum durchsetzen wird. Zugleich könnten sie sich die Nutzung kaum vorstellen.

Dagegen stehen die „Befürworter“ autonomen Fahrzeugen offen gegenüber, würden diese als Pkw oder auch als Taxi nutzen. Sie sind eher überzeugt, dass sich solche Fahrzeuge durchsetzen werden. Allerdings wären sie derzeit kaum bereit, Mehrkosten für das autonome Fahren auf sich zu nehmen.

Innerhalb der Gruppe der „Ablehner“ sind die Mobilitätstypen „Preissensitive“ (39%) und „Konservative“ (24%) sowie „technikskeptische Umweltbewusste“ (18%) am häufigsten vertreten. Unter den „Befürwortern“ finden sich v.a. „technikaffine Umweltbewusste“ (36%), „Sensation Seeker“ (28%) sowie Liberale (25%). Unter den „Unentschiedenen“ stellen die „Liberale“ (32%) sowie die „Sensation Seeker“ (23%) den größten Anteil.

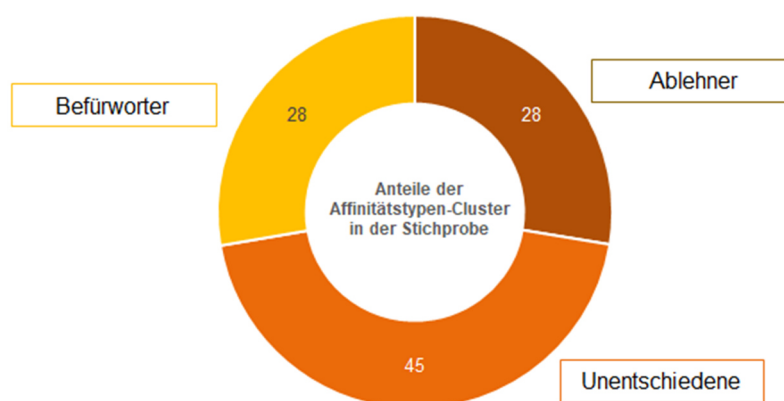


Abbildung 55: Affinität zum autonomen Fahren in der Gesamtstichprobe
(Angaben in %, Basis alle 1.004 Befragten)

PAVE

In nachfolgender Grafik sind die Mobilitätstypen bezüglich ihrer Affinität zum autonomen Fahren im Vergleich dargestellt.

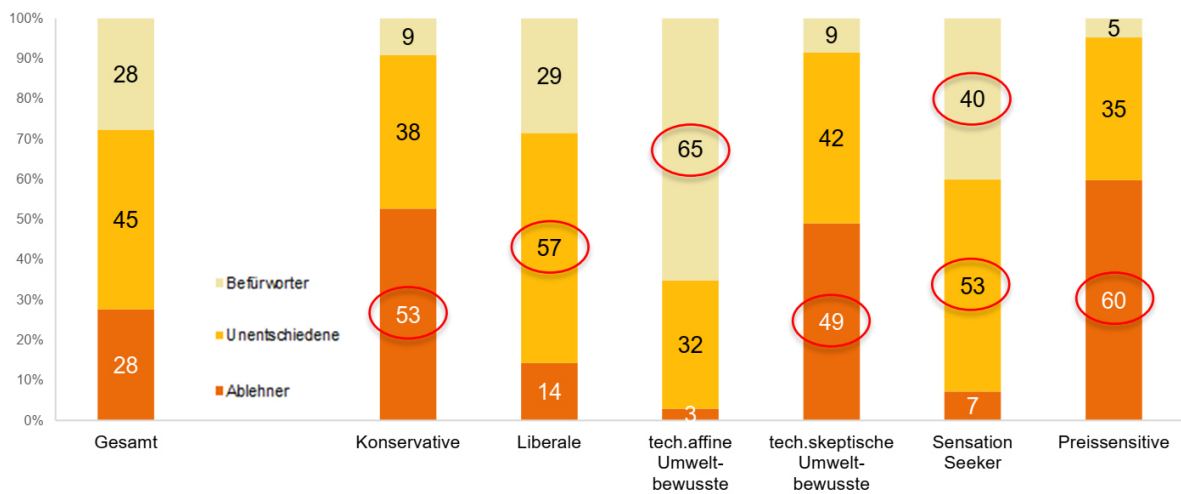


Abbildung 56: Affinität zum autonomen Fahren nach Mobilitätstypen
(Angaben in %, Basis alle 1.004 Befragten)

Neben den starken Unterschieden zwischen den einzelnen Gruppen ist hervorzuheben, dass es in allen Gruppen einen nicht unerheblichen Anteil von Unentschiedenen gibt. Genau bei diesen Gruppen ist es wichtig auf die Bedürfnisse gezielt einzugehen und Vertrauen zum autonomen Fahren aufzubauen.

Einstellungen zum Auto

Während in der Gesamtpopulation 70% der Probanden einen Pkw zu besitzen oder im Haushalt zur Verfügung zu haben, gibt es zwischen den Mobilitätssegmenten starke Unterschiede:

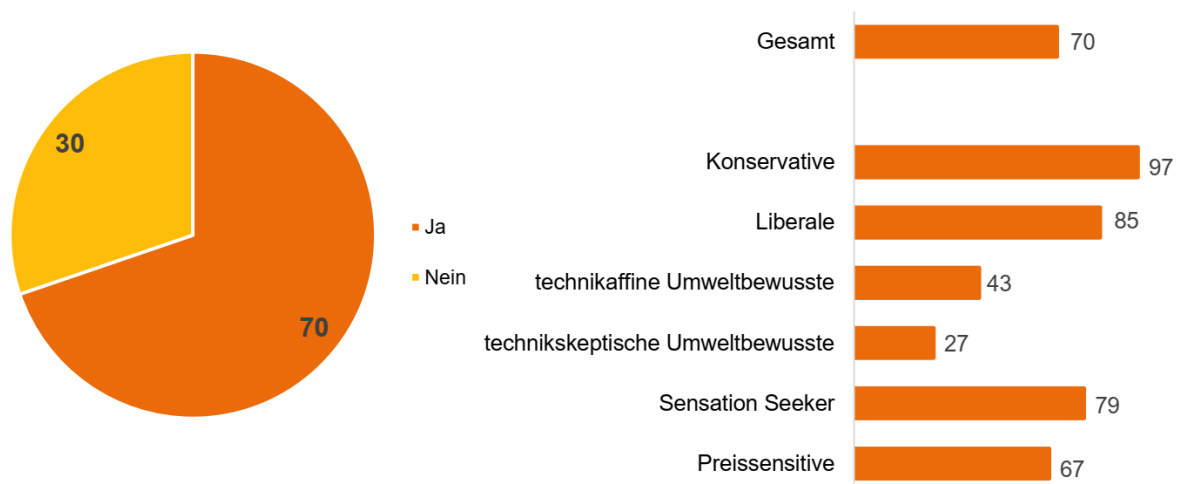


Abbildung 57: Autobesitz nach Mobilitätstyp
(Angaben in %, Basis alle 1.004 Befragten)

Neben dem Anteil an Besitz von Pkw unterscheiden sich die Mobilitätstypen auch sehr stark hinsichtlich ihrer Einstellungen zum Auto. Während die „technikaffinen Umweltbewussten“ einer möglichen City-Maut und dem Verzicht auf das eigene Auto grundsätzlich offen gegenüberstehen, wäre dies für keine andere Gruppe denkbar.

PAVE

Insbesondere die „Konservativen“, „Preissensitiven“ und „Liberalen“ stehen solchen Gedanken ablehnend gegenüber, da ein Auto nicht als zwingend notwendig angesehen wird.

Die beiden Gruppen der „Umweltbewussten“ unterscheiden sich nicht hinsichtlich ihrer Einstellungen zu Parkgebühren, zu Geschwindigkeitsbeschränkungen und zur Notwendigkeit eines Autos. Jedoch stehen die „technikskeptischen Umweltbewussten“ gravierenden Veränderungen wie einer Citymaut und dem Verzicht auf das Auto kritisch gegenüber.

Die Vorstellung, das eigene Auto abzugeben, ist nur für die Umweltbewussten und die Sensation Seeker eine mögliche Option. Ganz deutlich wird dies von den Konservativen abgelehnt.

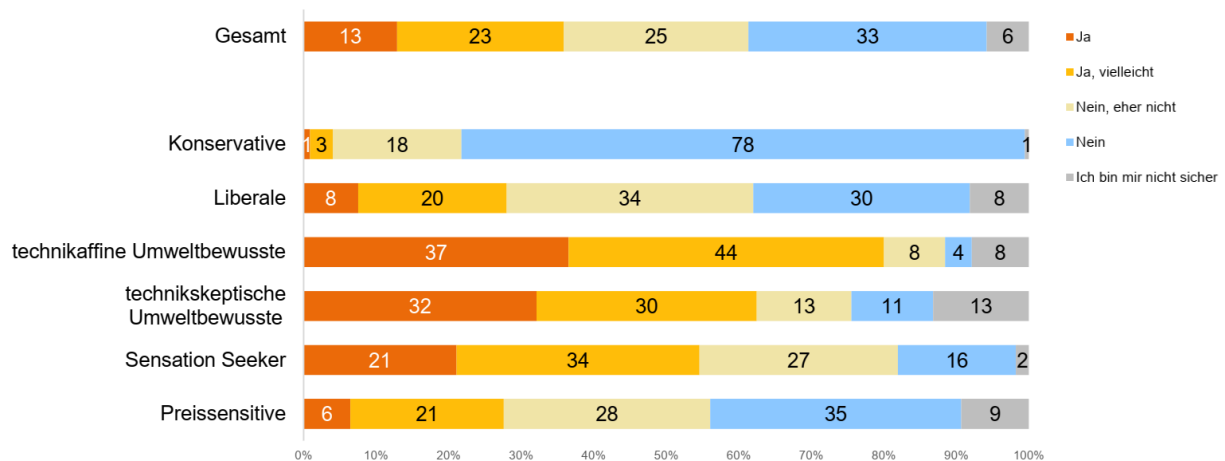


Abbildung 58: Vorstellung den eigenen PKW in der Zukunft abzugeben nach Mobilitätstypen (Angaben in %, Basis: Pkw im Haushalt, 716 Befragte)

Die Gründe für die Abgabebereitschaft des Pkw sind ebenfalls sehr verschieden, wobei akzeptable Mobilitätsalternativen, Umweltgründe und Stress die Hauptfaktoren darstellen.

	Gesamt	Konservative	Liberalen	tech.affine Umweltbewusste	tech.skeptische Umweltbewusste	Sensation Seeker	Preissensitive
Ich möchte auf meinen Pkw nicht verzichten	38	63	41	0	11	27	51
Ich brauche kein Auto und kann meine täglichen Wege gut mit...	28	6	24	68	52	34	20
Gesundheitliche Gründe, Altersgründe	26	29	32	20	22	17	29
Kosten - Den Unterhalt eines Autos möchte bzw. kann ich mir...	25	9	28	31	27	32	24
Stress - Mir ist das Autofahren zu stressig geworden. (z.B. zu viel...	22	9	23	36	28	29	14
Umwelt - Ohne Auto leiste ich einen Beitrag für eine saubere...	19	1	15	56	42	28	5
Aus anderen Gründen	4	2	5	5	11	3	3

Abbildung 59: Gründe für die Bereitschaft das eigene Auto abzugeben (Angaben in %, Basis: Pkw im Haushalt, 716 Befragte)

Autofahrer, die die autonome Fahrfunktion des eigenen Fahrzeugs ablehnen, schätzen ihre Fähigkeiten und Routine besser ein als die eines Roboters und sind nicht bereit die Verantwortung komplett abzugeben. Heutzutage gängige Sicherheitsassistenzsysteme werden durchweg positiv bewertet, was zumeist auf positive persönliche Erfahrungen mit der jeweiligen Technik zurückzuführen ist.

Alternative Antriebe

„Sensation Seeker“ und „technikaffine Umweltbewusste“ stehen alternativen Antrieben besonders positiv gegenüber. Elektro- und Wasserstoffantriebe werden von den „Sensation Seekern“ ähnlich positiv wahrgenommen. Die „technikaffinen Umweltbewussten“ scheinen von Wasserstoffautos etwas mehr überzeugt zu sein als von Elektroautos.

Für die „Liberalen“ spielt bei der Durchsetzung eines Antriebs die Verfügbarkeit von Lademöglichkeiten eine wichtige Rolle. Elektroautos werden von den skeptischen Mobilitätstypen, den „Konservativen“ und den „Preissensitiven“ etwas kritischer betrachtet als Wasserstoffautos. Elektro- und Wasserstoffantriebe können die „technikskeptischen Umweltbewussten“ nur wenig überzeugen. Tendenziell scheinen sie dem Wasserstoffantrieb negativer gegenüberzustehen als dem Elektroantrieb.

Mobilitätseinstellungen

Um die Probanden in ihrem zukünftigen Verkehrsverhalten besser einschätzen zu können, wurden sie neben ihren Einstellungen zum autonomen Fahren auch zu ihren aktuellen Mobilitätseinstellungen befragt.

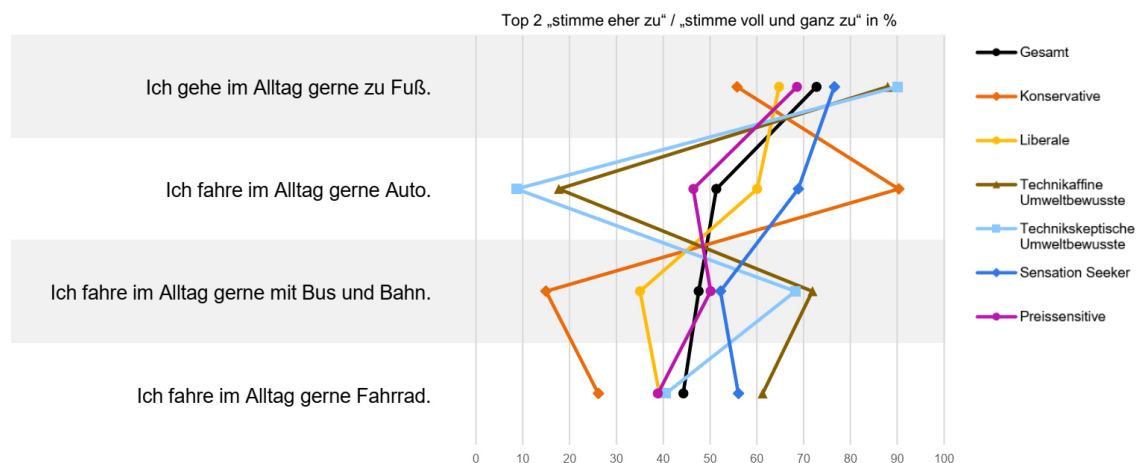


Abbildung 60: Hauptverkehrsmittel, die im Alltag „gern genutzt werden“
(Angaben in %, Basis alle 1.004 Befragten)

Bei der Beliebtheit von Verkehrsmitteln gibt es insbesondere beim Auto und beim öffentlichen Nahverkehr große Unterschiede. Während Konservative zu 90% gern im Alltag mit dem Auto fahren und nur zu 15% mit Bus und Bahn, stellen die beiden Gruppen der Umweltbewussten den Gegenpol dar. Sie fahren nur zu ca. 15% gern mit dem Auto, während sie zu ca. 70% gern mit dem ÖPNV unterwegs sind.

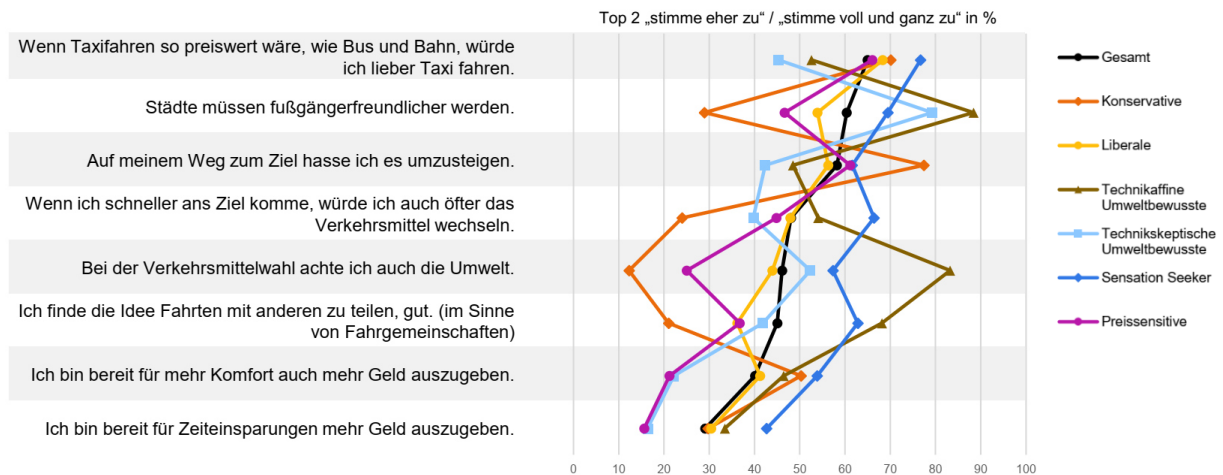


Abbildung 61: Zustimmung zu ausgewählten Mobilitätsaussagen
(Angaben in %, Basis alle 1.004 Befragten)

Bei den weiteren Mobilitätseinstellungen zeigen sich auch starke Unterschiede bei den Aussagen zur Fußgängerfreundlichkeit von Städten, Umweltaspekten und zur Bereitschaft Fahrten zu teilen. Bei der Verkehrsmittelwahl werden insbesondere Auswirkungen auf die Umwelt stark unterschiedlich gewichtet und auch Zahlungsbereitschaften differieren entsprechend.

Corona Pandemie

Aufgrund gegebenen Anlasses wurden auch Aussagesätze zur Corona Pandemie in die Befragung integriert. In der Pandemie wurde vermehrt wieder das Auto genutzt, um mögliche Ansteckungsgefahren im öffentlichen Nahverkehr zu vermeiden. Ob dadurch langfristige Änderungen der Mobilitätspräferenzen resultieren ist abzuwarten. In der Befragung gaben jedoch nahezu 80% der Probanden an, nach der Pandemie wieder die gleichen Verkehrsmittel zu nutzen wie vor der Pandemie.

Inbesondere Probanden unter 40 Jahren sehen das Fahrrad als neue gewonnene Alternative im täglichen Verkehrsalltag, auch aufgrund der neuen Verkehrssituation bedingt durch die Pandemie (z.B. Pop Up Radwege). Über die Hälfte der technikaffinen Umweltbewussten und der Sensation Seeker begrüßen, wenn die provisorischen Verbesserungen des Radverkehrsnetzes auch nach der Pandemie weiter gelten.

Einstellungen zum autonomen Fahren

Dem autonomen Fahren steht die Gruppe der „technikaffinen Umweltbewussten“ am positivsten gegenüber. Diese Gruppe äußert die größte Nutzungsbereitschaft und bewertet solche Fahrzeuge mit deutlichem Abstand zu allen anderen Gruppen als sicher. Auch die „Sensation Seeker“ sind allen autonomen Fahrzeugen positiv gegenüber eingestellt.

Insgesamt etwas verhaltener zeigen sich die „Liberalen“, die tendenziell eher ein eigenes Auto nutzen würden als sich autonom fahrenden Fahrzeugen auszusetzen. Zugleich bewerten sie autonome Fahrzeuge als etwas weniger sicher als die „technikaffinen Umweltbewussten“ und die „Sensation Seeker“.

Die geringste Akzeptanz und Nutzungsbereitschaft äußern mit Abstand „Konservative“, „Preissensitive“ und „technikskeptische Umweltbewusste“. Als am wenigsten sicher schätzen die „Preissensitiven“ die autonomen Fahrzeuge ein.

Personen mit höherem sozioökonomischem Status zeigen eine deutlich größere Affinität zum autonomen Fahren als andere Statusgruppen. Jüngere Altersgruppen bis 45 Jahre, Männer, Personen aus

PAVE

der Innenstadt stehen dieser neuen Mobilitätsform positiver gegenüber als Ältere, Frauen und Personen aus dem Außenbereich.

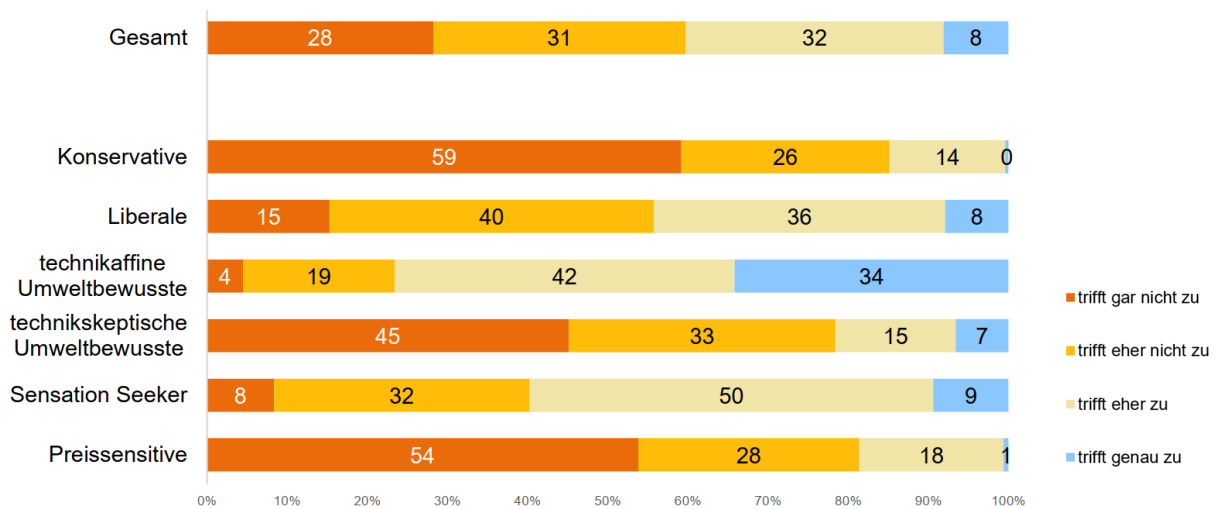


Abbildung 62: Bereitschaft der Pkw-Fahrer, sich autonom fahren zu lassen, wenn das Fahrzeug „Sie schnell und sicher von A nach B bringen kann“ (Angaben in %, Basis: Pkw im Haushalt, 716 Befragte)

Unter den Pkw-Fahrern zeigen sich ebenfalls große Unterschiede in der Bereitschaft „sich autonom fahren zu lassen“ trotz der Zusatzinformation, dass das autonome Fahrzeug „schnell und sicher sei“. Insbesondere Konservative, technikskeptische Umweltbewusste und Preissensitive lehnen unter aktuellem Erfahrungsstand das autonome chauffieren ab.

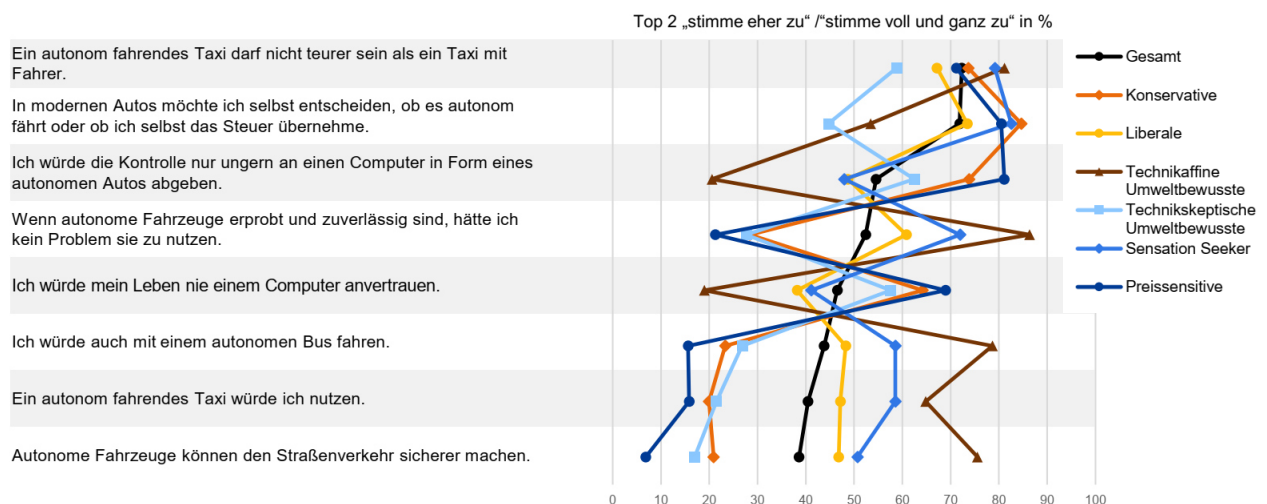


Abbildung 63: Zustimmung zu den Aussagesätzen zum autonomen Fahren 1/2 (Angaben in %, Basis alle 1.004 Befragten)

In der Auswertung der Zustimmung zu den Statements (Addition der Nennungen von „stimme voll und ganz zu“ und „stimmt eher zu“) bestätigt sich die Differenzierung der Mobilitätstypen insbesondere nach Vertrauen in die Technik, Kontrollbedürfnis, Gewohnheitsbindung und Offenheit für Neues. Auffällig sind die großen Unterschiede zwischen den Segmenten bei der Bereitschaft zur „Abgabe der Kontrolle an einen Computer“. Auch die Bereitschaft autonome Busse oder Taxis zu nutzen unterscheidet sich stark zwischen den Gruppen.

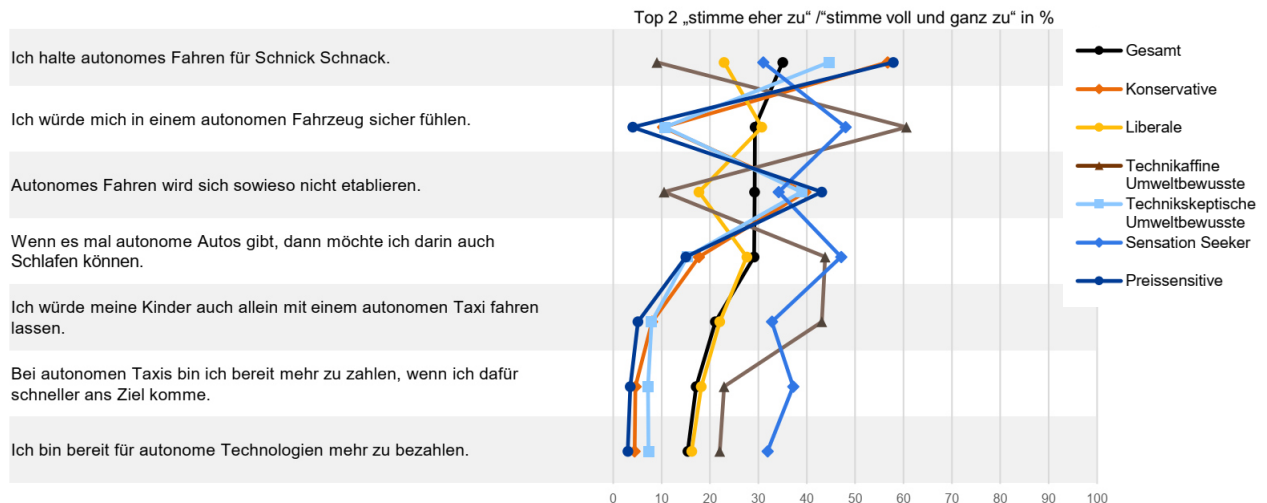


Abbildung 64: Zustimmung zu den Aussagesätzen zum autonomen Fahren 2/2
(Angaben in %, Basis alle 1.004 Befragten)

Beim zweiten Teil der Aussagen zum autonomen Fahren zeigt sich besonders bei „dem Gefühl der Sicherheit“ eine starke Spreizung der Antworten. Die große Unsicherheit ist zum Großteil auf die bisherige Unkenntnis der Thematik, emotionale Befürchtungen und das Festhalten an Gewohnheiten aufgebaut.

Eine Mehrpreisbereitschaft für autonome Angebote ist bis auf die Sensation Seeker und die technikaffinen Umweltbewussten kaum vorhanden. Ein höheres Preislevel als das heutige Taxi wäre nicht vorstellbar, um relevante Fahrgastzahlen zu erreichen.

Nutzung von autonomen Taxis und Sammeltaxis (Bus/Shuttle)

Neben den Fragen zur persönlichen Einstellungen gegenüber autonomen Fahrzeugen wurde eine weitere Fragetechnik eingesetzt. Im ersten Schritt gaben die Probanden die Nutzungshäufigkeit ihrer heute genutzten Verkehrsmittel an (bezogen auf das Jahr vor dem Beginn der Corona Pandemie). Die Ergebnisse dazu wurden in den Steckbriefen der Mobilitätstypen dargestellt (siehe Mobilitätstypen - Beschreibung & Charakterisierung). Im Anschluss dieses Fragenkomplexes wurde den Probanden kurz die Anwendungen von autonomen Taxis und Sammeltaxis erläutert und es wurde ebenfalls gefragt, wie oft sie einen derartigen Service nutzen würden. Durch diese Fragetechnik und den Bezug zum aktuellen Mobilitätsalltag der Probanden konnte eine realitätsnähere Bereitschaft zur Nutzung von autonomen Services ermittelt werden.

Hierbei ist jedoch strikt zu betonen, dass die relativ geringe Nutzungswahrscheinlichkeit eine Momentaufnahme darstellt und dass viele Nutzer mit den Angeboten, der Technologie und deren Vorzügen noch nicht vertraut sind.

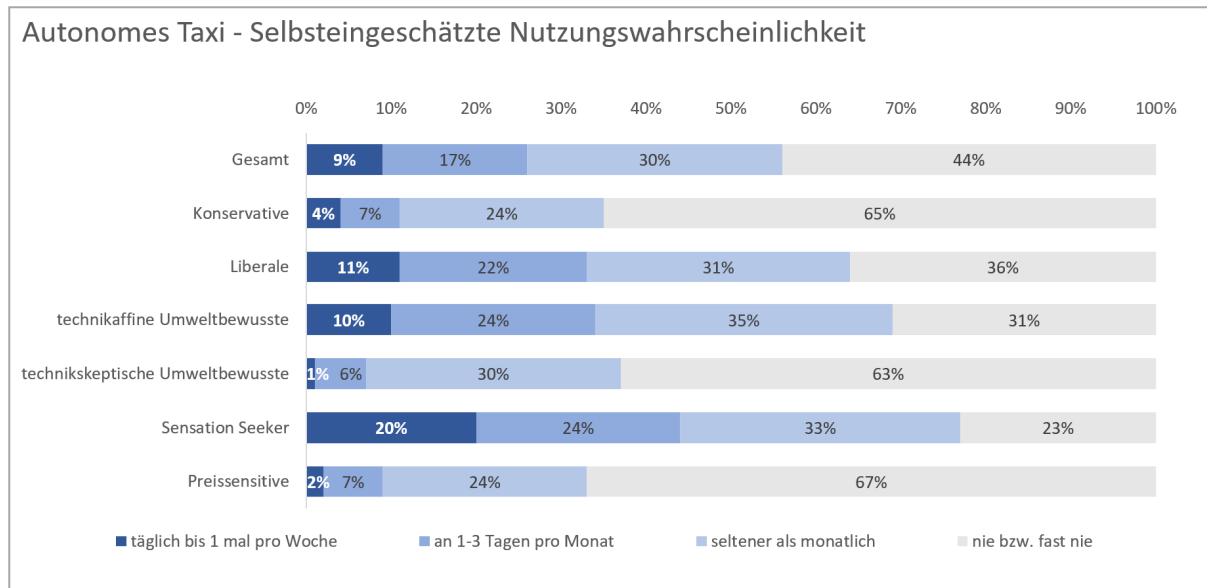


Abbildung 65: Selbsteinschätzung der Nutzung von zukünftigen autonomen Taxibusen
(Basis alle 1.004 Befragten)

Nach heutiger Einschätzung wollen nur ca. 26% der Probanden ein autonomes Taxi mindestens monatlich oder öfter nutzen. Die Anteile der mindestens wöchentlichen Nutzung sind bei den Sensation Seekern am höchsten. Die stärkste komplette Ablehnung findet sich analog zu den bisherigen Ergebnissen bei den Konservativen, technikskeptischen Umweltbewussten und den Preissensitiven.

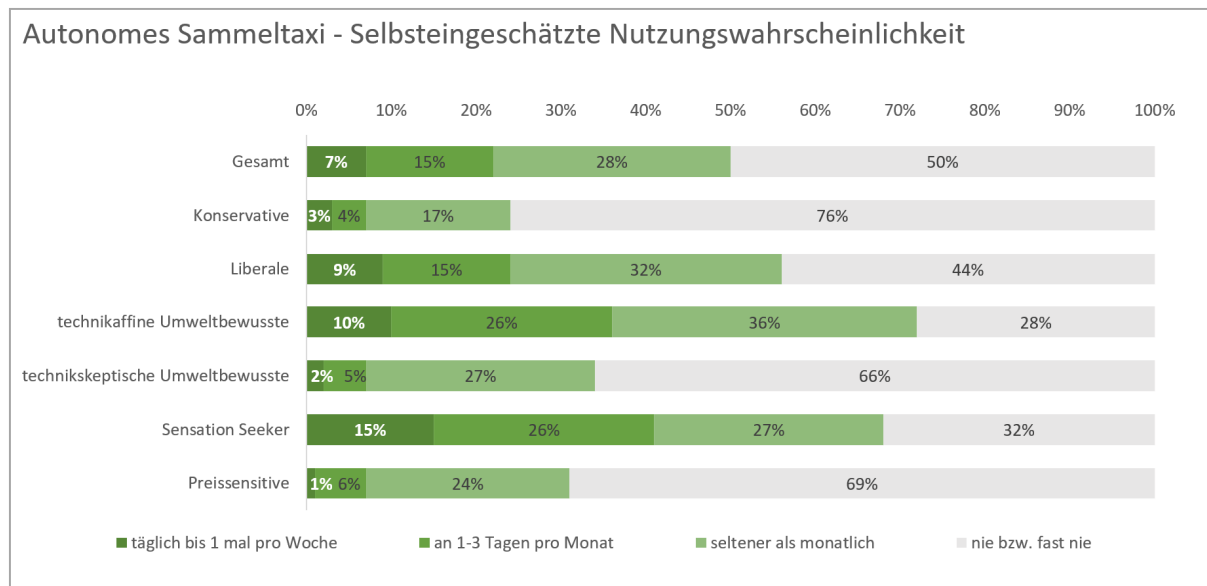


Abbildung 66: Selbsteinschätzung der Nutzung von zukünftigen autonomen Sammeltaxibusen
(Basis alle 1.004 Befragten)

Autonome Sammeltaxis würden etwas weniger oft genutzt als Robotaxis. Nur 23% der Probanden können sich eine mindestens monatliche Nutzung vorstellen, wobei 7% mindestens einmal die Woche bis täglich ein Sammeltaxi nutzen würde. Zu den Vielnutzern zählen die „technologieaffinen Umweltbewussten“, die „Sensation Seeker“, auch die „Liberalen“ sowie das Cluster „Flexibilität“.

PAVE

Die geringere Affinität zum Sammeltaxi ist im Wesentlichen in der möglichen längeren Fahrtzeit und dem „Verlust“ der Privatsphäre begründet. Auch eine preisliche Besserstellung des autonomen Sammeltaxis hat die Nachteile im Rahmen dieser Befragung nicht aufwiegen können.

Jedoch auch hier ist nochmal zu betonen, dass diese Ergebnisse ein aktuelles Stimmungsbild darstellen. Mittelfristige verkehrspolitische Anpassungen, Pilotprojekte und das Kennenlernen der neuen Anwendungen bieten hier große Potentiale zur Verbesserung der öffentlichen Wahrnehmung und den persönlichen Nutzungsbereitschaften.

Fazit

Hinsichtlich der Einstellungen gegenüber dem Auto, dem autonomen Fahren und alternativer Antriebe bestehen deutliche Unterschiede zwischen einzelnen identifizierten Clustern.

Die Einstellung gegenüber dem Umweltschutz kombiniert mit der Offenheit gegenüber Neuem und neuen Technologien scheinen als Motor für das autonome Fahren und neue Antriebstechnologien zu wirken.

Liberal eingestellte Personen stehen dem positiv gegenüber, sofern sie nicht in ihren Gewohnheiten eingeschränkt werden.

Preissensitive und konservativ eingestellte Personen, unabhängig davon, welchen Stellenwert der Umweltschutz hat, reagieren der neuen Mobilität gegenüber skeptisch.

Aufgeschlossen gegenüber den Themen autonomes Fahren, alternative Antriebe und auch Verzicht auf das Auto zeigen sich zudem hauptsächlich Männer, die jüngere und mittlere Altersgruppe, Personen im Innenstadtbereich sowie Personen mit einem höheren sozioökonomischen Status.

Fast die Hälfte der Befragten hat sich derzeit noch keine feste Meinung zum autonomen Fahren gebildet. Für autonom fahrende Taxis und Sammeltaxis gäbe es bereits jetzt ein nicht unerhebliches Nutzungspotenzial. Vor allem das Ausprobieren dieser Technologie sowie die Möglichkeiten für den Umwelt- und Klimaschutz scheinen dabei im Vordergrund zu stehen.

4.2.1.6 Handlungsempfehlungen

Die Ergebnisse der Interviews, Fokusgruppen und der abschließenden Befragung haben gezeigt, dass die Probanden sehr unterschiedliche Vorkenntnisse, Grundeinstellungen und Vorurteile bezüglich des autonomen Fahrens besitzen. Um die Akzeptanz von autonomen Fahrzeugen langfristig zu fördern, können differenzierte Strategien, die auf die Bedürfnisse von einzelnen Gruppen gezielt eingehen, einen wichtigen Beitrag hierzu leisten. In diesem Kapitel werden Handlungsempfehlungen beschrieben, die aus den Ergebnissen der PAVE Untersuchung abgeleitet wurden.

Sicherheit & Vertrauen schaffen

Eine nachhaltige Vermittlung von Sicherheit und Vertrauen in die Technik ist Grundvoraussetzung, um eine ablehnende Haltung zu vermeiden. In allen Phasen der Untersuchung stellte sich die wahrgenommene Sicherheit und das daraus resultierende Vertrauen in die autonome Technik als wichtigster Faktor dar. Für den Erfolg des autonomen Fahrens ist es notwendig, dass aus Sicht der Verkehrsteilnehmer keine neuen Risiken im Straßenverkehr entstehen. Vielmehr müssen Vorteile und positive Effekte auf persönlicher und gesellschaftlicher Ebene ersichtlich sein.

PAVE

Die selektive, emotionale Wahrnehmung des Menschen verleitet zur Überbewertung von durch einen „Computer“ verursachte Unfälle. Im Vergleich dazu werden durch menschliche Fehler ausgelöste Unfälle eher hingenommen. Auch wenn normalerweise ein Vertrauen zur Technik besteht, kann sich ein negatives Ereignis bzw. Erlebnis bereits auf das Vertrauen in die autonome Technik auswirken.

Daher ist es wichtig die Zahl der Zwischenfälle möglichst zu minimieren und Sicherheitskonzepte zu optimieren. Falls es doch zu einem Unfall kommt, sollte eine öffentliche proaktive Kommunikation betrieben werden, um über mögliche Unfallursachen und Sicherheit von autonomen Fahrzeugen aufzuklären und Spekulationen zu vermeiden. Dabei hilft bspw. eine einfach zu verstehende Kommunikation von Unfallstatistiken, die die Sicherheitsvorteile von autonomen Fahrzeugen im Verkehr aufzeigt.

Die Sicherheit in „geteilten autonomen Fahrzeugen“ ist ebenso von großer Bedeutung, da Menschen ohne personelle Aufsicht in engem Raum aufeinandertreffen und durch etwaige kritische Situationen oder Übergriffe geschützt werden müssen.

Die Kommunikation der Sicherheitskonzepte und deren Verständnis ist deshalb wichtig, um Ängste gegenüber den AVF abzubauen oder gar nicht erst entstehen zu lassen. Es gibt jedoch immer eine Restgruppe, die das autonome Fahren trotz rationaler Argumente ablehnt. Hier ist es wichtig, die Verkehrsteilnehmer bei der Entwicklung, zum Beispiel in Form von Beteiligung an Pilotprojekten, mitzunehmen (bspw. mit „freien Kennenlernfahrten“).

Zielgruppengerechtes Marketing

Aus systemtheoretischer Sicht (Menschheit, Wirtschaft, Kultur und Erde als System verstanden) ist der Markt kein intelligentes Teilsystem, das besonders Innovationen befördert, die das Gesamtsystem stabil halten. Wissenschaft steht also nicht nur vor der Aufgabe, Innovationen zu entwickeln, sondern auch zu messen, mit welchem Aufwand sie auf dem Markt eine Nachfrage erzeugen können und ob die über diese Nachfrage generierte Verwirklichung (Produktion, Vertrieb, Nutzung) tatsächlich einen Fortschritt, auch unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten, bedeutet. Dabei ist die differenzierte Analyse menschlicher Bedürfnisse, Einstellungen und Verhaltensweisen als Entscheidungsinstanz für „Markterfolg“ auch eine Frage der psychologischen Forschungsmethodik, die aus der qualitativen Analyse einzelner Marktteilnehmer zu quantitativen Clusterungen von Segmenten solcher Teilnehmer nach Gruppen gelangt und die Faktoren dahinter offenlegt. Wichtig sind hier zwei Betrachtungsweisen:

a) Ist eine Pionierleistung wirklich eine Innovation (neue Lösungsqualität) oder nur eine Variation (alte Lösungsqualität, neu kommuniziert, neu verpackt). Hier geht es um systemische Fragen wie Ökologie, Demokratisierung, Effizienz – aber auch um kulturelle Frage: „Braucht die Menschheit DAS – hat es einen systemischen Nutzen – ist es Fortschritt?“.

b) Wenn eine Innovation im Wissenschaftsbereich in diesem Sinne als echte Innovation anerkannt ist, kommt die Frage hinzu: Auf welche Widerstände und auf welche Treiber wird diese Innovation auf dem Markt stoßen? Wenn hier der Markt als Entscheidungsplattform betrachtet wird, dann steht im Vorfeld natürlich auch der Gesichtspunkt, wie eine Nachfrage generiert werden könnte, wie hoch der Aufwand dafür ist und wie differenziert die Kommunikation dazu sein muss. Hier ist die Früherkennung möglicher Markt-Teilnehmer-Segmente von Bedeutung und wir können aus unserem Datenmaterial und der qualitativen und quantitativen Clusterung sowie der Faktoren-Analyse hierzu folgende Punkte beschreiben:

PAVE

- Um alle unterschiedlichen Einstellungstypen abzudecken ist ein zielgruppengerechtes Marketing von autonomen Angeboten notwendig. Ein frühes Heranführen an die Thematik und die Herausstellung von Sicherheit und persönlichen Mehrwerten hilft dabei neue Nutzer zu gewinnen.
- Je früher diese neue Art der Mobilität im öffentlichen Interesse steht, desto höher sind die Chancen für eine Vertrautheit und Akzeptanz. Gezielte Kommunikationsstrategien für die einzelnen Mobilitätstypen können zukünftige positive Haltungen und Einstellungen unterstützen.
- Die Gruppe der „Umweltbewussten“ würde durch das Herausstellen der ökologischen Nachhaltigkeit angesprochen. Für „Preissensitive“ sollte es kostengünstige Angebote geben und für die „Konservativen“ kann das autonome Angebot als Alternative zum eigenen Auto beworben werden. Dazu zählen bspw. Kostenvorteile bei der Nutzung von Sharing Angeboten und eine gute Anbindung an den ÖPNV.
- Auch gegenüber der Gruppe der nicht oder wenig Mobilen ist es wichtig die neuen Angebote zugänglich zu machen. Beim Tegeler BVG-SeeMeile-Projekt wurden bspw. viele Bewohner in der unmittelbaren Nähe wieder mobiler, da sie eine neue, einfach zu nutzende Anbindung an die U-Bahn und die Einkaufsstraße nutzen konnten. Wenn dieses Angebot in einem größeren Gebiet als „OnDemand“-Lösung verfügbar ist, besteht ein großes Potenzial, die Mobilität der Menschen zu erhöhen. Dabei sollte die mögliche Erleichterung des Verkehrsalltags durch eine transparente, einfache Kommunikation herausgestellt werden.

Mensch-Maschine-Kommunikation

Nicht nur die öffentliche Kommunikation ist ein Grundpfeiler bei der Einführung von autonomen Fahrzeugen, sondern auch die alltägliche persönliche Kommunikation mit der neuen Technik.

Die Mensch-Maschine-Schnittstellen sind von hoher Bedeutung für die Akzeptanz und die nahtlose Integration von autonomen Angeboten. Dies beginnt im Fahrzeug, in dem der Fahrgast mit Informationen zur Fahrt versorgt wird, z.B. über Displays, Audio oder Smartphone-Applikationen und geht bis hin zur Kommunikation auf der Straße gegenüber menschlichen Verkehrsteilnehmern, wie Autofahrer, Radfahrer oder Fußgängern. Das autonome Fahrzeug muss dem Menschen gegenüber signalisieren, wie es reagieren wird. Beispiele für solche Vorgänge sind Vorfahrt erkennen, Vorbeiwinken, Losfahren, Signalisierung von Aktivitäten und oder die Erkenntnis einer Situation.

Der Mensch verlangt nach Informationen, um Sicherheit und Vertrauen zu gewinnen. Insbesondere in der Phase des Kennenlernens wollen viele Nutzer wissen, was das Fahrzeug gerade tut oder was es als nächstes vorhat.

Für den Erfolg von autonomen Fahrdiensten als Robotaxis oder Sammeltaxis sollten intuitive, transparente und einfach zu bedienende Apps entwickelt werden, welche die Eintrittsbarrieren senken. Auch die klassische Telefonbestellung sollte noch angeboten werden, solange sich Smartphones noch nicht in allen Bevölkerungsschichten etabliert haben.

Klare Gesetzeslage

Um aus gesellschaftlicher Sicht die Akzeptanz gegenüber autonomen Fahrzeugen zu erhöhen, müssen Gesetze, Regeln, Rechte und Pflichten für autonome Fahrzeuge einheitlich und transparent definiert sein. Insbesondere aus Sicht der Nutzer muss Klarheit herrschen, welche Funktionen ein Fahrzeug ausüben kann und welche Regeln in einem Schadensfall gelten. Hierzu zählt auch der klar geregelte

PAVE

Versicherungsschutz. Um den Transport von Menschen durch einen Computer rechtlich abzusichern, muss zudem auch das Personenbeförderungsgesetz angepasst werden.

Integration in den öffentlichen Nahverkehr

In der empirischen Untersuchung wurde deutlich, dass autonome Fahrsysteme ideal geeignet wären, um den öffentlichen Nahverkehr zu ergänzen. So könnten ganze Buslinien oder kleinere OnDemand-Shuttles autonom betrieben werden, um zum einen Kosten auf Betreiberseite einzusparen und zum anderen den Menschen neue Mobilitätsangebote anbieten zu können.

Insbesondere außerhalb des Berliner S-Bahn Rings ergeben sich zudem große Potentiale, um schlecht angebundene Stadtteile mit öffentlichem Verkehr zu versorgen und den Bürgern Alternativen zum Auto anbieten zu können. Sehr wichtig ist dabei eine "gerechte" Preisgestaltung, d.h. die Nutzung von autonomen Angeboten mittels normalen BVG-Tickets oder einem normalen Jahresabonnement. Dies würde die Attraktivität der öffentlichen Verkehrsmittel enorm steigern und könnte auch Autofahrer zum Wechsel bewegen. Darüber hinaus müssen die autonomen Angebote in übergreifende Verkehrskonzepte integriert werden, um die Multimodalität zu stärken und neue Nutzer gewinnen zu können.

Wie das SeeMeile Projekt gezeigt hat, bieten autonome Fahrzeuge eine ideale Möglichkeit zum einen schlecht angebundene Gebiete an den öffentlichen Nahverkehr anzubinden und zum anderen dadurch Ältere und wenig mobile Personen wieder mehr Teilhabe an selbstbestimmter Mobilität zu ermöglichen.

Bei privaten Fahrdienst Anbietern sollten die Preise nicht über den heutigen Taxipreisen liegen, denn die Mehrheit der Probanden sieht keinen Mehrwert durch den Wegfall des Fahrers. Daher ist auch keine höhere Preisbereitschaft zu erwarten.

Bei autonomen Angeboten sollte möglichst vermieden werden einen Konkurrenzkampf zum öffentlichen Nahverkehr zu eröffnen. Eine Kannibalisierung wäre kontraproduktiv. Vielmehr sollte sich darauf konzentriert werden, Autonutzern eine attraktive und verlässliche Alternative zu bieten, um einen effizienteren und lebensfreundlicheren Stadtverkehr zu ermöglichen.

Schlusswort

In der weiteren Entwicklung des autonomen Fahrens können explorative Forschungsansätze zur Typologisierung und Prädikation von zukünftigem menschlichem Verhalten weiter ausgebaut werden. In dieser Untersuchung hat sich bestätigt, dass reines Abfragen von Themen nicht immer die wahren Einstellungen und Grundhaltungen von Menschen hervorbringen. Die geäußerten Haltungen sind nur selten fest verankert! Das persönliche Erleben und Kennenlernen, sowie die dabei hervorgerufenen positiven Emotionen können dabei unterstützen, vorhandene Denkweisen zu verändern und Menschen für etwas Neues – in diesem Fall neue autonome Mobilitätsangebote - zu begeistern.

Wir empfehlen in zukünftigen Forschungsprojekten die Integration von Persönlichkeitsmerkmalen in die Verkehrssimulation MATSim weiter zu voranzutreiben. Dadurch kann die realitätsnahe Abbildung menschlichen Verhaltens durch Agenten weiter verfeinert werden.

4.2.2 Wirtschaftsverkehr/ Personenwirtschaftsverkehr (INA/InUrban)

4.2.2.1 Einleitung

Automatisiertes Fahren hat wie kaum eine andere aktuelle Innovation das Potenzial, unsere Verkehrssysteme tiefgreifend zu verändern. Das betrifft nicht nur den motorisierten Individualverkehr, sondern auch die bekannten Angebote des heutigen öffentlichen Nah- und Fernverkehrs. Autonomes Fahren sollte dabei zur städtischen Mobilitätswende beitragen. Auch wenn noch unklar ist, ob autonome Fahrzeuge schon 2025 oder erst 2040 [NVP, 2019, S.49] einen relevanten Marktanteil erreichen werden, ist es wichtig, dass heute die Weichen gestellt werden, damit durch autonomes Fahren nicht mehr, sondern weniger Verkehr erzeugt wird.

Der Fokus im Kapitel 4.4.5 liegt auf dem gewerblichen Personen- und Güterverkehr in der Stadt, da gewerbliche Verkehre in der wissenschaftlichen Diskussion nur selten betrachtet werden. Dabei wird untersucht, welche Faktoren zu einer ökologisch sinnvollen und gleichzeitig kommerziell attraktiven Nutzung automatisierter Verkehrssysteme beitragen können. Ein besonderes Augenmerk im Personenverkehr gilt dabei Fahrdiensten wie zum Beispiel Moia, Clevershuttle oder ioki. Diese werden im Folgenden als Demand Responsive Transport, kurz DRT⁵ bezeichnet. Darüber hinaus werden Automatisierungspotentiale im städtischen Güter- und Warenverkehr betrachtet.

Demand Responsive Transport oder Mobility-on-Demand („bedarfsorientierte“ oder „nachfragegesteuerten Mobilitätsangebote“) bieten Fahrgästen einen Service, der auf ein Liniennetz und Fahrpläne verzichtet und stattdessen unter Berücksichtigung der individuellen Fahrtwünsche der Nutzer online gebucht werden kann (Bonus et al. 2018, S. 2)

Die Ausarbeitung stützt sich dabei auf Literaturrecherchen, qualitative Befragungen zum bedarfs-gesteuerten Demand Responsive Transport (DRT) im Personenverkehr heute und morgen mit 8 Mobilitätsexperten.

Auch im Güterverkehr wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Parallel dazu lag der empirische Schwerpunkt auf der qualitativen Befragung von 23 Praktikern aus Logistikunternehmen, Kurier- und Expressdiensten, Industrieverbänden, Kommunen und wissenschaftlichen Einrichtungen. Die Ergebnisse aus diesen Interviews wurden in einer Fokusgruppe mit 7 Teilnehmern aus der Transportwirtschaft und der kommunalen Planung diskutiert und nach Praktikabilität und ihrem kommerziellen Potenzial bewertet.

⁵ Demand Responsive Transport oder Mobility-on-Demand („bedarfsorientierte“ oder „nachfragegesteuerten Mobilitätsangebote“) bieten Fahrgästen einen Service, der auf ein Liniennetz und Fahrpläne verzichtet und stattdessen unter Berücksichtigung der individuellen Fahrtwünsche der Nutzer online gebucht werden kann (Bonus et al. 2018, S. 2)

PAVE

Experteninterviews DRT Verkehr:

- Digital Mobilities, DMO
- Door2Door
- Institut für Zukunftstechnologiebewertung, IZT
- KCW GmbH
- Kreis Herzogtum Lauenburg, Projekt TaBuLa-Log
- Reallabor Schorndorf
- Wunder City Deutschland
- Zukunftsnetz Mobilität NRW

Experteninterviews im Güterverkehr:

- Industrie: Mercedes Benz Nfz Vertrieb
- KEP Unternehmen: DPD
- Kommunen: Stadtverwaltung Ratzeburg; Bezirksamt Charlottenburg-Wilmersdorf
- Logistik: Offergeld; Unitax; Schenker; Dachser
- Stadtlogistik: BEHALA (KoMoDo)
- Start ups: Get Vesper, BlueBizz, Door2Door, 4flow
- Verbände: BIEK, VVL, IHK, BdKEP
- Wissenschaft: Thaller, DLR; Ninnemann, HSB Hamburg; Seeck, HTW; Marker, TU

Teilnehmer Fokusgruppe:

- Autoindustrie: Daimler Trucks
- Logistik: eComLogistik, Urban Tech Republic, BdKEP
- Politik, Urbanistik: Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, eMo

4.2.2.2 Demand Responsive Transport heute und morgen

4.2.2.2.1 Demand Responsive Transport – Akteure u. Geschäftsmodelle

Ebenso wie in anderen Lebenswelten ermöglicht die Digitalisierung auch im Verkehrssektor erhebliche Effizienzsteigerungen, und sie eröffnet neue Geschäftsmodelle, die weit über eine reine Transportleistung hinausgehen. Dieser Aspekt soll im Folgenden berücksichtigt werden.

Eigentümerstrukturen

Der Markt der DRT-Unternehmen (DRT = Demand Responsive Transport) ist unübersichtlich und hoch dynamisch. Während Verkehrsunternehmen wie die Deutsche Bahn oder die Automobilhersteller die klassischen Mobilitätsanbieter repräsentieren, gelten Tech-Unternehmen (Google, Apple, Huawei...) und unkonventionelle Start Ups wie Wunder Mobility, aber auch Akteure aus dem Bankensektor wie SoftBank oder Toyota Bank als Neulinge im Mobilitätssektor. In dieser Gemengelage haben die Tech-Konzerne einen entscheidenden Vorteil: Sie sind kapitalstark und verfügen gleichzeitig über komplexe digitale Ökosysteme, durch die sie Fahrzeugtechnik, Kundenkommunikation, Unterhaltungselektronik und Routingsysteme mühelos zu neuen Dienstleistungen verbinden.

Eigentümerstrukturen und strategische Investments			
Internationale Transportation Network Companies	Deutsche Start-ups	Mobilitätsgründungen der OEM ⁶	Branchenfremde Beteiligungen
Uber, Lyft, Didi	Door2door, Ioki, CleverShuttle, Wunder	Free Now, MOIA, ViaVan	Google, Apple, Amazon, Tencent
Gegründet in den USA bzw. China, privatwirtschaftliche Investments, börsennotiert	Door2door: KfW und private Investoren, Wunder: Venture Capital, CleverShuttle: DB AG und Eigentum der Gründer, ioki: 100% Bahntochter	Reach Now: 100% Daimler AG+BMW, MOIA 100% VW, eigene Sparte, ViaVan: 50% Via, 50% Mercedes Vans	Plattformen, Track and Trace sowie Kommunikations- und Unterhaltungssysteme, Autonomes Fahren, als Eigenentwicklung und/oder in Kooperationen

Tabelle 6: Demand Responsive Transport - Eigentümerstrukturen (eigene Darstellung)

Dienstleistungskategorien

Jenseits der komplexen Eigentümerstrukturen, lassen sich die nachfragegesteuerten DRT Dienste in zwei Kategorien einordnen:

- 1 Ridehailing⁷ - individueller Fahrdienst der das Taxi substituiert (Uber Pop, Lyft, Didi ...) und
2. Ridepooling⁸ - bündelt Fahrtwünsche und stellt eine Form der Sammelbeförderung dar. Ziel ist es, die Auslastung der Fahrzeuge zu erhöhen und so die Kosten und die gefahrenen Kilometer zu reduzieren. Ridepooling Dienste wie Moia, Ioki, Clevershuttle wurden von Anfang an als Sammelbeförderungsdienste angelegt.

⁶ Original Equipment Manufacturer, OEM, übersetzt Originalausrüstungshersteller. Wird in der Automobilindustrie als Synonym für Fahrzeughersteller verwendet.

⁷ Ridehailing (Ride=Fahrt, Hailing=rufen) ist die kommerzielle Personenbeförderung mit dem privaten Pkw

⁸ Ridepooling (Ride=Fahrt, Pooling=bündeln, zusammenfassen) s.a. Mehlert 2018, S.5

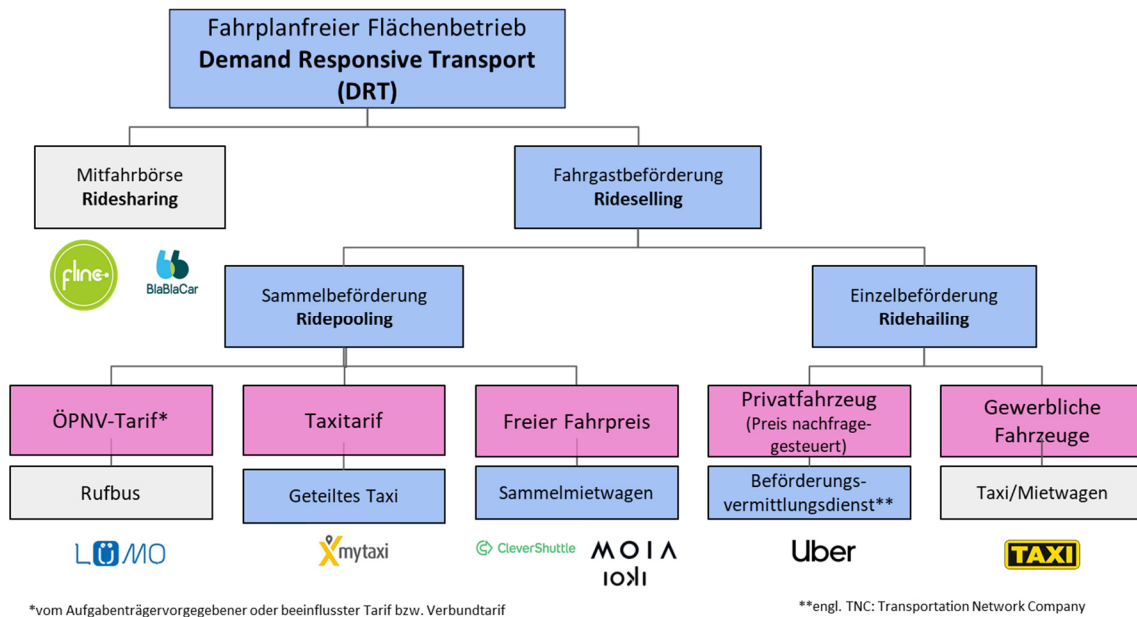


Abbildung 67: Abgrenzung DRT auf individueller Basis und als Sammelverkehr (eigene Darstellung in Anlehnung an Mehlert 2018 (kcw))

Im Anhang werden tabellarisch die in Deutschland tätigen DRT Akteure vorgestellt und Unterscheidungsmerkmale herausgearbeitet. Im Ausland tätige Unternehmen finden dabei nur beispielhaft Erwähnung.

Transportation Network Companies

Ridehailing Firmen wie Uber, Lyft oder Didi gehen soweit, dass sie selbst nur als Mobilitätsvermittler (Transportation Network Company) auftreten, der keine eigenen Fahrdienste erbringt. Die Dienstleistung wird als Taxidienst von privaten Fahrern im eigenen Auto erbracht. Dieses Geschäftsmodell führt dazu, dass eine Transportation Network Company keinen eigenen Fuhrpark und keine festangestellten Fahrer vorhalten muss, was sich positiv auf die Kapitalbindung auswirkt. Der leistungserbringende Fahrer zahlt für die Nutzung der Plattform, die Fahrer App, für die Werbung etc. einen erheblichen Anteil des Fahrpreises (bei Uber in den USA sind es vermutlich 20-25%). Für die TNC Unternehmen sind Fahrer eine Art Subunternehmer, die als „Owner Driver“ unabhängig und flexibel arbeiten können, aber auch das geschäftliche Risiko tragen.

Mit autonomen Fahrzeugen wäre Uber nicht mehr auf Fahrer angewiesen, während zukünftige Eigentümer selbstfahrender Autos dann ihre Einnahmen generieren können, ohne selbst fahren zu müssen. Uber wird unabhängig vom im jeweiligen Land geltenden Arbeitsrecht.

Ridepooling

Ridepooling versteht sich als Teil der Sharing Ökonomie. Durch das Teilen von Fahrten soll ein Beitrag zur Reduzierung des Verkehrsaufkommens geleistet werden. DRT Pooling Dienste verfolgen damit einen grundsätzlich anderen Ansatz als den des Ridehailing. Inspiriert sind diese Dienste von den Sammeltaxis, wie sie in zahlreichen Ländern weltweit zu finden sind (Minibus Taxi, Matatus, Marschrutka, Dolmus ...), meist anzutreffen in Regionen, die über keinen öffentlichen Nahverkehr verfügen. Üblicherweise gelten diese klassischen Sammeltaxisysteme als preiswert und effizient, aber nicht besonders sicher und komfortabel. Sie starten von einem festen Abfahrtsort, einer Art Busbahnhof,

PAVE

zu einem definierten Zielort, den der jeweilige Anbieter oder der erste Fahrgast festlegt. Fahrgäste können an beliebigen Punkten entlang der Strecke aussteigen, und wenn Plätze frei geworden sind, werden neue Fahrgäste aufgenommen. In Deutschland ist DRT im ländlichen Raum in Form von Rufbussen etabliert.

Durch die Möglichkeiten der digitalen Routenoptimierung und durch den Einsatz hochwertiger umweltfreundlicher Fahrzeugflotten vollziehen die modernen DRT Pooling Dienste (Sammeltaxis) den Sprung in eine neue Qualitätsdimension. Moderne DRT Systeme sind nachfragegesteuerte flexible Transportangebote zu beliebigen Zielen innerhalb eines Betriebsgebiets.

Kooperation mit ÖPNV

Die überwiegende Zahl der DRT Pooling Anbieter kooperiert heute mit öffentlichen Verkehrsunternehmen. Zu diesen Kooperationen sind sie durch Vorgaben der jeweiligen Kommunen, aber auch aus wirtschaftlichen Gründen gezwungen, da sie u.a. aufgrund niedriger Besetzungsgrade nicht eigenwirtschaftlich operieren. Für die städtischen Verkehrsbetriebe sind DRT Pooling Unternehmen attraktive Partner, um Mobilitätsangebote zu Schwachlastzeiten zu sichern oder schlecht ausgelastete Buslinien zu ersetzen. Zusätzlich haben sie das Potenzial, die Anbindung schlecht versorgter Stadtteile im Linienverkehr zu verbessern oder sind Zubringer zum nächsten Bahnhof.⁹

Auf diese Weise steigern ÖPNV-Unternehmen ihre Effizienz und profitieren zusätzlich vom technischen Know-how der DRT-Anbieter. Eine Win-Win-Situation, die jedoch die DRT-Unternehmen in ihrer Ausrichtung und Marktposition beeinflusst, denn der Markenname des DRT-Anbieters verschwindet hinter dem des ÖPNV-Unternehmens. Unter ihrem eigenen Markennamen erschließen sich nur wenige DRT-Unternehmen neue Zielgruppen wie z.B. der Allygator Shuttle von Door2Door, der das städtische Ausgehpublikum adressiert, oder ioki mit seinen Mitarbeitershuttles für Berufspendler.

Digitalisierung der Dienste

Die Digitalisierung des DRT ist weit mehr als der Transfer eines analogen Telefonanrufs in einen Online Buchungsvorgang per App. Dahinter verbergen sich komplexe Buchungs- und Bezahlssysteme, denn jeder Nutzer muss sich registrieren, bevor er die App benutzen kann. Die Kundenangaben sind umfangreich. Sie enthalten nicht nur die vollständige Meldeadresse, E-Mail, Mobiltelefonnummer, sondern auch Kontodaten oder die Hinterlegung eines Bezahlmittels. Mit einer Buchung erfolgt automatisch die Freigabe der aktuellen Geodaten des Kunden, dessen Bewegungsmuster damit verfolgbar werden. Für die Nutzung eines Carsharing Dienstes ist zusätzlich ein Identitätsnachweis und der Nachweis eines gültigen Führerscheins erforderlich (per Gesichtsabgleich durch ein aktuelles Handy Foto). Das heißt im Unterschied zu einem herkömmlichen Taxi-Unternehmen verfügen ein DRT-Anbieter oder eine digitale Transportvermittlungsplattform über eine komplexe Kundendatenbank, Wegeprofile und Nutzungsmuster.

Für die Anbieter ist das ein Informationsschatz aus dem sich neue Geschäftsmodelle, wie beispielsweise Werbeverträge, potenzielle Werbepartner aus der Automobil- oder Transportbranche, Banken und

⁹ „Städte und Verkehrsunternehmen sehen das Potenzial für On Demand Mobilität als Zubringer zum ÖPNV und als Mobilitätsangebote in Schwachlastzeiten des ÖPNV (z.B. zwischen 22:00h und 05:00h). Kostendeckend sind diese Dienste nicht, allein weil die Besetzungsgrade nicht ausreichen.“ Mehlert 2018, S.5

PAVE

Versicherungen oder der Unterhaltungsbranche erschließen lassen. Auf der anderen Seite hat diese Tatsache für viele potentielle Nutzer, die um ihre Datenautonomie besorgt sind, möglicherweise abschreckende Wirkung.

So ergab eine Studie des Bundesverbands Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V. (Bitkom) 2019, dass es für die Hälfte der Bundesbürger (47%) nicht infrage kommt, ein autonomes Fahrzeug zu nutzen. Gegen die Nutzung selbstfahrender Autos spricht vor allem die Angst vor Hackerinnen und Hackern (59% der Befragten) und vor einer Datennutzung durch Dritte (48%) (Bitkom, 2019, S.11).

Gleichzeitig sind die intelligenten Routingsysteme der DRT-Anbieter, über welche die Verkehre abgebildet, gebündelt und dynamisch optimiert werden für die städtische Verkehrsplanung interessant, um so Verkehrsgpässe vorausschauend zu vermeiden.

Digitalisierung der Fahrzeuge

In den letzten Jahren haben sich auch die Fahrzeuge grundsätzlich verändert. Sie sind mit einer umfangreichen Kommunikationstechnologie ausgestattet, die es ihnen erlaubt, digital miteinander und mit der Verkehrsinfrastruktur (Ampeln, Straßenschildern, Barken) zu kommunizieren. Unter dem Stichwort „Connectivity“ ist das Fahrzeug zu einem fahrenden, permanent kommunizierenden Rechner geworden, der nicht nur den Fahrer und die Routenplanung unterstützt, sondern den autonomen Betrieb erst ermöglicht.

Auch bei den klassischen Verkehrsanbietern ist die digitale Umrüstung, aber auch eine Erneuerung der Unternehmensorganisation erforderlich, die mit zunehmender Automatisierung von Fahrzeugen und Prozessen tief in die Arbeitsteilung und Abläufe der Unternehmen eingreift. Hier liegen große Einsparpotentiale sowohl im Personaleinsatz als auch in der Fahrzeugauslastung, Kilometerleistungen und Verbräuchen.

Erfolgsfaktoren

Komplexe disruptive Entwicklungen, wie sie aktuell im Mobilitätssektor stattfinden, „(...) gehen nicht notwendig auf Aktionen einzelner Marktteilnehmer zurück, sondern entstehen häufig durch Kooperationen. Die kooperierenden Unternehmen können sich dabei (...) auf unterschiedlichen Wertschöpfungsstufen (vertikale Kooperationen) befinden“ (Burr, Valentovitsch und Bosler 2017, S. 88/89). Genau das findet aktuell statt, indem neue Technologien neue Dienste hervorbringen und die Unternehmen in wechselnden Kooperationen nach Geschäftsmodellen suchen.

Letztendlich aber hängen der Erfolg von Effizienzsteigerungen durch autonomes Fahre, aber auch die Attraktivität der Dienstleistung von Faktoren wie Flottengröße, Fahrzeuggröße, Besetzungsgrad, Größe des Geschäftsgebiets, Investitions- und Servicekosten und der jeweiligen Versorgungssituation mit anderen Verkehrsangeboten ab. Für autonome DRT-Angebote der Zukunft bedeutet das, dass sie nicht nur eigene Dienste anbieten, sondern in ein komplexes intermodales Verkehrssystem eingebunden sein sollten.

Unter den heutigen Rahmenbedingungen ist kein DRT-Anbieter eigenwirtschaftlich überlebensfähig. Die große Herausforderung für alle besteht darin, die innovativen Fahrdienstleistungen in großen Skalen zu erproben und bekannt zu machen.

PAVE

DRT Pooling ist Mobilität mit Zukunftspotenzial. Wenn genügend Fahrzeuge zur Verfügung stehen, ist der Servicelevel hoch. Spontan und bequem per App buch- und abrechenbar sind sie deutlich komfortabler als frühere Rufbusangebote. So können sie ergänzend zum ÖPNV, Lücken in intermodalen Wegekettens schließen. Dennoch ist das Fazit für die aktuellen DRT-Shuttles eher nüchtern. Die aktuelle Gesetzgebung ist dafür mitverantwortlich, aber nicht der alleinige Grund. Die Kosten für den Nutzer sind nicht gering. Zwar sind DRT-Shuttles günstiger als ein Taxi, aber teurer als der ÖPNV, Monats- oder Jahresabonnements gibt es noch nicht. Da sie in Innenstädten operieren, wo bereits eine gute Infrastruktur vorhanden ist, entziehen sie dem ÖPNV Fahrgäste. Heute ist ihr Beitrag zur Verminderung des Verkehrsaufkommens daher gering. Nutzen bringen sie nur dort, wo sie das bestehende ÖPNV-Angebot erweitern.

Automatisierung

Die Wirtschaftlichkeit von DRT-Angeboten kann sich durch autonomes Fahren elementar verändern. Darauf wies einer der Interviewpartner hin.

„Projekte mit autonomen Shuttles werden erst mal sehr teuer sein, aber später bei mehr eingesetzten Fahrzeugen wird das skalierbar. Für kleinere Fahrzeuge erweist es sich als besonders günstig, wenn kein Fahrer mehr gebraucht wird.“ (OD4)

Unterstützt wird diese These durch eine Studie zur Kostenabschätzung im induzierten Verkehr durch autonome Fahrzeuge (Axhausen, 2019, S.65). Nach Axhausen betragen in Zürich die Kosten für den Fahrer eines konventionellen Taxis ca. 88% pro Passagierkilometer. Sie sind damit der Hauptkostenfaktor.

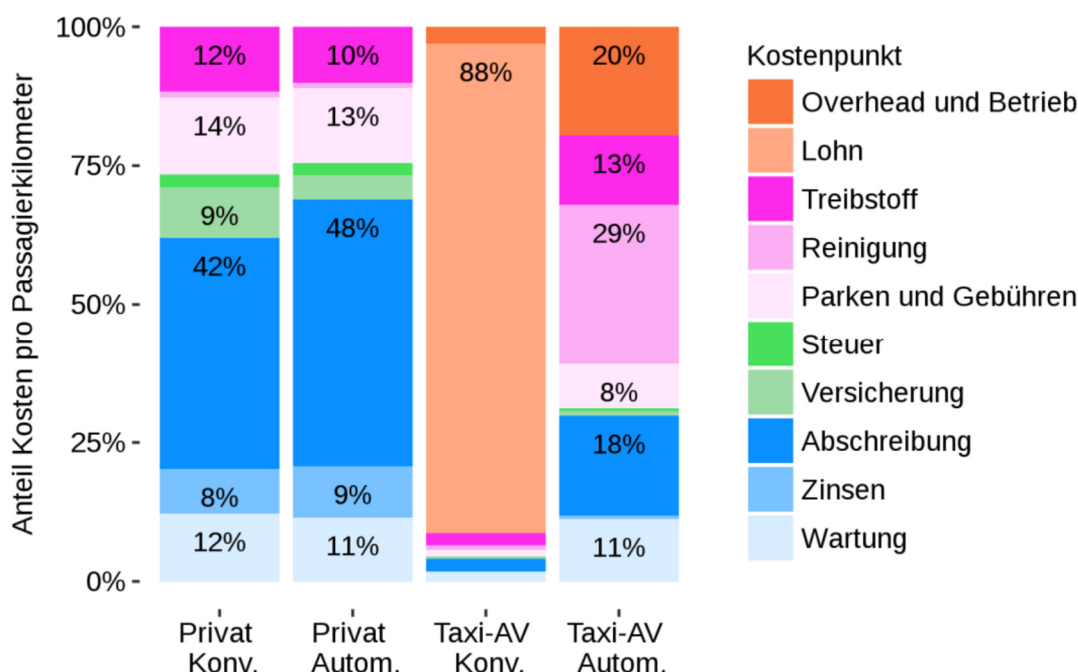


Abbildung 68: Kostenstrukturvergleich mit (Autom.) und ohne (Konv.) Fahrzeugautomation für Privatfahrzeuge und Taxis ohne Pooling. Quelle: Axhausen, Kay W. et.al. Induzierter Verkehr durch autonome Fahrzeuge: Eine Abschätzung, Zürich 2019, S. 65.

Zwar fallen durch autonomes Fahren diese Personalkosten nicht komplett weg, da Überwachungspersonal weiterhin notwendig sein wird und auch die Technik und die Algorithmen sehr aufwändig sind. Dennoch läge die Personalkostenreduktion bei ca. 70% - 75%.

PAVE

Heute überlebt der DRT meist als Systemanbieter durch Querfinanzierung aus Beratung und Verkauf eigener Software, als Kooperationspartner oder Subunternehmer der ÖPNV-Unternehmen oder dank der Finanzierung durch große Automobil- oder Telekommunikations-Unternehmen, die das als Investition in eine autonome Zukunft betrachten. Ob allerdings diese Überlebenshilfe ausreicht, um die Zeit bis zur Marktreife des autonomen Fahrens zu überbrücken, ist ungewiss.

Durch regulatorische Maßnahmen wie Park- und Einfahrtbeschränkungen, die autonome Fahrzeuge bevorzugen, könnten höhere Besetzungsgrade und eine Steigerung der Attraktivität erreicht werden. Nach Meinung der befragten Experten ist der technische Aufwand für autonomes Fahren in dicht besiedelten Gebieten mit Mischverkehren jedoch sehr hoch und das Ziel, autonomer DRT-Verkehr frühestens 2040 zu erreichen.

Aber schon jetzt liefern geteilte DRT-Fahrdienste entscheidende Impulse zur Erneuerung der Verkehrslandschaft, bieten eine zusätzliche Alternative zum motorisierten Individualverkehr und tragen dazu bei, verknöcherten Strukturen bei den öffentlichen Verkehrsanbietern und die Mobilitätsgewohnheiten von Verkehrsteilnehmern aufzubrechen.

4.2.2.2 Use Cases DRT (Akzeptanz DRT und autonome DRT-Shuttle)

Um DRT mit autonomen Fahrzeugen am Markt und beim Kunden etablieren zu können, gilt es zweierlei Akzeptanzhürden zu überwinden.

Zum einen muss die Akzeptanz von DRT durch Änderung von Nutzungsgewohnheiten (digitalisierte Buchung, keine festen Haltestellen und Fahrplan) erreicht werden. In unseren Fachgesprächen wurde immer wieder hervorgehoben, dass Mobilität sich nach Routinen richtet und diese sich nur sehr schwer und langsam verändern. Zum anderen müssen alle technischen Bedingungen für die Nutzung neuer Services (Internetzugang, WLAN, Bluetooth, Netzanschluss etc.) und die Kompetenz der Nutzer im Umgang damit gegeben sein.¹⁰

In den Interviews mit den Praktikern wurde berichtet, dass die Einstiegshürden zum DRT gegenüber einem klassischen Buslinienverkehr die Einführung solcher Dienste durchaus erschweren. So war sehr viel Überzeugungsarbeit nötig, um die Busnutzer einer Mittelstadt von den Vorteilen eines bedarfsgesteuerten Busverkehrs mit virtuellen Haltestellen zu überzeugen, der in den verkehrsschwachen Zeiten zwei reguläre Buslinien ersetzte. Innerhalb von sechs Monaten konnte aber die Zustimmungsrate von 34 auf 50% der Fahrgäste erhöht werden.¹¹

Zahlreiche Pilotprojekte sollen den Nutzern helfen erste Erfahrungen zu sammeln. Eine Auswahl zeigt die Tabelle im Anhang.

Generell kann unter ÖPNV-Nutzern eine Akzeptanz von DRT festgestellt werden, sofern sie deutlich günstiger sind als Taxi und zu Zeiten in Erscheinung treten, in denen kein ÖPNV zur Verfügung steht.¹² Um jedoch gewohnheitsmäßige Autofahrer zu einem Umstieg zu bewegen, muss erst einmal ein Überangebot geschaffen werden, um ein vergleichbares Komfortlevel sichern zu können.¹³ Die Gefahr besteht, dass zukünftige Nutzer eher vom öffentlichen Verkehr abwandern als vom Auto.

¹⁰ OD1, Aussage eines Interviewpartners

¹¹ OD2, Aussage eines Interviewpartners

¹² OD3, Aussage eines Interviewpartners

¹³ OD4, Aussage eines Interviewpartners

Exkurs

Die Covid-19-Pandemie stellt eine neue Herausforderung für die Durchsetzung neuer Mobilitätsmodelle dar. In einer aktuellen Studie von PwC, für die jeweils 1.000 Verbraucher in Deutschland, den USA und China befragt wurden, gaben 77% der befragten Deutschen an, aufgrund der Pandemie weniger Carsharing zu nutzen, nur 5% nutzen es häufiger. Bezogen auf Taxi und Dienste wie Uber gaben 76% an, sie weniger zu nutzen und nur 4% fuhren öfter mit solchen Angeboten. Im internationalen Vergleich sind dabei die Deutschen besonders zurückhaltend: von den befragten US-Amerikanern wollen nur 56% auf Carsharing verzichten und 53% auf Taxis und Uber (China 61%/43%).

Befragt, welche Anforderungen sie stellen, um trotz Covid-19 doch geteilte Mobilitätsangebote zu nutzen, gaben 42% der Deutschen an, diese in keinem Fall nutzen zu wollen (USA 17%, China 2%). Die wichtigsten Anforderungen der Nutzungswilligen, waren in allen Ländern regelmäßige Reinigung und Desinfektion und niedrigere Preise, in Deutschland außerdem zuverlässige Verfügbarkeit, während Premiumangebote am wenigsten nachgefragt waren. (PwC, 2020, S. 21)

Autonome DRT-Angebote

Demand Responsive Transport wird als Mobilitätsmodell der Zukunft betrachtet, muss aber seinen Platz erst noch erobern. Betrachtet man mögliche autonom fahrende DRT-Angebote, dann muss auch erst das Vertrauen in die Technik hergestellt werden.

Laut einer PwC-Studie ist die Akzeptanz für autonomes Fahren in Deutschland, ebenso wie in USA, eher gering. In beiden Ländern lehnen 36% der Befragten das autonome Fahren komplett ab. Als wichtigste Gründe hierfür werden genannt: die Freude am Fahren, gefolgt von Angst vor Kontrollverlust. 36% der Deutschen und 38% der US-Amerikaner würden autonomes Fahren nutzen, 28% bzw. 26% nur bei langsamem Fahren oder als Einparkhilfe. (PwC, 2020, S. 19). Datenschutzrechtliche Bedenken und Angst vor Hackerangriffen sind – wie bereits weiter oben erwähnt - weitere Gründe für mangelndes Vertrauen.¹⁴

Insgesamt gehen die Studien davon aus, dass autonome Fahrzeuge der Stufe 4 ab ca. 2025 schrittweise den Markt durchdringen könnten, zunächst als People-Mover oder in der Last-Mile-Logistik mit niedrigen Geschwindigkeiten und in abgegrenzten Gebieten. Mit einer breiten Anwendung autonomer Fahrzeuge der Stufe fünf rechnen die Autoren frühestens in 15 Jahren.

4.2.2.3 Geteilte autonome DRT-Verkehre - Potentiale und Chancen

A priori kann autonomes Fahren den Verkehr attraktiver machen. Das Fahren wird sicherer und komfortabler, die Fahrzeit kann für andere Dinge genutzt werden, das Stress-Level im Straßenverkehr sinkt. Darüber hinaus eröffnet für Menschen ohne Fahrerlaubnis oder mit altersbedingten und anderen Einschränkungen DRT Mobilitätsangebote von Tür zu Tür. „Darüber hinaus können sie eine sinnvolle Ergänzung zum regulären öffentlichen Personenverkehr darstellen oder zu seiner

¹⁴ Zu Akzeptanzfragen stellt die Studie „Die Automatisierung des Automobils und ihre Folgen“ der Agora Verkehrswende fest: „In Bezug auf die Nutzung automatisierter Fahrzeuge für neue Mobilitätsangebote, insbesondere kollaborative Angebote mit geteilten Fahrten (Ridepooling), wird zudem auf potenzielle Einschränkungen der Privatsphäre und des Komforts sowie auf Sicherheitsbedenken (z. B. Vertrauenswürdigkeit der Mitfahrenden oder Hackerangriffe) verwiesen. Auch datenschutzrechtliche Bedenken stellen eine wichtige Akzeptanzbarriere dar.“ (Agora Verkehrswende 2020, S.14)

PAVE

Attraktivitätssteigerung beitragen, indem sie beispielsweise in ÖPNV-Systeme integriert oder auf der ersten und letzten Meile eingesetzt werden“ (Agora Verkehrswende, 2020, S. 11).

Heutige Besetzungsgrade im Ridepooling liegen zwischen 2 und 3 Personen pro Fahrt. Wenn es gelingt, autonome DRT-Fahrten stärker zu bündeln, könnte autonomes DRT zur Verkehrsreduktion beitragen.

Allerdings sind auch Negativeffekte zu erwarten, wie eine Zunahme an Leerfahrten durch autonome Parkplatzsuche oder die Vermietung von Privatfahrzeugen. Der VDI vermutet, dass eine erhöhte Nachfrage nach individuellen Taxidiensten erwachsen könnte.¹⁵ Das wäre eine Entwicklung, die aus verkehrlicher und ökologischer Sicht nicht wünschenswert wäre.

Auch in den Interviews wurde immer wieder betont, dass viele Menschen autonomes Fahren im städtischen Umfeld als zu schwierig und riskant ansehen und deshalb Situationen oder Räume gefunden werden müssten, die weniger komplex sind und aus denen andere Verkehre verbannt werden. Das Potenzial für autonomes Fahren sahen sie eher auf der Langstrecke oder im ländlichen Raum oder in abgeschlossenen Gebieten wie Werksgeländen oder Uni-Campussen.¹⁶ Alternativ könnten private Pkw aus den Innenstädten ausgesperrt werden, so dass die Straßen frei für DRT werden.¹⁷ Dafür müssten aber die institutionellen Rahmenbedingungen durch die Städte so gestaltet werden, dass autonomes gebündeltes Fahren in ausgewählten Gebieten privilegiert wird. (siehe dazu auch Abschnitt 4.4.5.4 „Politische/institutionelle Rahmenbedingungen und Rolle der Kommunen“)

Folgende automatisierte oder automatisierbare DRT-Modelle können derzeit unterschieden werden:

1. Automatisierte Shuttles im Liniendienst

Nach den Prognosen des VDI werden automatisierte Shuttles bereits in wenigen Jahren als Ergänzung zum öffentlichen Personennahverkehr am gemischten Straßenverkehr teilnehmen, wobei sie zunächst mit geringen Geschwindigkeiten auf ausgewählten und gekennzeichneten Strecken verkehren und an definierten Haltestellen halten.

Für diese Art des autonomen Liniendienstes gibt es in Deutschland schon heute eine Reihe prominenter Beispiele, die in der Regel im Auftrag ortsansässiger öffentlicher Verkehrsunternehmen operieren (z.B. der Bad Birnbach Shuttle der Regionalbus Ostbayern oder „Tabula“ der Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH (VHH) in Lauenburg/Elbe). Als solche haben sie einen festen Fahrplan, dienen häufig touristischen Zwecken und sind in das ÖPNV-Angebot integriert. Mithilfe der Pilotanwendungen wird sowohl die Robustheit der technischen Systeme erprobt, als auch das Vertrauen in die neue Technologie gestärkt.

2. Automatisiertes DRT Pooling (gebündelter flexibler Verkehr)

Dank Digitalisierung können in Zukunft sowohl Fahrzeiten als auch Strecken flexibilisiert werden. Intelligente Routing-Algorithmen und digitalisierte Buchungssysteme ermöglichen Effizienzsteigerungen, indem Fahrten mit ähnlichem Ziel gebündelt werden und beliebige Haltepunkte angefahren werden.¹⁸ Die Nutzer profitieren indem sie weniger zahlen. Der Anbieter erzielt eine bessere

¹⁵ Es sei zu erwarten, dass „ein (autonomer) Taxidienst eine Attraktivität bietet, die zu einer Steigerung der individuellen Mobilität und somit zu einer weiteren Verknappung des öffentlichen Raums führt“ (VDI, 2019, S. 19).

¹⁶ OD3, Aussage eines Interviewpartners

¹⁷ OD4, Aussage eines Interviewpartners

¹⁸ „Langfristig ist davon auszugehen, dass Shuttles in allen Straßen genutzt werden können und dass das Anhalten bedarfsgerecht überall in der Stadt möglich ist.“ (VDI, 2019, S.14)

PAVE

Fahrzeugauslastung, hat weniger Leerkilometer und wird umweltfreundlicher. Dabei stellen jedoch die lückenlose Umfeldwahrnehmung sowie die „Interpretation und Antizipation der weiteren Entwicklung der Verkehrssituation“ eine der größten technischen Herausforderungen dar (VDI, 2019, S. 14f).

3. Robotaxis

Das fahrerlose Taxi oder Robotaxi ist in erster Linie ein individuell genutztes Verkehrsmittel. Es entspricht einem heutigen Taxidienst, nur ohne Fahrer. Allerdings wird die Fahrt über eine Internetplattform vermittelt, bei der der Nutzer seine Kunden- und Bezahlungen hinterlegt hat.

„Aus Nutzerperspektive bietet das fahrerlose Taxi eine Kombination von Vorzügen des automatisierten Fahrens, wie große Flexibilität und Sicherheit, mit der Praktikabilität und Verfügbarkeit eines Mobilitätsservice.“ (VDI, 2019, S. 18)

Die Eigenwirtschaftlichkeit der individuell genutzten autonomen Taxis wird letztlich, wie bei allen bedarfsgesteuerten Verkehren von der Nachfrage bestimmt. Eine Verwertung der verknüpften Kunden- und Fahrprofile könnte neue Einnahmemöglichkeiten über Werbung generieren, zusätzliche Dienste wie Bank- und Versicherungsgeschäfte in Verbindung mit den neuen Zahloptionen könnten angeboten werden.

4. Autovermietung, Carsharing und Ridehailing – eine Verschmelzung der Dienste

Grundsätzlich werden Ridepooling, Ride- und Carsharing und in Zukunft auch die fahrerlosen Taxidienste an Bedeutung gewinnen und durch das autonome Fahren zu einem Dienstleistungsangebot verschmelzen.¹⁹

Diese Verschmelzung ist auf dem Markt der klassischen Autovermieter schon heute zu beobachten. Das frei flottierende Carsharing hat zwar bezüglich der Mitgliederzahl dem stationsbasierten mittlerweile den Rang abgelaufen, doch zeigt z. B. die jüngste Unternehmensfusion von DriveNow und Car2Go zu Reach Now, dass die Nachfrage nicht ausreicht um Gewinne zu erzielen. Reach Now setzt daher an Stelle des einfachen Carsharings auf eine verkehrsmittelübergreifende Plattform zur Fahrtenplanung und Vermittlung, die öffentliche Nah- und Fernverkehrsmittel integriert. Eine solche Plattform wird in Berlin z. B. auch von Jelbi angeboten, da man davon ausgeht, dass der Nutzer der Zukunft flexibel zwischen Verkehrsträgern wechseln und sich nicht mehr an ein Verkehrsmittel binden möchte.

Auch die klassischen Autovermietungen stellen sich neu auf. Bei der Neuausrichtung gilt die Sixt Autovermietung als Vorreiter. Sixt organisiert sich als Mobilitätsanbieter, mit Sixt Rent, Sixt Share and Ride, die über eine App, bzw. Plattform verbunden sind. So werden Carsharing und Autovermietung zusammengebracht und beide können als digitalisierte Angebote flexibel für den jeweiligen Zweck je nach Nachfrage eingesetzt werden. Durch das autonome Fahren entfielen die Abholung des Autos beim Vermieter und das Fahrzeug führe selbständig zur Station zurück. Die Plattform soll durch weitere Angebote erweitert werden, wozu auch neue Preismodelle gehören, wie etwa nach Abrechnung der reinen Fahrkilometer. Auf diese Weise könnte ein Mietwagen durch „Pay as you use“ günstiger sein als die Nutzung des eigenen Autos.

¹⁹ „Die Unschärfe zwischen fahrerlosem Taxi und Shuttle (wird...) somit durch die Ausweitung der einzelnen Dienste weiter zunehmen. (...) Taxi, Ridesharing, Carsharing und ein Teil des ÖPNV entwickeln sich angesichts autonomer Fahrzeuge dann auf dieselben Einsatzszenarien hin. Carsharing-Swarm und Robotaxis verschmelzen perspektivisch zu einem Mobilitätsangebot.“ (VDV, 2015, S. 9)

PAVE

„(Wir sind) ... überzeugt, dass die Produkte Autovermietung und Carsharing nur in der Kombination skalierbar sind. Im Grunde sind Free Floating, stationäres Carsharing, digitale Stationen und Autovermietung das Gleiche. Die Kunden mieten ein Auto auf Zeit.“ (LG26)

In den USA kooperiert Sixt mit dem Ridehailing-Anbieter Lyft, um auch hier Synergien nutzen zu können. Neben der Integration verschiedener Mobilitätsangebote auf einer Plattform (bei Sixt: One) haben die Autovermietungen den strategischen Vorteil, dass sie über ein großes internationales Stationsnetz verfügen. Damit sind sie nicht nur in den Zentren der Metropolen präsent, sondern auch in kleineren Städten und ländlichen Regionen.

Wie können nun diese genannten DRT-Modelle am besten eingesetzt werden. Folgende Geschäftsmodelle, die heute bereits praktiziert werden, könnten durch Automatisierung gewinnbringend werden:

Geschäftsmodell ÖPNV Integration

Eine Herausforderung für die Weiterentwicklung automatisierter DRT-Dienste sind die hohen Investitionskosten, so dass möglicherweise nur große Unternehmen diese Dienste anbieten können. Kleinere Unternehmen auf dem Land könnten nicht mithalten und das Versorgungsungleichgewicht zwischen Stadt und Land könnte sich weiter verstärken (VDI, 2019, S. 19).

Der Schweizer Verkehrswissenschaftler Kai Axhausen schlägt daher vor, Robotaxis in das öffentliche Verkehrsangebot zu integrieren. Das heißt „(...) die automatisierten Taxis gar nicht als Konkurrenz zu betrachten, sondern als Ergänzung des klassischen ÖPNV Angebots. Geht man beispielsweise davon aus, dass der Service (einer Flotte automatisierter Taxis) von einem Verkehrsunternehmen angeboten wird, mit entsprechender Regulierung und Steuerung, so zeigen unsere Simulationen einen Marktanteil von über 50% oder sogar 60%.“ (Axhausen, 2019, S 154f).

Im Axhausen-Szenario wird ein Kostenvorteil von mehr als 70% durch den Wegfall der Personalkosten für den Fahrer erwartet. Das Potenzial dieser Flotte könnte zusätzlich durch Subventionen auf den Fahrpreis und Park&Ride noch besser ausgelastet werden. Axhausens Vorschlag, autonome Taxis in ein öffentliches Verkehrsangebot zu integrieren soll sicherstellen, dass nicht nur die attraktiven Haupttrouten in der Innenstadt bedient werden, sondern auch ein erweitertes Stadtgebiet.

Nicht autonome DRT-Angebote fahren schon heute im Auftrag von Verkehrsbetrieben. Dort sind sie rentabel, weil sie einen teuren Busverkehr ersetzen oder preisgünstig neue Gebiete (Netliner für die ASEAG in Aachen) oder neue Dienstleistungsangebote erschließen (Door2Door betreibt mit dem ParkstadtTiger für die Münchner Verkehrsbetriebe einen Pendlershuttle). Dieses Geschäftsmodell, d.h. als Kooperationspartner oder Subunternehmer von öffentlichen Verkehrsbetrieben, wird auch in Zukunft Bestand haben. Aus strategischer Sicht eröffnet sich für die Branche der öffentlichen Verkehrsunternehmen die Chance, sich als Integrator für alle Mobilitätsangebote zu positionieren.²⁰

²⁰ „Mit dem Sprung zum vollautonomen Fahren ergeben sich jedoch auch neue Chancen, da vollautonome Fahrzeuge auch als Teil einer öffentlichen Flotte (Roboter-Taxis, Carsharing) bzw. als Teil des ÖPNV eingesetzt werden können. (...) Für die Verkehrsunternehmen und Verkehrsverbände, bzw. für die Branche des ÖPNV gesamt gilt es aus strategischer Sicht, sich als Integrator aller Mobilitätsangebote zu positionieren und sich bereits heute mit den Kunden zu vernetzen und ihnen Services zu bieten.“ (VDV, 2015, S. 1+2)

PAVE

Geschäftsmodell Mitarbeitermobilität

Viel können DRT-Anbieter aber auch erreichen, wenn sie mit Akteuren aus der freien Wirtschaft zusammenarbeiten. Arbeitgeber, für die autonome Pendlershuttles zur nächsten Bahnstation oder als Mitarbeitertransporte zum und/oder auf dem Firmengelände interessant sein können²¹ gibt es bereits heute.

So hat ioki (eine 100%ige Tochter der DB) in einem seiner Vorzeigeprojekte gemeinsam mit der Telekom den etablierten Mitarbeiter-Shuttle-Service des Unternehmens optimiert und digitalisiert. Seit Mai 2020 können die Mitarbeiter über die ioki DRT-Plattform an drei Telekom-Standorten das Shuttle flexibel und bedarfsgerecht buchen. Dabei werden die Fahrtenanfragen durch einen Algorithmus effizient gebündelt. Pro Jahr nutzen bereits 120.000 Fahrgäste den Mitarbeiter-Shuttle-Service der Telekom. (ioki.com)

Geschäftsmodell Immobilienentwicklung

Auch die Wohnungswirtschaft hat die Attraktivität autofreier oder -armer Quartiere erkannt. Sie zeigt sich aufgeschlossen gegenüber neuen Mobilitätsangeboten, durchaus auch mit autonomen Fahrzeugen, da es sie von der Bereitstellung von Parkplätzen entlasten kann, die laut Stellplatzverordnung gesetzlich vorgeschrieben sind, jedoch von Seiten der Käufer/Mieter nicht immer nachgefragt werden. Viele Gemeinden haben ihre Stellplatzsatzungen dahingehend flexibilisiert. Durch eine DRT-Anbindung an das öffentliche Verkehrsnetz werden Neubaugebiete für Menschen, die Ruhe vor dem Großstadtlärm suchen attraktiver, und der Wert der Immobilie steigt.

Dies hat auch der Investor erkannt, der im Süden Berlins, in Lichterfelde, einen „neue(n) Stadtteil für smartes, ökologisch soziales und urbanes Leben im 21. Jahrhundert, in dem urbanes Leben neu gedacht und organisiert wird“ (Groth-Gruppe, Neulichterfelde) errichten will. Dazu gehören u. a. eine klimaneutrale, lokale Energieversorgung und emissionsarme Mobilitätsangebote.

Einer der Innovationspartner des Investors, die Toyota Kreditbank, hat für Neulichterfelde eigens ein Mobilitätskonzept mit dem Ziel der Reduktion des motorisierten Individualverkehrs entwickelt. Die Bewohner sollen zur Nutzung des ÖPNV, des Fahrrads sowie elektrischer oder wasserstoffbetriebener Alternativen bewegt werden. Zu diesem Zweck wird es ein Mobilitäts-Hub zur Bündelung aller Mobilitätsangebote sowie mehrere Mobilitäts-Spots mit Sharing-Angeboten für Kurz- und Mittelstrecken geben. Auch ein DRT-Service ist Bestandteil dieses Konzepts.²²

Ähnliche Konzepte mit ÖPNV-Anschluss und Mobilitäts-Hub lassen sich auch in vielen anderen Städten finden, z. B. Hamburg (Oberbillwerder), München (Domagkpark), Darmstadt Lincoln-Siedlung) Köln (Stellwerk 60) etc. In der Seestadt Aspern in Wien wird das Mobilitätsangebot seit Juni 2019 durch zwei autonom im Linienverkehr fahrende Kleinbusse abgerundet (VCD, 2020, aspern.mobil LAB).

²¹ OD1, Aussage eines Interviewpartners

²² <https://neulichterfelde.de>

PAVE

Ähnliche Planungen gibt es in Berlin in der neu geplanten Siedlung Gartenfeld in Spandau und in der „Urban Tech Republic“ auf dem Gelände des Flughafens Tegel.²³ Dort ist unter anderem geplant, an den Straßen Sensoren zu installieren, die für die Steuerung des Verkehrs genutzt werden können.

Nicht zufällig bieten Start-ups wie „aoty“ Beratung für Neue Mobilität gezielt für Immobilienunternehmen an, die schon bei der Bauplanung nachhaltige Mobilitätsstandards einbeziehen wollen. Das Angebot geteilter Mobilitätsdienste ersetzt Parkhäuser und erschließt neue Zielgruppen, denen der Stellplatz für das allein genutzte Fahrzeug nicht mehr so wichtig ist.

4.2.2.4 Politische/institutionelle Rahmenbedingungen und Rolle der Kommunen

Plattform-Mobilität und Demand Responsive Transport sind Mobilitätsformen, die in den derzeitigen gesetzlichen Rahmenbedingungen nur unzureichend abgebildet werden. Daher stellt sich für den Erfolg der DR- Fahrdienste die aktuelle Gesetzgebung als erhebliches Hindernis dar. Genehmigungen dauern zu lange, zu viele Behörden sind involviert und vielfach sind Entscheidungen Auslegungssache seitens der beteiligten Kommune. Dass die gesetzlichen Rahmenbedingungen überarbeitet werden müssen, darin waren sich alle Interviewpartner einig.

Im Zusammenhang mit automatisiertem Fahren gibt es juristischen Anpassungsbedarf auf vielen Ebenen. Das betrifft den Fahrer, die technische Zulassung der Fahrzeuge, Datensicherheit und die Sicherheit der Verkehrsinfrastruktur. Vieles davon kann gar nicht im deutschen Recht allein adressiert werden.

Das Zulassungsrecht beispielsweise ist auf europäischer Ebene harmonisiert und verweist z. B. für die Zulassung automatisierter Lenkanlagen in Großserienfahrzeugen, die schneller als 10 km/h fahren, auf Regeln der UNECE (eine Arbeitsgruppe des Vereinten Nationen) (Lutz, 2019). Die Nationale Plattform Zukunft Mobilität fordert deshalb, das Typpengehmigungsverfahren und das Straßenverkehrsgesetz zu modernisieren. Eine nationale Initiative soll Lösungsansätze erarbeiten, um einen einheitlichen, prognostizierbaren Typpengehmigungsprozess basierend auf klaren Regeln zu etablieren, die es auch in den Prozessen der EU und der UNECE einzubringen gelte.

Darüber hinaus muss für die Genehmigung autonomer Shuttles das Personenbeförderungsgesetz (PBefG) angepasst werden. Laut der Nationalen Plattform „Zukunft Mobilität“ müssten im Personenbeförderungsgesetz „neue Mobilitätsdienstleistungen wie digital vermittelte Mobilitätskonzepte (z. B. Ridepooling Dienste) (...) ausgewogene, innovationsfreundliche Festlegungen erfahren“ (NPM, 2019, S. 11).

Die befragten Experten begrüßten zwar die Novellierung des bestehenden Personenbeförderungsgesetzes, erachteten sie aber als nicht ausreichend, um den neuen Mobilitätsformen gerecht zu werden. Insbesondere die Rückkehrpflicht zum Betriebshof erzeugt viele Leerkilometer und verhindert eine effiziente Routenoptimierung. Sie forderten, dass mehr Rechtssicherheit geschaffen, Genehmigungen vereinfacht und möglichst bundesweit einheitlich geregelt werden.

²³ So wird auf dem fast 500 ha großen Gelände des ehemaligen Flughafens Tegel ein neues Wirtschaftszentrum und eine Modellstadt entstehen, für die bereits 2014 ein Mobilitätskonzept erarbeitet wurde, das für den öffentlichen Nahverkehr den Einsatz eines zukunftsweisenden Verkehrsmittels mit innovativem Charakter“ vorsieht, das eine „möglichst flexible Linienführung ermöglichen“ soll.

PAVE

Die Anfang März 2021 angenommene Gesetzesänderung sieht zwar eine Vereinfachung der Genehmigung vor, indem eine neue Verkehrsform „gebündelter Bedarfsverkehr“ dauerhaft erlaubt werden kann, die Rückkehrpflicht soll jedoch im Grundsatz beibehalten werden, mit der Möglichkeit diese durch die Festlegung weiterer Abstellorte ab einer bestimmten „Distanz zum Hauptbetriebsitz“ näher auszugestalten.

Die Kommunen erhalten somit mehr Einfluss. Ihren eigenen Nahverkehr können sie bis zu einem gewissen Grad vor der Konkurrenz von Mietsammeltaxen schützen, indem sie etwa Mindestpreise für deren Fahrten vorgeben.

Ganz allgemein, sehen sowohl die Befragten als auch eine Reihe aktueller Studien klar die Verantwortung auf Seiten der Politik, damit ein positiver Umwelteffekt durch die neuen Mobilitätsdienste sowie der Fahrzeugautomatisierung erreicht werden kann.²⁴

Folgende Handlungsbedarfe sieht beispielsweise die Agora Studie:

- eine „deutliche Stärkung kollaborativer Mobilitätsangebote“ und eine **Angebotsaufwertung des öffentlichen Verkehrs (ÖPNV)** durch bedarfsgerechte automatisierte Angebote auf der ersten und letzten Meile.
- „**regulatorische Eingriffe in den motorisierten Individualverkehr** im Sinne einer Gleichbehandlung aller Verkehrsträger.“
- „**fiskalpolitische Maßnahmen** (etwa zur Beschränkung von Leerfahrten)“

Befähigung der Gemeinden

Die beiden ersten Forderungen liegen in der Kompetenz der Städte und Gemeinden, aber nach Einschätzung der von uns befragten Experten sind deren Verwaltungen und Entscheider oft nicht ausreichend auf die Herausforderungen der digitalen Mobilität vorbereitet. Gerade kleineren Kommunen fehlt es oft an Knowhow und personellen Ressourcen, um die Chancen und Herausforderungen der DRT-Fahrdienste zu erkennen und sie für ihre eigenen Ziele zu nutzen. Hier wäre eine unabhängige Beratung dringend erforderlich, die nicht wie aktuell meist der Fall, nur durch die DRT-Anbieter erfolgt.

Für kleinere Kommunen sollte eine unabhängige Stelle z.B. auf Landesebene eingerichtet werden über die Kommunen beraten und miteinander vernetzt, wie das bei der Deutschen Konferenz für Mobilitätsmanagement bundesweit und im Zukunftsnetzwerk NRW für das Bundesland Nordrheinwestfalen bereits geschieht.

Bedarfsanalyse

Für große wie kleine Städte gilt dabei, dass sie sich erstmal darüber klar werden müssen, was verträglich für ihre Stadt ist. Eine solche Selbsteinschätzung liegt in der Regel nicht vor. Für die Vergabe von Operationsgebieten ist eine Bedarfsanalyse unabdingbar, denn erst dann kann beurteilt werden, ob ein Anbieter die Anforderungen erfüllt, wie viele Anbieter eine Stadt verträgt oder wie der Fahrdienst gestaltet sein muss, um zur Verkehrsreduzierung oder Umweltverträglichkeit beizutragen. Unter anderem gilt es zu beachten, dass es nicht zur Kannibalisierung des ÖPNV auf den Hauptachsen und zu

²⁴ So schreibt Schaller Consulting in „Agora Verkehrswende 2020“ in „Die Automatisierung des Automobils und ihre Folgen“ über automatisiertes Fahren: „Die Fahrzeugautomatisierung im Personenverkehr führt keineswegs auch „automatisch“ zu positiven Effekten für die Verkehrswende. Vielmehr ergeben sich Handlungsbedarfe für Entwicklungspfade in Richtung nachhaltiges Mobilitätssystem.“ (Agora Verkehrswende 2020, S. 23)

PAVE

einer Abwanderung von den aktiven Verkehrsmodi Radfahren und zu Fuß gehen kommt. Das gilt gleichermaßen für autonome Verkehrsangebote.

Weitere Bewertungskriterien könnten die Verträglichkeit zum bereits bestehenden Verkehrsaufkommen - in Hamburg misst Wunder die Wirkung auf den Verkehr beispielsweise mit Heat Maps -, die Fahrerbezahlung, die Qualität der Algorithmen und Effekte durch Umstieg von anderen Verkehrsträgern sein.²⁵ Was geschieht, wenn die Bedarfsanalyse nicht sorgfältig gemacht wird, ist in Berlin zu beobachten, wo zu viele Anbieter sich unter sehr ungleichen Wettbewerbsbedingungen innerhalb des S-Bahn-Rings gegenseitig Konkurrenz machen, während andere Stadtteile gar nicht bedient werden.

Zusätzlich sollte eine regelmäßige Systembeobachtung etabliert werden, da eine Stadt sich über die Zeit verändert und sich z.B. durch Bevölkerungszuwachs, neue Siedlungsgebiete, veränderte Pendlerströme die Bedarfe verändert. Dringend erforderlich ist hier das Nachrüsten von Personal und von Kompetenz in den Verkehrs- und Stadtplanungsbehörden und deren Nachbarbehörden.

Regulatorische Eingriffe

Auch in Bezug auf die notwendigen regulatorischen Eingriffe müssen die Städte zunächst die aktuelle Situation untersuchen und offenlegen. Dazu gehört neben den Aspekten der Lebens- und der Luftqualität sowie der Sicherheit im Straßenverkehr auch die – in aller Regel ungerechte - Flächenverteilung für die einzelnen Verkehrsmittel. Am Beispiel Berlin beträgt die rechnerisch allein durch alle parkenden Pkw beanspruchte Fläche rund 17 Quadratkilometer und damit knapp 13 Prozent der Verkehrsfläche, während öffentliche Straßenfahrzeuge zusammen nur etwas über 0,3 Quadratkilometer benötigen (Scherf 2019).

Die im folgenden genannten Maßnahmen können zur Auflösung dieses Widerspruchs beitragen und damit auch (im Wortsinn) Raum für neue Verkehrsmodelle - z.B. gepoolte autonome DRT-Angebote – schaffen. Die Wettbewerbschancen solcher alternativen Mobilitätsangebote würden klar steigen, wenn die restriktiven Maßnahmen für sie nicht anwendbar wären.

Mehr noch, alternative Mobilitätsangebote können als Ausgleich für aus Gründen der Luftreinhaltung notwendige oder zur Verbesserung der Lebensqualität gewünschte Innenstadtsperren angeboten werden.

City-Maut

Als Pionier im Bereich **City-Maut** gilt Singapur, wo bereits 1975 ein Area Licencing Scheme eingeführt wurde, das für einen Rückgang des Einfahrtverkehrs in die Zone um 44% sorgte (ifo, 2020, S. 33).

Das Beispiel Singapur steht auch beispielhaft für folgende wichtige Erfolgsfaktoren:

1. Mit einer City Maut allein sind keine schnellen Erfolge zu erzielen. Begleitende Maßnahmen waren in Singapur eine extrem restriktive Vergabe von Fahrzeug-Neuzulassungen, die Erhöhung der Mineralölsteuer bei gleichzeitig massivem Ausbau und Modernisierung des öffentlichen Verkehrsnetzes (Rang 1 weltweit, was Erreichbarkeit, Preis, Effizienz, Komfort und Nachhaltigkeit

²⁵ [1] Siehe auch MATSim Szenarien zum DRT Verkehr der TU Berlin im vorliegenden Bericht, die zeigen, dass viele DRT Nutzer vom ÖPNV abwandern.

PAVE

betrifft), die Einrichtung von 15 Park & Ride Hubs mit Shuttlebussen und die Erhöhung der Parkgebühren.

2. Eine kontinuierliche Überwachung und Korrektur der Maßnahmen sind unerlässlich. So hat der Stadtstaat bereits 1998 die einmal täglich zu zahlende Gebühr durch ein Electronic Road Pricing ersetzt, so dass bei jeder Einfahrt in die Zone eine Gebühr zu zahlen ist. Dadurch wurden die Einfahrten nochmals um 10-15% reduziert.

3. Die Bürger müssen umfassend informiert werden. Vor Einführung der Maßnahmen im Jahr 1998 verschickte die Regierung Singapurs an alle Fahrzeugbesitzer Broschüren, schaltete Anzeigen in den Medien, um detailliert die Vorteile gegenüber dem vorherigen System zu erläutern.

Diese Erfahrungen haben andere Städte wie London, Oslo, Stockholm oder Mailand bei ihren City Maut-Modellen berücksichtigt. Besonders in Stockholm und Mailand ist es in beispielhafter Art gelungen, die Öffentlichkeit für solche Maßnahmen zu gewinnen. In beiden Städten stimmten die Bürger:innen nach einer Testphase in einem Referendum für die Fortführung der Programme.

In Deutschland ist die Diskussion um eine City-Maut bisher nicht über einzelne Studien hinausgekommen. So ließ die Stadt München die verkehrlichen Wirkungen einer Anti-Stau-Gebühr (eine Art City Maut) in München analysieren. Das ifo geht in dieser Studie davon aus, dass der verkehrslenkende Effekt einer Anti-Stau-Gebühr in München zu 85% dadurch zustande käme, dass die Fahrer*innen auf den ÖPNV umsteigen, so wie es auch in anderen Städten mit City-Maut beobachtet wurde. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass der ÖPNV ausgebaut werden muss, um die steigende Nachfrage zu bedienen. Dafür – und für die Abfederung sozialer Härten - können und sollten Mittel aus der Gebühr zweckgebunden eingesetzt werden, was wiederum die Akzeptanz und die verkehrslenkende Wirkung der Gebühr verstärken würde. (ifo, 2020, S.4ff)

Zu beachten ist dabei jedoch, dass, wie das Beispiel London zeigt, die Einnahmen aus der Gebühr aufgrund der Abwanderung der Autofahrer unter dem erwarteten Niveau bleiben können. Dann muss es einen Plan B für die Finanzierung der erforderlichen Ausbaumaßnahmen des ÖPNV geben.

Die Machbarkeitsstudie „Ergänzende Instrumente zur Finanzierung des Berliner ÖPNV“, die das Ingenieur- und Managementberatungsunternehmen Ramboll im Auftrag des Berliner Senats erstellt hat, geht ebenfalls auf diesen Aspekt ein. Die Studie hat eine Reihe möglicher Finanzierungsmodelle für eine Stärkung des ÖPNV untersucht und nach potenziellen Zusatzeinnahmen, Verwaltungskosten, verkehrlicher Wirkung, politischer Sensibilität und Umsetzungsgeschwindigkeit bewertet.

Als eine der erfolgversprechendsten Maßnahmen stellte sich dabei eine „Bepreisung des motorisierten Verkehrs als einfaches Kordonsystem auf dem Gebiet innerhalb des S-Bahn-Rings, auch großer Hundekopf genannt,“ heraus. Die Studie betont, dass „das primäre verkehrspolitische Ziel der City-Maut (darin liegt), eine verkehrslenkende Wirkung zugunsten des Umweltverbands zu entfalten.“ Die Erzielung von Einnahmen sei dabei zwar ein wichtiger und willkommener Nebeneffekt²⁶, der im Zweifel jedoch nachrangig sei, „da im Erfolgsfall die Einnahmenbasis sinkt“ (Ramboll, 2020, S. 12).

²⁶ [1] Dabei werden die „empirisch gemessenen Reduktionen der Nachfrage von 20% (Stockholm, kurzfristig) und 40% (London, langfristig) angenommen“ (Ramboll, 2020, S. 12f). Unter Berücksichtigung dieser Reduktion könnten mit einer City-Maut von 5€ pro Tag zwischen 337 und 550 Millionen € pro Jahr generiert werden (bei 8€ 539-880 Mio. – Ramboll, 2020, S.112).

PAVE

Parkgebühren

Eine flächendeckende Erhebung von (höheren) Parkgebühren für Anwohner (120 oder 240 €/Jahr) und Gäste (3 oder 4€/h) könnte laut der gleichen Studie vergleichbare Ergebnisse erwirtschaften (Ramboll, 2020, S. 117) und ebenfalls einen positiven verkehrslenkenden Effekt im Sinne der oben erwähnten Verteilungsgerechtigkeit erzielen.

Auch die Münchner Studie untersucht die Wechselwirkung einer City-Maut mit einer Erhöhung der Parkgebühren und kommt zu dem Ergebnis, dass eine Kombination höherer Parkgebühren von 10€ pro Tag mit einer Bepreisung des fließenden Verkehrs von 6€ pro Tag den Pkw-Verkehr innerhalb des Mittleren Rings im Mittel des gesamten Tages um mehr als 23%, in der Spitzenzeit um 33% verringern würde. (ifo, 2020, S.3)

Kritisiert wird das Projekt für die sozialen Härten, die entstehen, wenn alle Autofahrer gleichermaßen belastet werden. Der in der Studie angeregte Ausgleich auf Basis der Einnahmen wäre nicht ausreichend. Sinnvoller wäre es, von vornherein die Gebühr nach sozialen und umweltpolitischen Gesichtspunkten zu staffeln. Darüber hinaus weist der regierende Oberbürgermeister Dieter Reiter darauf hin, dass zunächst das ÖPNV-Angebot entsprechend erweitert werden müsse. (dpa, Süddeutsche Zeitung, 14.09.2020, S. 1).

Die Erhöhung von Parkgebühren kann auch in anderer Hinsicht im Sinne der notwendigen Mobilitätswende genutzt werden. So hat Kopenhagen im Rahmen seiner Bemühungen, bis 2025 klimaneutral zu werden, im Januar 2020 verfügt, dass Elektrofahrzeuge in der Stadt kostenlos parken können, während Verbrenner zahlen müssen.

„Autofreie“ Innenstädte

Auch das Thema der (weitgehend) autofreien Innenstädte ist in anderen Ländern bereits viel weiterentwickelt, als in Deutschland. Kopenhagen und Amsterdam werden immer wieder als Beispiele für diesen Trend genannt und Brüssel und Paris wollen zwar nicht alle Autos, aber immerhin die mit Verbrennungsmotor bis 2030 aus der Innenstadt verbannen.

In Italien wiederum hat fast jede Stadt schon seit vielen Jahren eine mehr oder weniger große verkehrsberuhigte Zone, in die nur Anwohner oder Lieferanten, teilweise auch umweltfreundliche Fahrzeuge, kostenfrei einfahren dürfen. Da schon heute ein Teil der DRT Pooling-Flotten elektrisch fährt, wäre es durchaus vorstellbar, dass sie innerhalb der Zonen den Verkehr sicherstellen könnten.

Das ambitionierteste Projekt in Deutschland ist die Berliner Initiative Volksentscheid Berlin autofrei. Diese sieht vor, dass die Berliner 2023 in einer Volksabstimmung ein Gesetz beschließen können, mit dem der gesamte Innenstadtbereich innerhalb des S-Bahn-Rings (88 km²) weitgehend autofrei wird. Weitgehend bedeutet hierbei, dass Fahrten behinderter Menschen, Fahrten im öffentlichen Interesse (Rettungs- und Pflegedienste, Polizei und Feuerwehr) und Transporte schwerer Lasten möglich sein sollen (volksentscheid-berlin-autofrei.de). Ein Ausbau des ÖPNV mit neuen Bus- und Tramlinien wird dabei von der Initiative als wesentliche Voraussetzung einer erfolgreichen Umsetzung gesehen.

Transportlücke schließen

Diese und andere regulative Maßnahmen wie Verknappung von Parkraum oder autofreie (neue) Stadtgebiete (s. unter 4.4.5.3, Unterpunkt „Geschäftsmodell Immobilienentwicklung“) hätten enorme Auswirkungen auf die Befriedigung der Mobilitätsbedürfnisse der Bewohner.

PAVE

Klar ist, dass eine vom motorisierten Individualverkehr befreite Stadt (und auch nur autofreie Stadtquartiere) nur dann erfolgreich umgesetzt werden können, wenn den Menschen die entsprechenden Alternativen für ihre Mobilität angeboten werden. Autonome Mobilitätsdienste könnten dazu einen wertvollen Beitrag leisten.

Das internationale Automobil-Beratungsunternehmen Berylls hat errechnet, dass ab 2030 in Europa pro Jahr mindestens 250 Milliarden Personenkilometer neu bedient werden müssen, weil Menschen nicht mehr mit dem Auto in bestimmte Gebiete fahren können. Bei der Schließung dieser enormen Transportlücke können DRT-Poolingdienste (oder „gebündelter Bedarfsverkehr“) eine große Rolle spielen. Mit einem eigenen DRT können Kommunen dabei steuernd eingreifen und, anders als private Anbieter, dafür sorgen, (...) dass der neue ÖPNV auch wirklich alle Menschen erreicht und die Transportlücke schließt“ anstatt nur lukrative Bereiche in den Innenstädten und Szenevierteln zu bedienen (Tagesspiegel, 27.10.2020).

Verkehrliche Wirkungen einer „autofreien“ Stadt

Diverse Studien, u. a. des International Transport Forum (ITF), haben bereits die Effekte einer hypothetischen Stadt ohne privat genutzte Pkw untersucht und ermittelt, dass die Anzahl der für ein gleiches Mobilitätsniveau erforderlichen Fahrzeuge um bis zu 90% reduziert werden kann.

Von der Ausgestaltung der angebotenen Mobilitätsmodelle hinge es aber ab, wie viele Fahrten und Fahrtkilometer eingespart werden können. Dabei zeigt sich, dass das Teilen der Fahrten unabdingbar ist, wenn Fahrleistungen eingespart werden sollen.

Die Studie Megafon für die Stadt Stuttgart hat z. B. ermittelt, dass mit einer 100% Ridepooling-Flotte mehr als 90% der Fahrzeuge und bis zu 36% der Fahrzeugkilometer eingespart werden könnten, wenn es gleichzeitig einen leistungsfähigen Schienenverkehr für die langen Strecken gibt. Mit einer 100% Carsharing-Flotte (d. h. alle in der Stadt verkehrenden Fahrzeuge werden geteilt, aber jeweils nur von einer Person genutzt, es gibt also keine Bündelung), könnten zwar ebenfalls 80% der Fahrzeuge eingespart werden, die Zahl der Fahrten und der Fahrzeugkilometer nähme jedoch um rund 20% zu, und sogar um 40% bei Fehlen der Bahn (MEGAFON, 2016, S. 24ff).

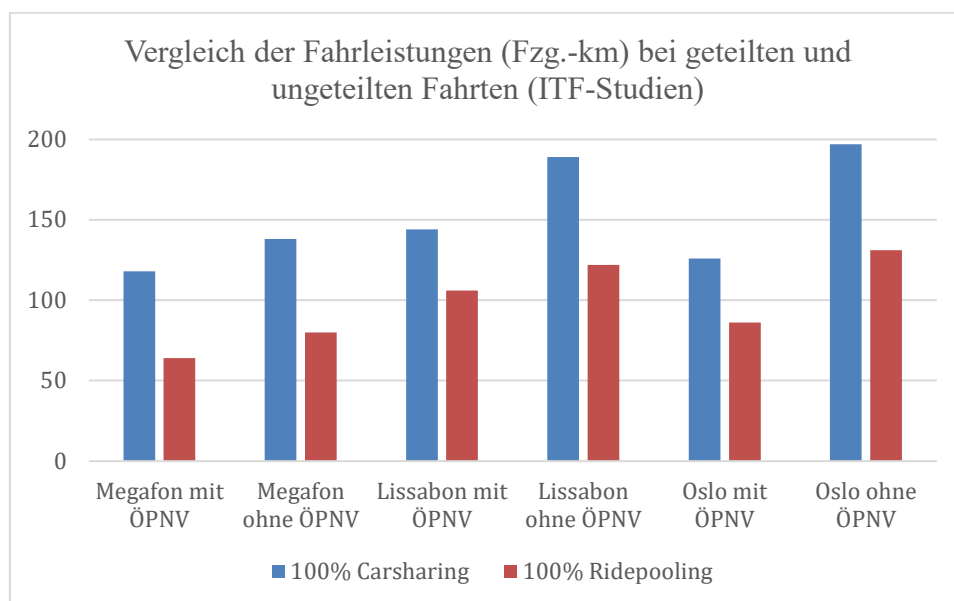


Abbildung 69: Vergleich der Fahrleistungen bei geteilten und ungeteilten Fahrten aus ITF-Studien (eigene Darstellung)

PAVE

Wie man in der Grafik sehen kann, kommen andere ITF-Studien (zu Lissabon und Oslo) zu abweichenden Ergebnissen, da Städte nunmal unterschiedliche Bedingungen bieten und auch die Annahmen leicht angepasst wurden. In jedem Fall schneidet jedoch das nicht geteilte Fahren schlechter ab, und zwar teilweise erheblich: Für Lissabon z. B. ergibt sich fast eine Verdoppelung der Fahrkilometer bei nicht geteilten Fahrten und bei Fehlen eines Hochleistungs-ÖPNV (ITF, 2015, S. 19).

Diese Berechnung geht konform mit einer Studie der Union of concerned Scientists (UCS), die davor warnt, dass Ridehailing Dienste die CO₂-Belastung durch den Verkehr sogar zu erhöhen drohen. Anhand der in den letzten Jahren durch Ridehailing Unternehmen wie Uber und Lyft ausgeführten Fahrten ermittelt die UCS, dass diese Dienste – obwohl 15% der Fahrten gebündelt erfolgt sind - um 69% höhere CO₂-Emissionen erzeugen als die durch sie ersetzten Fahrten. Dies ist vor allem auf die Leerkilometer zurückzuführen, die allein zu 50% mehr CO₂ führen. Hinzu kommt, dass Wege mit umweltfreundlicheren Verkehrsmitteln (ÖPNV, Fahrrad, Fuß) ersetzt werden. Durch Elektrifizierung der Fahrzeuge könnten die Emissionen jedoch um 52 Prozent sinken, wenn die Hälfte der Fahrten geteilt würde. (UCS, 2020, S. 6)

Im Gegensatz zu dieser Studie, sind die oben genannten ITF-Studien in gewisser Weise problematisch, da sie auf rein hypothetischen Annahmen einer reinen Carsharing- bzw. Carpooling-Flotte beruhen und somit den Modal Split als gesetzt annehmen. Im Rahmen unseres Projekts wurden dagegen realitätsnahe Simulationen für Berlin durchgeführt, die das Nachfrageverhalten exakt – d. h. unter Berücksichtigung der Kosten, der Wartezeiten etc. - modellieren, wobei alle Verkehrsträger inkl. Fuß einbezogen sind. Diese Simulationen ergaben, dass ohne zusätzliche Steuerungsinstrumente wie City-Maut oder Einfahrverbote für konventionelle Pkw, die gefahrenen Kilometer für gebündelte und nicht-gebündelte Fahrten annähernd gleich wären, wobei jedoch mit einer Poolinglösung ca. vier Mal so viele Personen befördert würden. Näheres zu diesen Simulationen finden Sie im Kapitel 4.5 des vorliegenden Berichts.

4.2.2.5 Gütertransport und Lieferdienste (Einführung)

Durch bessere Vernetzung und Automatisierung erhofft sich auch der gewerbliche Güterverkehr Effizienzsteigerungen und eine verkehrliche Entlastung.

Insbesondere im Bereich der städtischen Lieferverkehre und auf der vorletzten Meile sind die Erwartungen hoch. Angesichts eines schnell wachsenden Online Markts werden große Hoffnungen in die Vernetzung der städtischen Verkehrsinfrastruktur und in den Einsatz autonomer Lieferfahrzeuge auf der letzten Meile gesetzt.

Für komplett automatisierte Fahrzeuge der Stufen 4 und 5 sind aktuell Erprobungen auf Versuchsgeländen und Betriebsflächen und nur begrenzt im öffentlichen Raum möglich. Automobilhersteller und Zulieferer, aber auch Newcomer wie Enride treiben die technische Entwicklung größerer autonomer Fahrzeuge voran. Auch hier treten branchenfremde Akteure, z.B. aus der Elektronik- und Informationstechnologie, wie z. B. die Hersteller von Lidar- und Optical Phased Arrays (OPA) Systemen, in Erscheinung. Unter dem Label „RaaS“ (Robot as a Service) experimentieren derzeit die großen Logistikunternehmen mit dem Internet of Things, zu dem auch Lieferdienste mit kleinen Lieferrobotern für die Paket- oder Postzustellung gehören. Sie kommen in Pilotversuchen (Hermes, Deutsche Post, Posten Norge) zum Einsatz, sind aber weit entfernt von einer massentauglichen Lösung (siehe dazu Unterpunkt 5.4)

In insgesamt 23 qualitativen Interviews mit Akteuren aus der Logistikbranche, mit Wissenschaftlern und Vertretern von Verbänden und Politik haben wir nach den aktuellen Herausforderungen der

PAVE

Transportbranche und den Einstellungen zum Thema Automatisierung gefragt. Und es wurden die erwartete Wirkung autonomer Fahrzeuge auf die Logistikkette und deren Einfluss auf Geschäftsmodelle untersucht. Die zentrale Frage war: Für welche Herausforderungen können autonome Fahrzeuge eine Lösung bieten? Darüber hinaus ging es darum, erste Lösungsansätze im Güterverkehr durch autonome/automatisierte Fahrzeuge aufzuspüren. Räumlicher Bezugspunkt war die Belieferung der letzten Meile im urbanen Raum unter Berücksichtigung des Vor- und Nachlaufs.

In einer Fokusgruppe mit Vertretern aus Logistik, Verbänden, Autoindustrie und Politik wurde abschließend die Frage diskutiert, welche Anwendungsfälle und Geschäftsmodelle für automatisiertes Fahren am erfolgversprechendsten sind.

4.2.2.5.1 Herausforderungen in der Logistikbranche heute

Das Transportgewerbe ist durch ein steigendes Transportaufkommen, niedrige Gewinnmargen und einen drastischen Fahrermangel gekennzeichnet. Die Wachstumsraten im Güterverkehr auf der Straße liegen deutlich höher als im Personenverkehr in 2020. Allein schon daher ist der Innovationsdruck auf die Branche hoch.

Der durch die demografische Entwicklung kontinuierlich steigende Fahrermangel bei gleichzeitig wachsendem Transportaufkommen verlangt nach Lösungen. Aus diesem Grund sind Logistiker und KEP sehr offen für automatisiertes und autonomes Fahren.

„Motive für Automatisierung sind für uns: 1. Effizienz erhöhen, 2. stupide Tätigkeiten ersetzen, weil man dafür keine Mitarbeiter mehr findet, 3. Schutz der Gesundheit der Mitarbeiter“ (LG22)

Im Bereich der Kurier-, Express- und Paketdienste (KEP) sind die Herausforderungen besonders groß angesichts eines – durch Corona noch verstärkten – Anstiegs der Transportleistungen gepaart mit Kostendruck und Personalmangel. Das hohe Verkehrsaufkommen in der Stadt, der zunehmende Flächenbedarf für Ladezonen und Micro-Depots in Konkurrenz mit anderen innerstädtischen Verkehrsanforderungen, und die Suche nach Lösungen für effiziente Übergabe der Pakete an den Besteller und nach einer besseren Preisgestaltung sind weitere wesentliche Herausforderungen der KEP-Branche.

Treiber

In den Klein- und Mittelbetrieben im Transportgewerbe ist wenig digitalisiert und gleichzeitig kaum finanzieller Spielraum für Innovationen. In diesem Bereich gibt es daher bisher nur wenige Unternehmen, die die Zukunft im Blick haben und darauf vorbereitet sein wollen. Aber auch hier finden sich Aussagen wie die folgende:

„Wir wollen innovativ nach vorne gehen. Teilweise wird das auch von den Kunden gefordert, aber wir testen neue Technologien und Strategien von uns aus.“ (LG17)

Einer der großen Treiber für den Innovationsdruck im Transportgewerbe ist der Onlinehandel. Hier erzeugen die großen Online Handelsplattformen wie zum Beispiel Zalando und Amazon Bedürfnisse beim Endkunden, die einer Bündelung und Effizienzsteigerung bei den Transporten stark entgegenwirken. Vor allem Amazon als beinahe monopolistische Handelsplattform setzt die Logistik unter Druck, in Form von Lieferzeiten am nächsten (oder am gleichen) Tag zu einem geringen Preis und kostenloser Retoure. Das Ziel von Amazon ist eine absolute Kundenbindung, die niemanden zwischen die Plattform und den Kunden lassen will.

PAVE

"Amazon will die gesamte Logistik selbst machen, keiner soll zwischen dem Kunden und ihnen stehen. In München hat DHL bereits 40% Marktanteil an Amazon verloren." (LG16)

Für schnell drehende Waren bietet Amazon heute schon zwei Stunden Belieferung an. Das ist ein riesiger logistischer Aufwand, der eigentlich gar nicht nötig wäre. Die meisten Kunden wollen das gar nicht unbedingt, wie diverse Umfrage-Studien belegen. Ihnen wäre es lieber, einen zuverlässigen, möglichst flexiblen Übergabetermin in ihrem Wunschzeitfenster zu haben. Die Zahlungsbereitschaft der Kunden hält sich dabei allerdings in Grenzen.

So besagt eine Studie von Pwc, dass eine versandkostenfreie Lieferung für 59% der Online-Kunden ein sehr wichtiges Auswahlkriterium war, eine Zustellung innerhalb von 24 Stunden jedoch nur für 18% (Pwc, 2017, S. 9). In einer aktuellen Befragung des Instituts für Handelsforschung Köln, gaben in KW43 2020 sogar nur 2% der Befragten an, die online bestellten Artikel noch am gleichen Tag empfangen zu wollen, 13% am nächsten Tag. Insgesamt war die Schnelligkeit der Zustellung für weniger als 60% der Befragten wichtig, die Zuverlässigkeit und Pünktlichkeit der Lieferung sowie aktuelle Informationen über den Lieferstatus aber für über 80%. (IFH, 2020, S. 16+18)

Das Angebot an alternativen Lieferorten wie Paketboxen schneidet auch in dieser Studie (wie in vielen anderen) eher schlecht ab: Weniger als 30% der Befragten erachten es als wichtig. Doch die derzeitige Preisgestaltung im Onlinehandel deckt kaum die Kosten. Daher gibt es Vorschläge, ein Preisstufenmodell einzuführen, das bei Haustürlieferung einen Aufschlag und die Standardlieferung an eine Paketbox vorsieht. Aufgrund der prognostizierten Wachstumsraten im Online Handel wird das erforderlich werden. Bisher wagt aber kein Anbieter eine Umsetzung. Automatisierte Lieferungen an die Box könnten hier Entlastung schaffen.

"E-mobility und autonomes Fahren werden Prozesslandschaften verändern, aktuelle Netzbetreiber verlieren an Bedeutung, der Mittelstand auf der letzten Meile wird aufgewertet, oder aber Plattformen, die autonome Fahrzeuge einsetzen, haben das Sagen. KEPLer müssen neue Geschäftsmodelle suchen." (LG6)

4.2.2.5.2 Chancen und Hindernisse für autonome Anwendungen

Autonomes Fahren wurde in den Interviews allgemein positiv bewertet. Sollte autonomes Fahren technisch realisierbar, finanzierbar und gesetzlich erlaubt sein, würden sich für die Transportbranche erhebliche Effizienzgewinne erzielen lassen. Einig war man sich ebenfalls, dass autonome Fahrzeuge das jetzige Transportgeschehen nicht einfach ergänzen werden, sondern dass es grundsätzliche Änderungen geben wird. Bezogen auf die Einsatzmöglichkeiten, werden die ersten Realisierungsmöglichkeiten im Fernverkehr, das heißt auf der Autobahn gesehen, wo die Technologien für das Platooning schon gut erprobt sind. Für einen umfangreichen Einsatz autonomer Lieferfahrzeuge im komplexen Umfeld des Stadtverkehrs, mit zahlreichen Mischverkehren wird aktuell und auf lange Sicht kein Realisierungspotenzial gesehen. In den verkehrsarmen Nachtstunden jedoch können sich viele Gesprächspartner autonome Shuttle-Transporte in absehbarer Zeit auch im städtischen Umfeld vorstellen.

Fahrermangel

Der durch die demografische Entwicklung kontinuierlich steigende, dramatische Fahrermangel im Güterverkehr verlangt nach Lösungen. Daher sind Logistiker und KEP offen für automatisiertes und autonomes Fahren. Die Abschätzungen für die Kostenreduktion durch Einsparung des Fahrers liegen zwischen 70% und 50%. In einem Extremszenario des Projekts ATLas (Automatisiertes und vernetztes

PAVE

Fahren in der Logistik, 2018) der Technischen Universität Hamburg kommt die Mitautorin Carina Thaller zu der Abschätzung,

„... dass unter der Annahme, 80% aller Pakete im KEP würden durch 4.200 mobile Paketstationen geliefert, eine erhebliche Einsparung von Stopps möglich wäre. Durch Distribution an Paketstationen mittels automatisierter Lkw 7,5 bis 26t und der restlichen 20% mit 3,5t, würden annähernd 60% der Fahrten und bis zu 74% der Fahrzeuge eingespart werden. Im gleichen Szenario läge die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs bei 67%.“ (Carina Thaller, 2018, S. 149f)

Der Austausch und die Verteilung der Paketstationen könnten durch eine Art Wechselbrückensystem erfolgen, bei dem der jeweilige Aufbau, wie beim Containertransport, in Kundennähe ausgetauscht wird. Diese könnten auch ähnlich wie bei den Containern vermietet werden könnte.

„Die Paketstationen werden auf Lkw transportiert, denkbar wäre auch Paketstation mit jeweils einem fahrbaren Untersatz, der dann wegfährt (analog Wechselbrücken)“. (LG8)

Allerdings wurde in dieser Studie auch betont, dass autonomes Fahren niemals in allen Bereichen des Wirtschaftsverkehrs möglich sein wird. Es handelt sich um ein Extremszenario. Durch autonomes Fahren, könnten jedoch zahlreiche aktuelle Engpasssituation gelöst werden.

Veränderung der Arbeitswelt (Fahrer zum Operator)

Für den Fahrer im klassischen Lkw-Verkehr wird sich die Arbeitsaufgabe in der Zukunft grundlegend ändern. Bereits in den Automatisierungsstufen 3 und 4 übernimmt der Fahrer eine Kontrolltätigkeit. Schon heute stellt der Beruf des Fahrers immer höhere technische Anforderungen. Wenn in Zukunft die Stufe 5 des autonomen Fahrens erreicht sein wird, wird der Fahrer nicht mehr ein Fahrzeug, sondern – von einer Leitzentrale aus - zwischen 5 und 10 Fahrzeugen überwachen.

In der Zwischenzeit tun die Logistikunternehmen vieles, um eine Entlastung von Fahrern und Zustellern zu erreichen und den Beruf des Fahrers attraktiver zu machen. Neben beispielsweise der Anhebung der Löhne in der Logistik, Verbesserung der Arbeitszeiten und Finanzierungshilfen für den Lkw-Führerschein, werden diverse technische Mittel zur Fahrerunterstützung wie Navigations- und Routenoptimierungssysteme eingesetzt, um dem Fahrer den Arbeitsalltag zu erleichtern.

Zudem könnte die Automatisierung helfen, vom Menschen in den Logistik-Prozessen verursachte Fehler mehr und mehr zu reduzieren. Es könnten monotone Arbeiten ersetzt werden, während komplexere Arbeiten eher den Menschen vorbehalten bleiben, ähnlich, wie es bereits bei vielen industriellen Arbeitsplätzen der Fall ist.

Aber das autonome Fahren soll nicht nur Personalkosten senken, sondern auch neue Geschäftsfelder eröffnen. Durch Machine-Learning Algorithmen könnte man bspw. Vorhersagen von Nachfragespitzen erkennen und automatisierte Pendler Dienste könnten Liefer- oder Transportangebote ohne Fahrer im ländlichen Raum ermöglichen.

Kurier- und Expressdienste

Der Wegfall des Fahrerarbeitsplatzes im Fahrzeug hätte den weiteren Vorteil, dass sich der Laderaum und das Ladevolumen des einzelnen Fahrzeugs erweitern. Allerdings ist gerade im KEP-Betrieb das Fahren nicht die zentrale Aufgabe des Zustellers. Er kann durch seine Ortskenntnisse die

PAVE

Übergabeprozesse effizient gestalten und er ist ein wichtiges Element der Kundenbindung, „The face to the customer“.

„Den Fahrerarbeitsplatz einzusparen ist nicht das Ziel, der Zusteller soll die Schnittstelle zum Empfänger bleiben.“ (LG21)

Daher konzentriert sich die Aufmerksamkeit in der Branche momentan darauf, dem Zusteller durch Automatisierung „artfremde“ Tätigkeiten abzunehmen.

Heute belädt der Fahrer/Zusteller im Depot sein Fahrzeug selbst. Durch die Entkopplung von Beladen und Zustellen und die Automatisierung der Be- und Entladevorgänge könnte der Zusteller entlastet werden. Umso mehr, wenn das beladene Fahrzeug dann noch autonom in ein Zustellgebiet fahren könnte.

Unter dem Namen PackMyRide wurde von der Firma Dematic in Kooperation mit DPD ein Pilotprojekt zur automatischen Beladung von Fahrzeugen initiiert, um den Zusteller zu entlasten. Für die optimale Sortierung werden Volumen, Gewichts- und Barcodedaten verifiziert und in eine sequentielle Ordnung gebracht. Auch für den Weg der Ware vom automatisierten Lager zur Packstation an der Rampe bieten Dematic u. a. fahrerlose Transportsysteme (Gabelstapler) und Sortiersysteme.

Auch die Transportbehälter für die Ladung würden sich ändern, um weitere Effizienzgewinne zu realisieren. Der heutige Stand der Standardisierung von Ladungsträgern sowie die Codierung der Ware zur besseren Sendungsverfolgung sind unzureichend. Neben dem üblichen Barcode sind neue Codierungen entstanden und auch Palettengrößen jenseits der Euro-Palette haben sich etabliert. Auch im Sinne der Ressourceneinsparung und Wiederverwertbarkeit ist die Standardisierung von Ladungsträgern (Gefäßen, Paletten, möglichst wiederverwertbar) ein wichtiges Thema, das eine bessere Auslastung, die Beschleunigung und Automatisierung von Be- und Umladevorgängen ermöglicht und nachhaltiger macht.

Ein weiteres wichtiges Thema waren in vielen Gesprächen die Antriebssysteme für den Schwerlastverkehr. Besonders in diesem Segment sind umweltverträgliche Lösungen noch nicht zufriedenstellend. Die einseitige Ausrichtung auf Elektroantrieb wird vom Transportgewerbe kritisch gesehen und es wird bemängelt, dass über Alternativen zu wenig nachgedacht werde.

Zukünftige Eigentumsstrukturen

Der Erwerb eigener Fahrzeuge könnte sich für Dienstleister als wenig sinnvoll erweisen. In Zukunft wäre es denkbar, dass die autonom fahrenden Fahrzeuge oder Wechselbrücken nicht mehr erworben, sondern von anderen Akteuren (z.B. dem Hersteller, einer Vermietungsfirma, ...) gemietet werden, ähnlich wie bei Frachtcontainern heute, und in permanentem Rundlauf genutzt werden. Der Kunde würde dann nicht ein Fahrzeug mieten, sondern den Laderaum und die Zeit in einem autonom fahrenden Fahrzeug. Über ein System ähnlich der Mauterfassung, wären die autonomen Fahrzeuge nachverfolgbar und kalkulierbar, so dass auch die spezialisierten Trailer wie im Pharmatransport wieder an den spezialisierten Nutzer zurückgeführt werden können. Da schon heute viele Transportunternehmen nur noch kleine eigene Fahrzeugflotten betreiben, wäre ein solches Modell durchaus vertraut.

Hindernisse für den Einsatz autonomer Fahrzeuge im Gütertransport

Wiederkehrende Themen in der Diskussion um autonomes Fahren waren auch in den Interviews der Reifegrad der Technologie, fehlende gesetzliche Rahmenbedingungen, und die Wirtschaftlichkeit.

PAVE

1. Wirtschaftlichkeit:

Bereits laufende oder geplante Projekte sind auf absehbare Zeit bei weitem nicht wirtschaftlich darstellbar. Die Anschaffungs- und Unterhaltungskosten sind unkalkulierbar. Der Grund dafür ist, dass die Fahrzeuge nicht in Serie herstellbar und daher sehr teuer sind. Andererseits ist gerade für kleinere Unternehmen das Einsparpotential - anders als z. B. im Hamburger Hafen - eher gering, zumal die Prozesse heute noch das Eingreifen von Menschen erfordern.

2. Haftungsfragen:

Die Genehmigungsprozesse in den Behörden sind noch am Anfang, es gibt rechtlich noch keine etablierte Vorgehensweise und keine Struktur.

Grundsätzlich sind die Fragen der Haftung im Schadensfall bei Unfällen oder bei Verlust oder Beschädigung der Ware noch nicht geklärt. Die Versicherungen halten sich zurück, weil es keine entsprechende Rechtsprechung gibt.

Die Rechtsprechung für Gefahrguttransporte ist selbst für Elektro-Fahrzeuge noch nicht geklärt, umso mehr gäbe es hier Probleme mit automatisierten Fahrzeugen. Transportgut ist nicht gleich Transportgut. Sicherheits- und Hygienevorschriften können sehr stark variieren. Mit einem E-Fahrzeug könnten z.B. keine Spraydosen an die Drogerien oder Farben an die Baumärkte mehr geliefert werden.

Beim Platooning ist noch nicht geklärt, ob das Fahren im Platoon als Ruhezeit gelten kann.

3. Technischer Reifegrad:

Als ein wesentliches Hindernis hat sich die mangelhafte Digitalisierung erwiesen, die vor allem in kleinen und mittleren Unternehmen besteht. So werden im KEP vielfach die heutigen Systeme der Tourenplanung als noch nicht ausgereift betrachtet und die Speditionsbranche beklagt mangelnde Bereitschaft der (gewerblichen) Kunden, digitalisierte Systeme der Warenübergabe, wie zum Beispiel digitale Lieferscheine zu akzeptieren.

In vielen Fällen wird außerdem die Automatisierung von Prozessen innerhalb der Läger durch die zunehmende Kleinteiligkeit und die schiere Menge der Lieferungen erschwert.

Die wenig ausgeprägte Digitalisierung im Handel (elektronischer Lieferschein) und in der Logistik wurden ebenfalls als technische Hürden benannt, die bisher der kommerziellen Nutzung des autonomen Fahrens im Wege stehen, ebenso der Reifegrad der Sensorik und der Algorithmen und die in Deutschland noch fehlende flächendeckende Netzabdeckung, die eine Automatisierung und Digitalisierung der Prozesse ausbremse.

Auf die Frage, wer als erster ein autonom fahrendes Fahrzeug auf den Markt bringe, wurde folgendes gesagt:

„Wir wollen nicht in Fahrzeugentwicklung und Fahrzeugdesign investieren, sondern erwarten das von den Herstellern, ob die traditionellen oder neue Player, ist uns egal. Die Frage ist doch: Wann ist die Technologie massenkompatibel verfügbar?“(LG21)

Die Fahrzeughersteller selbst tun sich noch schwer bezogen auf die Anforderungen an „Purpose built vehicles“, insbesondere die passende Innenausstattung und Gestaltung der autonom fahrenden Pooling Fahrzeuge oder Fahrzeuge für einen Dual Use. Auch beim Check-in/Check-out und bei der

PAVE

Personenidentifikation sind noch Verbesserungen erforderlich. Einparkhilfen und Sicherheitsfunktionen beim Einparken an den Haltepunkten sind vorhanden, hier wird aber noch Ausbaupotential gesehen.

4.2.2.5.3 *Wünsche an die Städte und Kommunen*

Aktuell setzen die Städte Maßnahmenbündel ein (Fahrverbote, Euro6-Pflicht, Tempo 30 Zonen), um die Feinstaub- und Stickoxid-Grenzwerte einzuhalten. Der Wille zur Emissionsreduzierung und zur Verbesserung der Lebensqualität ist da, doch viele Maßnahmen wirken nur lokal und manche erzeugen unerwünschte „Rebound Effekte“.

Aus diesem Grund steht ganz oben auf der Wunschliste der Interviewpartner an die Städte der Wunsch nach gesamthaften Konzepten. Als erstes sollte man aufhören, Personen- und Güterverkehr getrennt zu denken. Man wünscht sich von den Städten eine umfassende Lösungsstrategie für alle Verkehrssysteme, eine Vision. Die Städte sollten mehr Regulierungen im Sinne dieser ganzheitlichen Strategie an sich ziehen und vor allem mehr Transparenz über ihre Ziele herstellen.

Der zweite Wunsch wäre der nach einer zeitgemäßen Straßen- und Stadtplanung, die den Lieferverkehr besser berücksichtigt und nicht immer nur als Behinderung sieht. Dazu gehören Logistikflächen für Mikrohub, mehr und besser gemanagte Lieferzonen, definierte Lieferspuren, die in die Stadt hinein und hinaus führen, und der Ausbau einer intelligenten Infrastruktur, die auch die erforderliche Technik und Informationen liefert. Nur so wären zukunftsfähige Strukturen erreichbar. In der Perspektive wären dies definierte und möglichst induktiv geführte Fahrspuren für autonome Lieferfahrzeuge und Busse, wie sie einer digitalen Stadt entsprechen (und aktuell z. B. vom israelischen Startup ElectReon in Tel Aviv, Gotland (Schweden) und in Karlsruhe getestet werden).

Darüber hinaus wünschen sich einige der gewerblichen Transportunternehmen, dass man sich mit ihnen an einen Tisch setzt und gleiche Bedingungen für alle Anbieter schafft. Neue Systeme, wie zum Beispiel das unterirdische Belieferungsröhrensystem Smart City Loop, für das in Hamburg eine Machbarkeitsstudie durchgeführt wird (2019), multimodale Plattformen und Logistik-Zentren, dürften nicht einer Spedition gehören, sondern sollten analog Sogaris in Frankreich im Auftrag der Stadt von einem unabhängigen Akteur geführt werden. Auch Mikrohub sollten nicht für einzelne Akteure geschaffen werden. Die Stadt müsste bestimmen, dass diese bereitgestellten Mikrohub und Logistikflächen von allen genutzt werden können und müssen. Das sollte dann eine intelligente und zeitgemäße Infrastruktur sein, die bereits vorhandene Technik konsequent anwendet und miteinander verknüpft. Denkbar wäre auch in neu zu errichtenden Wohngebieten von Anfang an eine solche intelligente Infrastruktur zu planen und zu realisieren. Obwohl zu berücksichtigen ist, dass es keine einheitliche Lösung für alle Städte geben kann, wäre es wünschenswert, dass eine Stadt bei diesen Projekten beispielhaft vorangeht.

Wiederholt wurde auch hier das Thema „Flächenkonkurrenz“ angesprochen. Die Städte müssten sich klar darüber sein, dass es nur eine Infrastruktur gibt, die für alle da ist. Daher wünscht man sich eine fairere Verteilung des öffentlichen Raums. Es fehlen umfassende und transparente Strategien in der Verkehrs- und Umweltpolitik und eine Gleichbehandlung im Umgang mit den Verkehrsteilnehmern und Bewohnern. Insgesamt wünscht man sich, dass die Stadt sich stärker einbringt und sieht einen stärkeren Regulierungsbedarf, wobei die Einrichtung von mehr Ladezonen als besonders wichtig angesehen wird. Eine deutliche Entlastung für den Wirtschaftsverkehr könnte bereits heute erreicht werden, wenn die bestehenden Regelungen konsequent durchgesetzt würden, der ruhende Verkehr besser kontrolliert würde.

PAVE

Auch konkrete Regulierungsvorschläge wurden gemacht, um Mehrfachanfahrten und Leerfahrten zu vermeiden. Idealerweise sollten die Kommunen mehr Depots und Logistikflächen zur Verfügung stellen, von denen der Handel, Hotels, die Gastronomie, aber auch die Privatkunden in einem bestimmten Liefergebiet von einem Anbieter beliefert werden könnten. Die Lizenzierung von Liefergebieten, und auch die konsolidierte Zustellung werden jedoch kontrovers bewertet.

Paris wurde hier als positives Beispiel genannt. Durch den Einsatz eines stadteigenen Logistikentwicklers (Sogaris) konnten hier schon viele Probleme entschärft und eine teilweise Bündelung der Lieferungen erreicht werden.

Einwände gegen solche städtischen Cloud-Lösungen (lizenzierte Liefergebiete) sind, dass die Konsolidierung keine Vorteile bringe, da die Lieferfahrzeuge bereits heute bei Abfahrt im Depot zu 100% ausgelastet sind, ein zusätzlicher Umladevorgang erforderlich wäre, unterschiedliche Datenverarbeitungssysteme und Bedenken, dass der Empfänger nicht rechtlich verpflichtet werden kann, sich auf einen Paketdienst als Lieferant festzulegen.

Andererseits wurde auch darauf verwiesen, dass viele Unternehmen mit dem System der Gebietsspeditionen ein solches Prinzip bereits anwenden (alle Lieferungen in einer Stadt macht Spedition A, in einer anderen Stadt Spedition B), ebenso Messen (pro Messe gibt es einen Spediteur). Das wird von allen akzeptiert. Allerdings würde im Fall der Städte die notwendige Ausschreibung der Lizenz auf ein wesentliches Problem treffen, nämlich das Fehlen von Daten zu Liefermengen über alle Spediteure.

In diese Richtung ging auch der sehr weitgehende Vorschlag eines der Fuhrunternehmer zur besseren Steuerung der Wirtschaftsverkehre und zur besseren Bündelung der Warenströme. Er schlug vor, dass die Stadt Berlin die drei großen Güterverteilzentren (Schönefeld, Wustermark, Freienbrink) übernimmt, die Transportleistung einkauft und organisiert. Es gäbe dann nicht mehr den Empfänger XY, sondern GVZ 1, 2 oder 3 und von dort könnte die Ware gebündelt in die ausgewählten Sektoren der Stadt geliefert werden. Die Positionierung der GVZ ist gut. Aber es bräuchte eine zentrale Steuerung, und diese wäre dann nicht mehr rein marktwirtschaftlich umsetzbar, sondern sollte von staatlicher Seite gesteuert werden, indem Kooperationen der KEP-Dienstleister und Spediteure durch Vorgaben der Städte erzwungen werden.

Die Einführung einer City-Maut, die eine preisliche Bevorzugung umweltfreundlichen Wirtschaftsverkehrs vorsieht, wurde durchaus positiv gesehen. Dadurch würde der Verkehr zwar teurer, aber es würde eine eindeutige Situation geschaffen, die sowohl den privaten Pkw-Verkehr minimieren als auch die Auslastung der Lkw und KEP-Fahrzeuge verbessern könnte. Eine Maut würde allerdings – wie die Berechnung von ATLAS ergeben hat - keine Reduzierung beim Güterverkehr (KEP-Verkehr) erbringen. Sinnvoll wäre es, in Wohngebieten Lieferzonen zu etablieren, für die konventionell angetriebene Fahrzeuge eine Einfahrtgebühr entrichten, in die (möglicherweise automatisierte) Elektrofahrzeuge aber gebührenfrei liefern könnten.

Besonders wichtig ist es, Ladezonen einzurichten. Hier gibt es eine Konkurrenz zu erforderlichen Logistikflächen und zum Ausbau der Ladeinfrastruktur für E-Fahrzeuge, die ebenfalls Flächen benötigt. Überhaupt sieht man in der Elektrifizierung der Fahrzeuge einen guten Ansatz, um die lokalen Emissionen zu begrenzen und den städtischen Lieferverkehr umweltfreundlicher zu machen. Allerdings müsste dementsprechend die Infrastruktur, wie zum Beispiel ein dichtes Netz von Ladestationen, bereitgestellt werden. Im Hinblick auf automatisiertes und autonomes Fahren sollte man Sonderspuren einrichten.

PAVE

Die Bereitstellung der Infrastruktur für all diese Aufgaben müsste vom Staat gefördert werden, vergleichbar mit dem Aufbau des Schienennetzes.

Einer der Interviewpartner brachte die Lage sehr gut auf den Punkt:

„Wenn die Städte nicht gestalten, dann werden sie gestaltet.“ (LG6)

Bisher fehlen die städtischen Flächen für Mikrodepots, während sich Paketabholstationen an Tankstellen oder neben dem Supermarkt immer mehr durchsetzen.

4.2.2.5.4 Use Cases

Auch wenn Automatisierung kein Allheilmittel für die genannten Herausforderungen sein kann, so gibt es doch weltweit bereits zahlreiche Projekte, mit denen versucht wird, die Vorteile der Technologie für die Logistik zu nutzen.

Im Bereich der Intralogistik sind diese Bemühungen am weitesten fortgeschritten. In großen Lägern und KEP-Verteilzentren sind Transportroboter, die auf vorgezeichneten Strecken fahren (zumeist durch im Boden installierte Transponder gesteuert), bereits allgegenwärtig.

Der nächste Schritt liegt nahe: Transporte zwischen den Lagergebäuden oder auf anderen abgeschlossenen Geländen (Hafen etc.) und zwischen Lagerstandorten auf definierten Strecken.

Lkw

Eines der bekanntesten aktuellen Beispiele für solche Anwendungen ist der Robo-Truck „T-Pod“ der schwedischen Firma Einride, der derzeit eine kleine Teststrecke öffentlicher Straße zwischen zwei Lagerhäusern von DB Schenker im schwedischen Jönköping bedient. Für die Firma Lidl soll mittelfristig dieser Versuch auf die Verbindung Jönköping – Göteborg (217 km) ausgeweitet werden. 2018 wurde außerdem eine T-Pod Variante für den Holztransport vorgestellt, die ab 2020 autonom Holz auf schwedischen Waldwegen transportieren soll.

Der leichte, elektrisch betriebene Lkw (7,5 t) hat weder Fahrerkabine noch Lenkrad. Er ist ein Gefäß, oder eine Box auf Rädern, der im Bedarfsfall aus der Ferne vom Menschen gesteuert wird. Die menschlichen "Operatoren" können hunderte Kilometer weit entfernt sitzen und den Lkw in schwierigen Situationen fernsteuern. Ein Operator soll dabei bis zu zehn Fahrzeuge zugleich überwachen.

Hersteller	Firmensitz	Produkte	Status	Kommerzielle Nutzung/ Anwender
Einride	<i>Stockholm</i>	<i>T-Pod, T-Log</i>	Straßenzulassung ¹⁾	DB Schenker
Konecranes	<i>Langenhagen (DE)</i>	<i>AGV für Containertransport</i>	Praxiseinsatz	HHLA ²⁾
Kamag	<i>Ulm</i>	<i>Wiesel</i>	Pilotanwendung	DB Schenker ³⁾
Götting KG	<i>Lehrte (DE)</i>	<i>Automatic Truckmaster</i>	Praxisanwendung	Elsdorfer ⁴⁾
Volvo	<i>Ismaning</i>	<i>Vera</i>	Pilotanwendung	DFDS ⁵⁾
MAN	<i>München</i>		Pilotanwendung	HHLA
Daimler AG	<i>Stuttgart</i>	<i>Vision Urbanetic</i>	Konzeptfahrzeug	

¹⁾ für T-Pod auf definierter Strecke

²⁾ Hamburger Hafen und Logistik AG, nur auf dem Betriebsgelände

³⁾ Erprobung auf Schenker-Betriebshof in Nürnberg seit 07/2018 (es handelt sich um einen Standard-Lkw, der mit Sensoren nachgerüstet wurde)

⁴⁾ Einsatz auf dem Betriebshof der Molkerei Elsdorfer seit 2012

⁵⁾ Weitere Anwendungen autonomer Volvo- Lkw u. a. bei der Müllentsorgung (Renova), im Bergbau, im Platooning

Tabelle 7: Beispiele für Automatisierung im Güterverkehr / Lkw
(eigene Darstellung)

Aus Sicht unserer Interviewpartner beschreibt dieses Modell die Zukunft der Arbeit in der Fahrerbranche. Die Anforderungen an den Fahrer werden komplexer (5-10 Autos) und technischer, dafür muss der Fahrer nicht mehr selbst vor Ort sein.

Weitere Fahrzeuge für ähnliche Anwendungen, aber auch für zukünftige automatisierte Schwerlasttransporte auf Autobahnen, sind in Tabelle 7 aufgelistet (kein Anspruch auf Vollständigkeit).

Kleinroboter

Für den Einsatz im städtischen Bereich sind diese Konzepte jedoch weniger gut geeignet. Hier liegt der Schwerpunkt auf Fahrzeugen für den Transport und die Verteilung von Postsendungen oder Lebensmittellieferungen an Kleinabnehmer.

In den USA und China, sowie in einigen europäischen Ländern befinden sich solche Fahrzeuge bereits im Praxiseinsatz, und im Rahmen der Covid-Pandemie wächst die Nachfrage nach kleinen Bots für Lieferungen von Lebensmitteln und Medizinprodukten und Versprühen von Desinfektionsmitteln.

Am weitesten verbreitet sind die Kleinroboter, und hier insbesondere Starship und Kiwibot (Kiwibot, 2020).

Das ursprünglich estländische Unternehmen Starship Technology (heute mit Sitz in San Francisco) gilt dabei vielen als Synonym für diese Art von autonomen Fahrzeugen. Mit einer Länge von 68,6 cm und einer Höhe und Breite von jeweils 55,9 cm kann der Starship auf dem Bürgersteig oder in Fußgängerzonen mit mäßigem Tempo fahren. Ob das in allen Städten – insbesondere in belebten Vierteln - sinnvoll ist und genehmigt wird, steht dabei auf einem anderen Blatt.

Kiwibot ist 2017 mit Essenlieferungen auf dem Campus der University of California in Berkeley gestartet, inzwischen sind sie auch in öffentlichem Gelände in Berkeley und San Jose unterwegs. Der

PAVE

Kundenkreis ist dort durch eine Partnerschaft mit Shopify und Ordermark angewachsen, da jetzt jedes Unternehmen bedient werden kann, das diese online-Handels-Plattformen nutzt.

Die Kiwibots sind halbautonom. Das bedeutet, dass die Fahrzeuge Hindernisse erkennen und ihnen ausweichen, die Planung der Routen wird jedoch aus der Ferne durch menschliche Operatoren vorgenommen, die auch im Bedarfsfall eingreifen können. Außer den kleinen Robotern, die immerhin 12 Pizzen transportieren können, kommen für längere Strecken dreirädrige Fahrräder zum Einsatz, die ebenfalls zu autonomem Fahren befähigt sind. Nach Angaben des Unternehmens werden die Lieferkosten für die letzte Meile um 40% reduziert, Ziel ist ein Preis von unter einem Dollar.

Hersteller	Firmensitz	Produkte	Status	Kommerzielle Nutzung/ Anwender
Starship Technologies	SF (CA) Tallinn (EST)	Starship	Praxiseinsatz seit 2016	u. a. Coop, Schweizer Post
Kiwi Campus Inc.	Berkeley (CA)	Kiwibot	Praxiseinsatz seit 2017	Kiwicampus
TeleRetail	Sierra (CH)	Aitonomi	Pilotanwendung seit 06/2019	u. a. Albert Heijin's
DEKA Development & Research Corp	Memphis (Tennessee)	Same Day Bot ¹⁾	Pilotanwendung seit 2019	u. a. FedEx
Amazon	Seattle (WA)	Scout	Pilotanwendung seit 02/2019	amazon
Eliport Robotics Marble Robot ³⁾	Barcelona (ES)	Eliport ²⁾ Marble	Konzeptfahrzeug Pilotanwendung seit 2017	yelp, eat 24
Postmates	SF (CA)	Postmates	Pilot in LA+ SF seit 12/2019	postmate
Robby Technologies	SF (CA)	Serve	Praxiseinsatz ⁴⁾ seit 01/2019	Hello Goodness
Refraction	Ann Arbor (Michigan)	Snackbot REV-1 ⁵⁾	Pilotanwendung seit Mitte 2019	Refraction

¹⁾ Kann Treppen steigen

²⁾ Kann mit einer vor dem Haus stehenden Paketbox gekoppelt werden und dort Pakete deponieren, das Unternehmen bittet seit 2018 um Finanzierung

³⁾ Unternehmen wurde 06/2020 von Caterpillar aufgekauft

⁴⁾ Auf dem Campus der University of the Pacific in Stockton (CA)

⁵⁾ Fährt mit einer Höchstgeschwindigkeit von 15 mph (schneller als Starship mit 10 mph) auf dem Campus der Universität Michigan.

Tabelle 8: Beispiele für Automatisierung im Güterverkehr / Kleinroboter
(eigene Darstellung)

Transporter

Eine weitere Fahrzeugkategorie sind die in der folgenden Tabelle aufgelisteten Konzepte für die Verteilung von Paket- oder Lebensmittelsendungen.

Darunter finden sich Fahrzeuge in Größe eines Midsize-Van (Boxbot und UDELV), die auch noch mit einem Fahrerhaus ausgestattet sind, so dass der Einsatz eines Sicherheitsfahrers möglich ist.

PAVE

Die Maße der anderen Fahrzeuge, die auf die Fahrerkabine verzichten, variieren zwischen 1,50 m Höhe und etwa 1 m Länge (Postbot) und 1,86 m Höhe und 2,74 m Länge R2 von Nuro.

Während die in Deutschland für die Paketverteilung getesteten Fahrzeuge Postbot und Paxi wieder von den Straßen verschwunden sind, setzt man gerade in Corona-Zeiten in den USA und China erfolgreich auf die Vorteile der autonomen Zustellung im Lebensmittelsektor. So hat Nuro im Februar 2020 vom US-Verkehrsministerium eine zwei Jahre gültige Ausnahmegenehmigung für den Einsatz seines fahrer- und fahrerkabinenloses Lieferfahrzeugs im öffentlichen Straßenraum erhalten. In Mountain View, Phoenix und Houston wurde daraufhin das Fahrzeug während der COVID-Pandemie zur Auslieferung von Medikamenten, Lebensmitteln, zubereiteten Speisen und Waren aller Art genutzt, wobei es immerhin mit einer Geschwindigkeit von bis zu 40 km/h auf öffentlichen Straßen unterwegs ist (Nuro, 2020).

In den Fahrzeugen des kalifornischen Start-up UDELV, das bereits seit 2018 in Kooperation mit großen Handelsketten wie Draeger's oder H-E-B erfolgreiche Tests mit autonomen Lieferfahrzeugen durchführt, befindet sich gemäß den kalifornischen Gesetzen noch eine Begleitperson, die jedoch nach Angaben des Unternehmens bisher nicht eingreifen musste. Der Frachtraum des Fahrzeugs besteht aus 18 den jeweiligen Kunden zugeordneten Fächern, die sich per Smartphone-App öffnen lassen. Die Zuladung beträgt insgesamt etwa 300 Kilogramm, die elektrische Reichweite liegt bei knapp 100 km. Die Sensortechnologie des Fahrzeugs wird ergänzt durch eine Remote-Funktion, mit der sich das Fahrzeug in bestimmten Situationen per Remote Control steuern lässt (Udelv, 2020).

In China macht vor allem Neolix mit seinem SLV11 von sich reden, das ebenfalls für Essen- oder Medikamentenlieferungen, als rollende Paketbox oder Mini-Markt oder auch für Desinfektionsfahrten auch in Quarantänegebieten zum Einsatz kommt. So wurden in Wuhan schon Anfang 2020 18 Fahrzeuge zur Belieferung von Krankenhäusern eingesetzt. Aber auch für Essenlieferungen bieten sich die Fahrzeuge an und werden z. B. von KFC in Shanghai für Lieferungen ohne Kontaktrisiko genutzt.

Hersteller	Firmensitz	Produkte	Status	Kommerzielle Nutzung/ Anwender
Buddy Mobility	Oslo	Buddy, mobile Paketstation	Straßenzulassung ¹⁾ Ende 2018	KEP/Posten Norwegen
Effidence	Bonn	Zustellroboter Postbot	Pilotanwendung (eingestellt)	KEP/DHL ¹⁾
Corbin	San Francisco	Robomart	Pilotanwendung seit Frühjahr 2019	Food/Stop&Shop ²⁾
Boxbot	Oakland (CA)	Boxbot	Praxisanwendung geplant	KEP/OnTrac ³⁾
Cleveron	Viljandi (EST)	Cleveron robot Courier ⁴⁾	Pilotanwendung ab 2020 geplant	KEP/ DPD
Neolix	Changzhou (CN)	SLV11	Serienfertigung	JD.com, Huawei
Continental& Anybotics	Hannover& Zürich	CUbE Shuttle& Laufender Roboter	Konzeptfahrzeug	01/19 auf CES in Las Vegas ⁵⁾
Nuro	Houston (TX)	R2	Straßenzulassung USA 2020	Food/Walmart
UDELV	Burlington (CA)	Newton	Praxisanwendungen seit 02/2018 ⁷⁾	Food/u. a. Walmart
Hochschule Heilbronn& Renz und Mayser	Heilbronn	Paxi	Pilotprojekt BUGA 2019, Paketzustellung	KEP/Reallabor BUGA:log
Droid Drive GmbH	Aachen	Duck Train ⁸⁾	Konzeptfahrzeug 2020 vorgestellt	

¹⁾ Test 2017 in Bad Hersfeld, 2018 in Japan

²⁾ US-Lebensmitteleinzelhändler, das Fahrzeug dient als fahrender Laden

³⁾ US-KEP-Dienstleister, das Fahrzeug soll Bestandteil eines umfassenden Konzepts mit automatisierten Hubs in Liefernähe sein

⁴⁾ Das Fahrzeug ist mit einem Roboterarm ausgestattet, mit dessen Hilfe die Lieferungen in speziellen Cleveron-Paketboxen am Haus automatisiert deponiert werden

⁵⁾ zweistufiges Modell für Last-mile delivery: Ein autonom fahrender Van lässt in der Stadt einen Trupp von vierbeinigen Lieferrobotern frei, die AI-gesteuert die Pakete zum Empfänger bringen

⁶⁾ das temperaturgeführte Fahrzeug hat 02/2020 als erstes seiner Art eine Ausnahmegenehmigung für autonome Fahrzeuge von der National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) des US-Verkehrsministeriums (DOT) erhalten²⁷⁾

⁷⁾ In Kalifornien mit Sicherheitsfahrer, das Fahrzeug kann ferngesteuert werden und hat 18 abgetrennte Lieferabteile, dadurch bietet es sich für Lieferungen in Corona-Quarantänezonen besonders an

⁸⁾ Bis zu fünf Einheiten können im Platoon fahren (und folgen dabei einem Fahrrad), ein „Duck train“ kann 1,5t tragen, Anwendungen: Paketboxen, Lebensmittel, Güter

Tabelle 9: Beispiele für Automatisierung im Güterverkehr / Lieferfahrzeuge und Paketboxen (eigene Darstellung)

Bereits im Juni 2019 hatte Neolix den Start der Massenproduktion der nur 1m breiten aber mit einem Laderaum von 2,4 m³ ausgestatteten Fahrzeuge in seiner Fabrik in Changzhou angekündigt. Diese sollte nach damaligen Firmenangaben in der Lage sein 30.000 Fahrzeuge im Jahr herzustellen, inzwischen ist aufgrund von Kapazitäts-, Fertigungs- und Lieferengpässen von 1.000 Stück im Jahr die Rede.

PAVE

Außer in China sind die Fahrzeuge z. B. in den Vereinigten Arabischen Emiraten im Einsatz. Auch in Deutschland hat der TÜV Rheinland im November 2020 die Fahrzeuge für eine Ausnahmegenehmigung freigegeben, so dass das Startup Spring sie in Berlin einsetzen kann (Neolix, 2020).

Im Bereich der Paketlieferungen ist das Beispiel Cleveron der Erwähnung wert. Die estländische

Firma Cleveron produziert ein breites Spektrum an Locker-Boxen, die z. B. an Bushaltestellen, vor Supermärkten und in Apotheken für Click- and-collect-Lösungen aufgestellt werden.

Paketkästen zum Aufstellen vor Privathäusern, die in Estland bereits in ausgewählten Gebieten zusammen mit den Supermarktketten e-Coop und e-Selver und den Paketdiensten DPD und Omniva getestet werden, sollen nun mit einem selbst entwickelten autonomen Fahrzeug bestückt werden, das in der Lage ist, die Pakete oder Lebensmittellieferungen mittels eines Roboterarms autonom in diesen Boxen zu deponieren. Der Empfänger muss also nicht zu Hause sein, sondern erhält per App einfach eine Nachricht, dass seine Lieferung in der Box ist. Das Fahrzeug gewann 2019 in Amsterdam den Parcel and Postal Technology International Awards als Last Mile Delivery Innovation of the Year. (cleveron.com). Es gibt jedoch keine Meldung über den Start der für 2020 geplanten Pilotanwendung.

Dual Use

Aufgrund der schwankenden Nachfrage nach Personen- und Gütertransportleistungen bietet es sich oft auch an, automatisierte Fahrzeuge rund um die Uhr alternierend für diese beiden Transportarten einzusetzen.

Dafür gibt es im Wesentlichen zwei Konzepte:

1. ein Personentransportfahrzeug kann (ggf. mit klappbaren Sitzen ausgestattet) in Zeiten, in denen es nicht für den Personentransport benötigt wird, Pakete oder andere Warenlieferungen in abgeschlossenen Boxen aufnehmen. Dieses Konzept wird z. B. beim Projekt TaBuLa-LOG in Lauenburg mit einem People Mover der Firma Navya praktiziert.

Ein ähnliches Projekt wurde 2017/18 in Mechelen (Belgien) durch das Vlaams Instituut voor de Logistiek betreut (Projekt ALEES). Eine wichtige Vorgabe dabei war, dass mehrere Dienstleister dasselbe Fahrzeug nutzen sollten, d. h. dass die beteiligten Unternehmen (im Testlauf fünf) ihre Warenlieferungen je nach Absender zukünftig nicht mehr über die einzelnen Paketzusteller wie etwa Hermes, GLS oder DHL erhalten, sondern über ein automatisiertes elektrisches Fahrzeug, das die Pakete aller Logistikdienstleister in einer Tour zustellt. Das Institut wird die aus dem Testlauf gewonnenen Erfahrungen bei seinen weiteren Projekten im Bereich konsolidierte City-Logistik anwenden (VIL, 2017).

Ein etwas anderes Prinzip verfolgt das Konzept Next Future Transportation, eigentlich ein Personentransport-Konzeptfahrzeug, von dem auf dem Dubai World Government Summit 2018 bereits zwei Kabinen (pods) in Originalgröße vorgestellt wurden. Das Besondere an dem Konzept ist, dass auf stark frequentierten Strecken mehrere Kabinen gekoppelt – und später wieder entkoppelt - werden können. Die Fahrgäste können sich zwischen den Kabinen bewegen, um gegebenenfalls mit einer anderen als ihrer Startkabine an das gewünschte Ziel zu kommen. Es ist vorgesehen, auch eine Gütervariante zu entwickeln, in der in gleicher Weise Pakete hin und herbewegt werden können, um eine optimale Routenplanung der einzelnen Kabinen zu gewährleisten (NFT, 2020).

PAVE

2. Das Fahrzeug wird modular gestaltet. Dieses Konzept wird u. a. von DLR mit seinem U-Shift umgesetzt. Eine elektrisch betriebene Antriebseinheit mit integriertem Hubsystem kann hier mit unterschiedlichen Kapseln kombiniert werden, die schnell austauschbar sind. Als Demonstrationsobjekt wurde im Herbst 2020 eine Kapsel für den ÖPNV (Rufbus oder Linienergänzung) mit sieben Sitzplätzen und Rollstuhlfahrerplatz sowie eine Güterkapsel für 4 Europaletten (bzw. für Gitterboxen o.ä.) vorgestellt. Möglich sind aber auch noch weitere Kapselmöglichkeiten, z. B. eine Müll-, Zustell- oder Postboxkapsel. Die Antriebseinheit kann so theoretisch ununterbrochen im Einsatz sein, während die Kapseln an bestimmten Einsatzorten stehen können. Es ist vorgesehen, je Antriebseinheit bis zu 20 Kapseln zu bewegen (U-Shift, 2020).

Ähnliche Konzepte gibt es von Rinspeed (Esoro) und e.Go Moove und auch Daimler hat bereits 2018 sein Vision Urbanetic vorgestellt.

Hersteller	Firmensitz	Produkte	Status	Kommerzielle Nutzung/ Anwender
Next Future Transportation	San José (CA)	NFT	Konzeptfahrzeug	Dubai ¹⁾
Esoro (Idee Rinspeed)	Zumikon (CH)	Snap, Micro-Snap	Konzeptfahrzeug	
e.Go Moove	Aachen	e.Go Cargo Mover e.Go People Mover	Konzeptfahrzeug	
DLR		U-Shift	Konzeptfahrzeug	
Daimler AG	Stuttgart	Vision Urbanetic	Konzeptfahrzeug	
Toyota	Toyota(JP)	e-Palette ²⁾	Konzeptfahrzeug	
Navya	Villeurbanne (FR)	Minibus „Autonom Shuttle“	Pilotanwendung ab Ende 2020 ³⁾	Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein u.v.a.
EasyMile	Toulouse (FR)	Minibus ALEES	Pilotprojekt (abgeschlossen)	Vlaams voor de Logistiek

¹⁾ Praxistest auf dem Dubai World Government Summit 2018

²⁾ Die Konzeptstudie ist sehr flexibel einsetzbar und lässt sich für verschiedenste Einsatzbereiche anpassen. Dank der offenen Software-Plattform kann jedes gewünschte autonome Fahrsystem und Fahrzeugmanagement konfiguriert werden. Im Vorfeld der Olympischen Spiele hatte Toyota z.B. eine fahrende Fahrradwerkstatt im Angebot.

³⁾ Einsatz in Lauenburg/Elbe, seit 10/2019 als reiner Personenshuttle

Tabelle 10: Beispiele für Automatisierung im Güterverkehr / Dual Use-Fahrzeuge (eigene Darstellung)

4.2.2.5.5 *Autonomes Fahren als Beitrag zu effizienterer Warenlogistik* (Fokusgruppe)

Einige der hier aufgelisteten Use Cases zogen wir auch für die Diskussion in unserer Fokusgruppe heran, in der wir im Frühjahr 2020 mit sieben Vertretern von Logistikunternehmen und -verbänden, der Autoindustrie, der Politik und der Urbanistik folgende Fragen diskutierten:

- Kann das automatisierte Fahren in Waren- und Paketlogistik für mehr Effizienz auf der letzten Meile sorgen?

PAVE

- Welche Geschäftsmodelle sind dabei am erfolgversprechendsten?
- Welche infrastrukturellen und (kommunal-)politischen Voraussetzungen müssten dafür geschaffen werden?

Konkret ging es darum, die im Folgenden genannten ein- und zweistufige Distributionssysteme anhand dieser Kriterien zu bewerten:

- Erwartete Wirtschaftlichkeit
- Technische und logistische Machbarkeit
- Potentiale für den Kunden
- Potentiale für den Unternehmer
- Geringe Komplexität der notwendigen Rahmenbedingungen, politisch/ Infrastruktur
- Wirkung bzw. Durchsetzungspotential, auch Struktur des Sendungsaufkommens

Einstufige Distributionssysteme sind heute im Bereich Handel üblich. Der Einsatz von AVF-Fahrzeugen scheint dann sinnvoll, wenn die Warenübergabe ohne Fahrer stattfinden kann: Im Depot und bei Empfängern mit ausreichend Personal oder – ideal – automatisiert. Im Einzelhandel mit wenig Personal (ein oder zwei Verkäufern, z.B. Backwaren) kann dabei ohne für Automatisierung geeignete Infrastruktur (Anlieferungsschleusen) auf einen Fahrer/Auslieferer nicht verzichtet werden.

Als Beispiel wurde hier das Modell Shuttle zwischen Logistikhubs (Einride) diskutiert.

Zweistufige Distributionssysteme sind heute dann üblich, wenn der Empfänger nur eine oder eine geringe Zahl Sendungen erhält, also im B2C aber auch B2B Bereich (z. B. bei kleinen Boutiquen). Dazu sind Minihubs (Satelliten im urbanen Raum) erforderlich, die von Depots oder Niederlassungen am Stadtrand versorgt werden.

Hier wurden folgende Modelle vorgestellt:

- Zustellung durch Lieferroboter von Minihub aus (Starship, Kiwibot u. ä.)
- Zustellung durch Lieferroboter von mobilem Minihub (Vans&Robots von Mercedes-Benz)
- Autonome Paketbox (Boxbot, BugaLog)
- autonomer Pakettransporter mit automatisierter Zustellung (Cleveron)
- konsolidierte Zustellung im Auftrag von Dienstleistern (ALEES)
- autonom fahrender Lebensmittelladen (Robomart)

Zusätzlich wurden Dual Use-Modelle mit Wechselaufbau (Konzept Vision Urbanetic von Daimler) oder integrierbarer Paketbox (Bosch) und das MultiUse-Modell e-Palette von Toyota diskutiert.

Im Laufe der Diskussion wurde von mehreren Teilnehmern außerdem die Baustellen- bzw. Abfalllogistik (inkl. Straßenreinigung) bzw. Massentransporte als erfolgversprechender weiterer Anwendungsfall genannt und entsprechend bewertet.

Die Experten bewerteten zunächst, welche der heutigen Pain Points der Logistikbranche (Kostendruck, Fahrermangel, hohes Verkehrsaufkommen, fehlende Logistikflächen, Preisgestaltung) durch automatisiertes Fahren adressiert werden könnten, und kamen zu folgendem Ergebnis (Anmerkung: die

PAVE

Farben der Punkte sind folgenden Teilnehmerkategorien zugeordnet: grün – Logistikpraktiker und Verbände, blau – Politik und Urbanistik, rot – Autoindustrie).

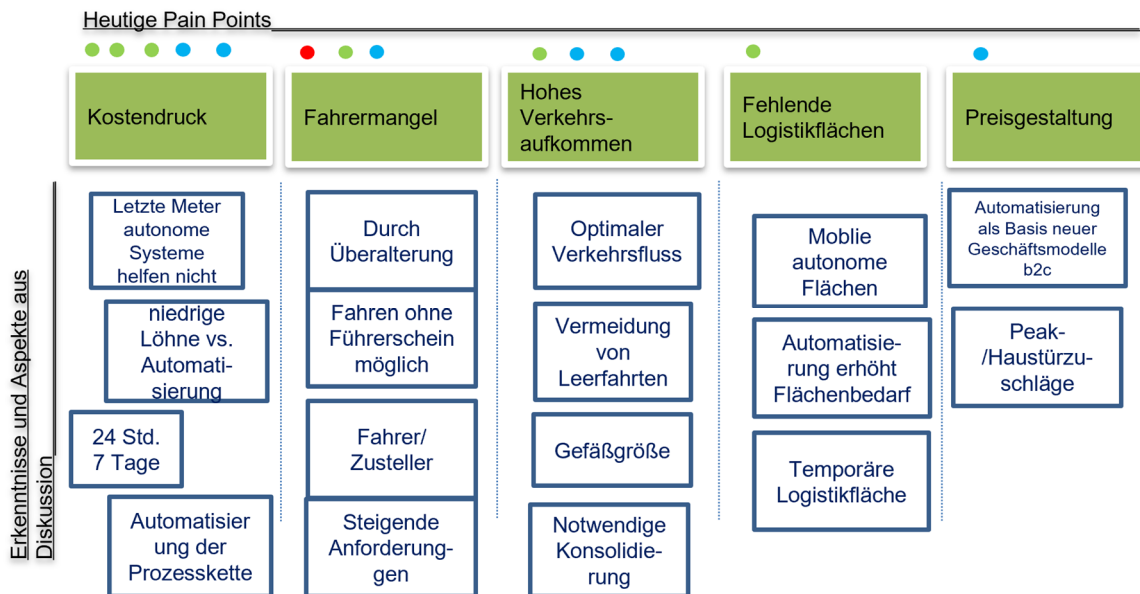


Abbildung 70: Heutige Pain Points (Fokusgruppen Workshop „Zukünftige Geschäftsmodelle“) (eigene Darstellung)

Wie man sieht, hat zwar der Pain Point „**Kostendruck**“ die meisten Bewertungspunkte erhalten, doch wurde diese positive Einschätzung in der Diskussion relativiert. Der größte Vorteil wurde in der Automatisierung der Prozesskette und der 24/7-Einsatzbarkeit gesehen. Die Einsparung von Personalkosten dagegen wird insbesondere im KEP aufgrund der aktuellen Niedriglohn-Bedingungen als zu gering eingeschätzt.

Allerdings kann die Automatisierung helfen, das Personalproblem („**Fahrermangel**“) zu entschärfen, indem sie dem Zusteller mehr Zeit für seine eigentliche Aufgabe verschafft. Als positiv wurde auch die Möglichkeit bewertet, Zusteller ohne Führerschein einstellen zu können.

Auch zum Thema „**Hohes Verkehrsaufkommen**“ waren die Einschätzungen kontrovers. Zwar könnte durch automatisiertes Fahren ein optimaler Verkehrsfluss erreicht werden, aber nur unter der Bedingung, dass alle Fahrzeuge autonom unterwegs sind. Wichtig wäre es darauf zu achten, dass die eingesetzten Gefäße nicht zu klein sind und keine unnötigen Leerfahrten anfallen. Eine Konsolidierung der Lieferungen wird als Voraussetzung für effektiven Einsatz gesehen.

Jeweils nur ein Teilnehmer sah für die Punkte „**Fehlende Logistikflächen**“ und „**Preisgestaltung**“ Lösungsansätze.

Zwar könnten autonome Fahrzeuge temporäre mobile Logistikflächen bereitstellen, die zeitweilig nicht genutzte Räume (z. B. Parkhäuser) nutzen, doch geht man insgesamt davon aus, dass die Automatisierung eher den Flächenbedarf erhöht (durch zusätzliche Mikrohub).

Um einen positiven Effekt auf die Preisgestaltung zu erreichen, müsste die Automatisierung mit einer „Kundenerziehung B2C“ einhergehen, um neue Kostenstrukturen durchsetzen zu können.

Die Gesamtbewertung der Use Cases durch die Experten ergab schließlich folgendes Bild (Punktfarben analog Pain Points-Bewertung):

PAVE

	Use Cases	Erwartete Wirtschaftlichkeit	Technische Machbarkeit	Potentiale für Kunden	Potentiale für Unternehmer	Geringe Komplexität Rahmenbedingungen	Wirkung bzw. Durchsetzungspotential
1	Shuttle zwischen Logistikhubs						
2	Zustellung durch Lieferroboter						
3	Zustellung mit Lieferroboter von Minihub aus						
4	Autonome Paketbox						
5	Autonomer Pakettransporter mit autom. Zustellung						
6	Konsolidierte Zustellung im Auftrag von Dienstleistern						
7	Autonom fahrender Lebensmittelladen						
8	Dual Use mit Wechselaufbau						
9	Dual Use mit Paketbox						
10	Multi Use (Toyota)						
11	Baustellenlogistik Massentransporte Abfalllogistik						

Tabelle 11: Bewertungsmatrix Fokusgruppen Workshop „Zukünftige Geschäftsmodelle“
(eigene Darstellung)

Diskutiert wurde (durchaus kontrovers) welchen Nutzen das automatisierte Fahren für die Stadt, für die Kunden, für die Unternehmen (im Sinne neuer Geschäftsmodelle), für Universitätscampus und neue Stadtgebiete sowie im Baustellenverkehr bringen kann.

Einigen konnte man sich darauf, dass autonomes Fahren nur unter bestimmten Rahmenbedingungen Vorteile **für die Stadt** bringt, nämlich wenn der Einsatz in Randzeiten erfolgt und durch einen hohen Anteil automatisierter Fahrzeuge eine Optimierung der Verkehrsflüsse erreicht wird. Dann könnte das autonome Fahren für ein attraktiveres Stadtbild sorgen und Chancen für neue Verkehrssysteme eröffnen. Mischverkehre und hohe Komplexität erschweren jedoch den Einsatz im innerstädtischen Bereich. Die entscheidende Frage ist, inwieweit die Städte bereit sind, die notwendigen Regulationen zu treffen.

Um den Nutzen **für den Kunden** bestimmen zu können, müsste erst klar sein, wer der Kunde sein wird (B2C, B2B) und welche Anforderungen er an den AV hat. Aktuell sind keine automatisierten Liefermodelle bekannt, die für die Mehrzahl der privaten Kunden akzeptabel sind. Die derzeitigen praktizierten Modelle der Homedelivery behindern Effizienzsteigerungen. Es wird deshalb erforderlich sein, den Kunden in gewissem Rahmen zu „erziehen“ (z. B. Haustürlieferungen unattraktiv zu machen) und bedarfsgerechte Anforderungsanalysen für einzelne Kundengruppen durchzuführen.

Für die Unternehmen sprechen Einfahrverbote und Personalmangel für Automatisierung, wenn sich neue Preisstrukturen etablieren und die Städte Maßnahmen zur CO₂- Reduktion ergreifen. Da die Investitionskosten für AV-Technologie sinken und heute bereits umfangreiche Erfahrungen bei der Automatisierung auf Betriebsgeländen vorliegen, ist damit zu rechnen, dass eine Kosteneffizienz bald erreicht werden kann, zumal wenn die Lohnkosten für Fahrer weiter steigen und die Preisstruktur im KEP sich zuungunsten der Haustürzustellung verändert. Von Seiten der Logistiker wurde jedoch eingeschätzt, dass Paketstationen und – shops vielversprechender sind als autonomes Fahren, und dass Automatisierung nur dann interessant ist, wenn sie gleichzeitig eine Konsolidierung erzwingt.

PAVE

Besonderes Potential wurde von einzelnen Teilnehmern im B2B mit seinen größeren Liefermengen und festen Lieferadressen gesehen. In den Randzeiten (abends, nachts) könnten z. B. Supermärkte automatisiert beliefert werden. Dabei muss allerdings auf die Akzeptanz durch Anwohner geachtet und ein niedriger Lärmpegel des gesamten Lieferprozesses garantiert werden. Im KEP wäre es interessant, wenn die Fahrzeuge (automatisiert) im Depot beladen würden und dann autonom zum Zusteller fahren, so dass dieser keine Arbeitszeit für die Fahrt verliert.

Insgesamt werden große Effizienzgewinne für Unternehmen durch die 24/7 Einsatzmöglichkeit (z. B. auf Baustellen, Abfallentsorgung, Straßenreinigung) erwartet. Hier wurde eingeschätzt, dass autonomes Fahren gut einsetzbar ist für Massentransporte über kurze Strecken z. B. im **Baustellenverkehr**. Hier bieten sich z. B. die Baustellen in Tegel (auf dem abgeschlossenen Gelände des ehemaligen Flughafens) für Erprobungsfahrten an. Ein großer Vorteil der automatisierten Baustellenlogistik wäre der Gewinn an Sicherheit, auch im innerstädtischen Verkehr. Es wurde jedoch betont, dass auch hier eine bedarfsgerechte Anforderungsanalyse notwendig ist, da bisher keine Ermittlung der Nutzwerte und Wünsche der heutigen Betreiber vorliegt.

Einig waren sich die Workshopteilnehmer, dass **neue Stadtgebiete** (z. B. Urban Tech Republic auf dem Gelände des TXL, Siemensstadt, Spandau Gartenfeld) prädestiniert sind für neue Formen der Mobilität und Belieferung. Hier könne man eine kompatible Infrastruktur von vornherein einplanen, neue Geschäftsmodelle zur Belieferung ermöglichen, bei denen beispielsweise autonomes Fahren mit einer Konsolidierung von Lieferungen kombiniert wird und auch autofreies Wohnen ermöglichen. Hier wäre eine völlig neue Verkehrsumgebung von Anfang an gestaltbar. Allerdings sind auch hier Regulierungen erforderlich, zum Beispiel durch Festlegung neuer Umweltstandards.

Aus der Bewertung der Workshopteilnehmer ergaben sich vier Use Cases für den kommerziell sinnvollen Einsatz im Wirtschaftsverkehr:

BEWERTUNG DER USE CASES – DIE 4 GEWINNER !!!!
1. AUTONOME SHUTTLES ZWISCHEN LOGISTIK HUBS <ol style="list-style-type: none">Die technische Machbarkeit ist nicht das Problem. An dieser Stelle der Logistikkette wurde das größte Einsparungspotenzial gesehen, mit dem größten Wirkungsgrad und Durchsetzungspotenzial. Autonomes Fahren <u>kann hier personell und bei Lenkzeitbeschränkungen entlasten.</u>
2. BAUSTELLENLOGISTIK <ol style="list-style-type: none">Die Entwicklung autonom fahrender <u>Bau-, Abfallentsorgungs-, Reinigungs- und Straßenunterhaltungsfahrzeuge und in der Landwirtschaft</u> ist bereits heute weit fortgeschritten. Die Technik ist also vorhanden.<u>Effizienzgewinne sind enorm und viele Einsatzgebiete liegen im nicht öffentlichen Raum,</u> was die gesetzlichen Hürden verringert. (Baustellen, Betriebshöfe, Ackerflächen, Messen)
3. AUTONOME PAKETBOX <ol style="list-style-type: none">Die autonome Paketbox wird <u>eher kritisch</u> gesehen. Besser autonomes Fahrzeug als temporäre Logistikfläche (fährt autonom vom Stadtrand zu einem Parkplatz, dort umladen z. B. auf Lastenräder) einsetzen.Das Thema <u>Kundenakzeptanz war umstritten</u>, da Hausbelieferung in Deutschland als bevorzugte Variante gesehen wird, während in anderen Ländern die Lieferung per Paketbox als normal betrachtet wird.
4. AUTONOM FAHRENDER LEBENSMITTELLADEN <ol style="list-style-type: none">Als Ergänzung und für die Versorgung mit Lebensmitteln im suburbanen Raum oder auf dem Campus.

Abbildung 71: Bewertung der Use Cases Fokusgruppen Workshop „Zukünftige Geschäftsmodelle“ (eigene Darstellung)

1. Autonome Shuttles zwischen Logistikhubs

Potentiale: Die technische Machbarkeit ist schon heute gegeben. An dieser Stelle der Logistikkette wurde das größte Einsparungspotenzial gesehen, mit dem größten Wirkungsgrad und höchsten Durchsetzungspotenzial. Autonomes Fahren kann hier personell und bei Lenkzeitbeschränkungen entlasten.

Handlungsbedarf: Intensivierung der Zusammenarbeit von Herstellern autonomer Fahrzeuge und Logistikunternehmen und Schaffen der Zulassungsvoraussetzungen, zunächst im Einsatz in nicht öffentlichen Bereichen (als technisches Gerät) beginnen, z. B. auf privaten Lagerflächen und Logistik Hubs, Baustellen, im halb öffentlichen Raum wie Universitätscampus und neuen, MIV freien Stadtgebieten oder als Entsorgungsfahrzeug für kontaminierte Stoffe. Mittelfristig wäre der Einsatz autonomer Fahrzeuge auf der „vorletzten Meile“ von Hub zu Hub, vom stadtnahen Zwischenlager zum Mikro-Hub, anzustreben.

2. Baustellenlogistik

Potentiale: Die Entwicklung und die Verwendung autonom fahrender Baustellen-, Reinigungs- und Straßenunterhaltungsfahrzeuge auf Autobahnen und Landstraßen sowie in der Landwirtschaft ist bereits heute weit fortgeschritten. Die Technik ist also vorhanden. Die Effizienzgewinne sind enorm und viele Einsatzgebiete liegen auch hier im nicht öffentlichen Raum, was die gesetzlichen Hürden verringert (auf Baustellen z.B. zur Abraum- oder Müllentsorgung, Verschieben von Baumaterialien, auf Betriebshöfen zum Bewegen von Containern, auf Ackerflächen und Messengeländen).

Handlungsbedarf: Zusammenarbeit mit Speziallogistikern, großen Bauunternehmern und Immobilien- und Stadtentwicklern. Prädestiniert für den Einsatz im nicht öffentlichen oder halb- öffentlichen Raum (Baustellen, Forschungs- und Versuchsanstalten, Krankenhäusern, Baustelle Urban Tech Republic, Siemens Campus, Gartenstadt), Reinigungs- und Unternehmen zur Verkehrswegeinstandhaltung (BAST).

3. Autonome Paketbox

Potentiale: Die autonome Paketbox wird als sinnvolle Ergänzung der bereits heute verbreiteten stationären Paketstation gesehen. Sie kann (und sollte) auch anbieterübergreifend sein. Das Thema Kundenakzeptanz war allerdings umstritten, da die Hausbelieferung in Deutschland immer noch als bevorzugte Servicevariante gesehen wird, während in anderen Ländern (z. B. Schweden) die Lieferung an eine Paketstation als Standard betrachtet wird.

Handlungsbedarf: An erster Stelle müssen die Städte Visionen entwickeln und diese auch umsetzen und kommunizieren. Sie haben ihre Ziele nicht immer klar definiert. Das macht es den Unternehmen schwer, sich danach auszurichten. Aber auch die KEP-Branche sollte Visionen entwickeln. In der Zukunft ist es denkbar, dass einzelne Schritte der Belieferungskette übersprungen werden können. Teilautonome Fahrzeuge können schon heute entlasten.

4. Autonom fahrender Lebensmittelladen

Potentiale: Als Ergänzung und für die Versorgung mit Lebensmitteln im suburbanen Raum oder auf dem Campus.

PAVE

Handlungsbedarf: Die Zusammenarbeit mit den großen Lebensmittelketten intensivieren. Pilotprojekte initiieren und kommerziell attraktive Betreibermodelle entwickeln.

Im Ergebnis war die einhellige Meinung „Man muss irgendwo anfangen“ und schon jetzt Areale finden, die für positive „Show Cases“ geeignet sind, wie es am Beispiel der „Seestadt Wien“ oder auch beim Efeu-Campus in Bruchsal bereits vorgemacht wurde. Als sehr geeignet wurde der Medizin- Campus Buch (Mäuseversuchsanstalt) oder die „Urban Tech Republic“ selbst genannt, wo in naher Zukunft zunächst 40 – 50 Baustellen entstehen werden.

Viele Städte zögern heute, sich zu positionieren. Aber alle vielfach genannten positiven Beispiele für eine hohe Lebensqualität in der Stadt, wie z.B. Kopenhagen oder Barcelona, funktionieren nur durch regulative Einschränkungen.

4.2.2.6 Fazit

Gewerbliche Verkehre, insbesondere Güterverkehre werden in der wissenschaftlichen Diskussion nur selten betrachtet. Grund dafür sind fehlende oder unvollständige Daten. Aus diesem Grund wurde für die vorliegende Untersuchung die Methode des qualitativen Interviews angewandt. Zum bedarfsgesteuerten Personenverkehr (DRT) wurden 8 Interviews mit Mobilitätsexperten geführt, zum automatisierten Güterverkehr 23 Interviews mit Spediteuren und Kurier- und Expressdiensten, Verbänden und der Stadtverwaltung. Die Ergebnisse aus diesen Güterverkehrs-Interviews wurden außerdem in einer Fokusgruppe mit 7 Teilnehmern aus der Transportwirtschaft und der kommunalen Planung diskutiert und nach Praktikabilität bewertet.

Im Bereich des Personenverkehrs wurde zunächst die Digitalisierung neu entstandenen Mobilitätsangebote untersucht. Gegenüber den seit den 1980er Jahren etablierten Rufbussystemen bieten die Ridehailing und -pooling-Angebote den großen Vorteil, dass dank der „Appisierung“ die Buchungsprozesse automatisiert ablaufen und ganz auf die Nutzerseite verlagert werden können.

Der folgerichtig letzte Schritt zu automatisierten Mobilitätsdiensten ist das fahrerlose Fahrzeug. Mit dem Wegfall des Fahrers verwischen die schon heute schwindenden Unterschiede zwischen Taxi-, Carsharing- und Mietwagendiensten noch mehr. Für den Kunden macht es keinen Unterschied, ob er ein individuelles oder geteiltes Fahrzeug mietet oder ein selbstfahrendes Taxi - „Robotaxi“ - ruft. Das Fahrzeug kommt selbständig zu ihm. Die verkehrlichen Auswirkungen sind evident: diese Dienste erhöhen bei gleicher Nachfrage das Verkehrsaufkommen, dies vor allem aufgrund der zahlreichen Leerfahrten.

Kollektive Dienste dagegen, wie autonome Bus-Shuttles oder die gebündelte Beförderung mehrerer Personen im Pkw, besitzen unter gezielten verkehrspolitischen Rahmenbedingungen ein deutliches Potenzial zur Verbesserung der städtischen Verkehrssituation, wie schon unter Punkt 4.1.7 im 4. Szenario („Das schöne kollektive Szenario“) vom Beginn des PAVE-Projekts beschrieben.

Diverse Simulationen – darunter die in diesem Projekt unter Punkt 4.5 vorgestellte - haben ergeben, dass mit einer 100%igen Ridepooling-Flotte bis zu 90% des in einer Stadt vorhandenen Fahrzeugparks eingespart werden können. Auch die Anzahl der Fahrzeuge und der Personenkilometer kann reduziert werden. Im Idealfall können diese Dienste die Abkehr vom individuell genutzten Pkw erleichtern, indem sie eine hohe individuelle Flexibilität und einen annähernd gleichen Komfort wie beim eigenen Auto verheißen.

On Demand Ridepooling könnte mit autonomen Fahrzeugen wirtschaftlich attraktiv werden

Fahrzeugbedarf bei 100% Ridepooling (rot)
Und 100% Carsharing/Robotaxi (rot+blau)



- Automatisierung des heutigen MIV = erhöhtes Verkehrsaufkommen
- 100% gebündelte automatisierte Personenverkehre - ca. 90% weniger Fahrzeuge und weniger Fahrzeugkilometer
- Das heute bereits mit interessanten Geschäftsmodellen praktizierte On Demand Ridepooling könnte durch den Wegfall des Fahrers wirtschaftlich attraktiv werden
- Erschließen neuer Zielgruppen (Menschen, die nicht selbst fahren können.)

Abbildung 72: On Demand Ride Pooling

Voraussetzung dafür ist, dass die Kommunen auf Basis einer gründlichen Analyse der Vor-Ort-Situation definierte Rahmenbedingungen setzen, wie etwa indem die Anzahl der Anbieter in einem Operationsgebiet festgelegt wird.

Um unerwünschte Kannibalisierung zwischen den einzelnen Verkehrsträgern zu vermeiden, ist für den Betrieb der automatisierten Mobilitätsservices die Abstimmung mit dem gesamten Mobilitätsangebot anzuraten. Vorzugsweise sollte dies unter der Steuerung des jeweiligen städtischen ÖV-Unternehmens geschehen, das auch für eine ausgewogene Mischung von nachfragebestimmten autonomen On-demand-Diensten und angebotsorientierten fahrplangebundenen Liniendiensten sorgen sollte.

Darüber hinaus sollten Anreize geschaffen werden. Regulative und kostenrelevante Maßnahmen wie eine City Maut, höhere Parkgebühren oder Einfahrbeschränkungen in mehr oder weniger große Stadtgebiete können die Chance für autonome Pooling-Verkehre weiter verbessern und ihre Wirtschaftlichkeit steigern, wenn diese bei den genannten Maßnahmen bessergestellt werden als der MIV.

Doch auch die klassischen ÖV-Anbieter können profitieren. Bei ihnen löst der Wettbewerb mit den neuen Mobilitätsdienstleistern einen Digitalisierungs- und Modernisierungsschub aus, der lange auf sich warten ließ. Initiativen wie die der Plattform „Jelbi“ von den Berliner Verkehrsbetrieben, die alle Verkehrsträger über eine App buchbar machen soll, weisen in die richtige Richtung. Zusätzlich kann eine intelligente Integration dieser Angebote helfen, die im Rahmen der Corona-Pandemie abnehmende Attraktivität des ÖPNV neu zu beleben.

Seine vermutlich höchste Wirkung entfaltet autonomes Fahren jedoch im Einsatz automatisierter Shuttles in ländlichen oder suburbanen Räumen. Durch den Wegfall der Kosten für den Fahrer könnte auch in Räumen mit geringer Nachfragedichte der Subventionierungsbedarf zumindest erheblich reduziert werden.

PAVE

Eine Empfehlung aus den Experteninterviews lautete, dort mit dem autonomen Personenverkehr zu beginnen, wo die Umsetzung am einfachsten ist. Private oder halböffentliche Gelände bieten sich für erste autonome People Mover auf Uni-Campussen, Messe- oder Firmengeländen an oder auf neu zu erschließenden Wohngebieten (z.B. Urban Tech Republic auf dem Gelände des TXL), wo autonome Shuttles als Teil des ÖPNV den Anschluss an die nächste S-Bahnstation gewährleisten können und so den Verzicht auf das eigene Auto erleichtern. Zudem kann dort die notwendige intelligente Infrastruktur von vornherein eingeplant werden.

Wichtige Potenziale durch Automatisierung im gewerblichen Personenverkehr

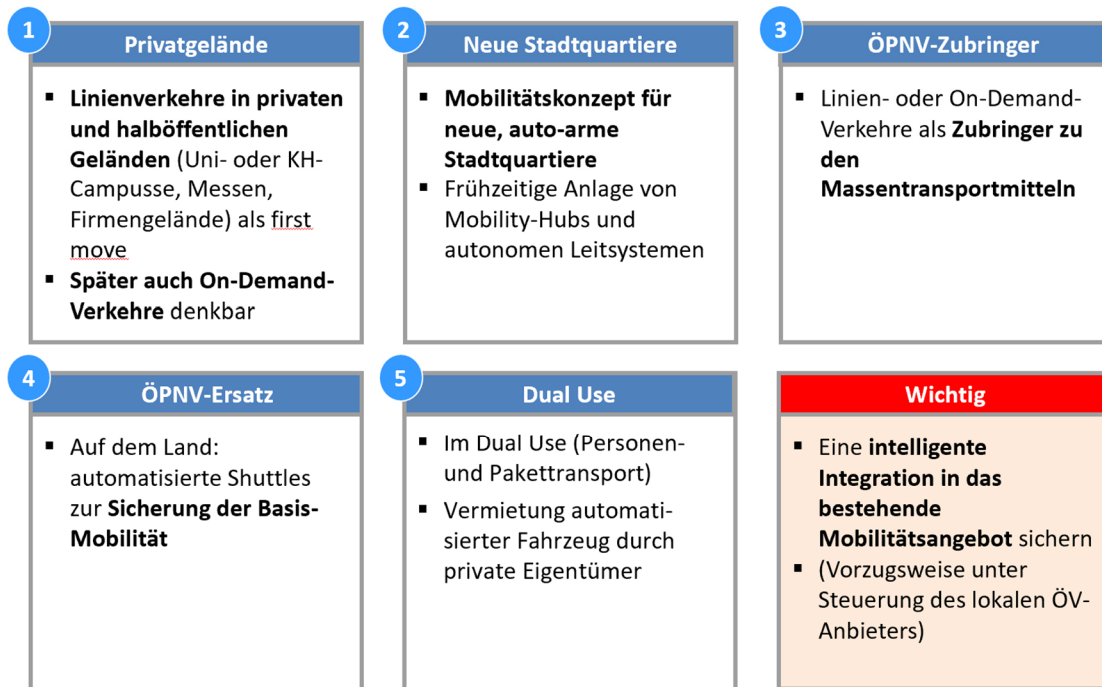


Abbildung 73: Wichtige Potentiale durch Automatisierung im gewerblichen Personenverkehr

Im Gütertransport stellen sich die Potentiale automatisierten Fahrens sehr viel deutlicher dar als im Personenverkehr. So sind auf Betriebs-, Hafen- und Flughafengeländen Lösungen bereits im Einsatz, die einen fahrerlosen Transport ermöglichen oder schwere körperliche Tätigkeiten, wie zum Beispiel Schneeräumung oder die Beladung von Fahrzeugen, durch Automatisierung ersetzen. In Spezialbereichen wie der industriellen Landwirtschaft oder der Instandhaltung von Straßen, nehmen sie den Menschen aufwändige oder gefährliche Routineaufgaben ab. Auch beginnen insbesondere in den USA und China kleine selbstfahrende Lieferroboter in abgeschlossenen Gebieten praktische Anwendung zu finden. Teilweise erobern sie dort bereits das öffentliche Straßenland.

Generell eröffnet autonomes Fahren für die drängenden Probleme des gewerblichen Güterverkehrs wie die kontinuierlich steigende Transportnachfrage, Kostendruck und Fahremangel große Chancen.

Durch Wegfall des Fahrers können bis zu 70% der Personalkosten eingespart werden. Nicht nur die Art der Fahrzeuge, ihre Steuerung durch den Menschen oder autonome Systeme und neue Antriebsformen, sondern auch die Organisationsstrukturen, die komplette Prozesskette entlang des klassischen Logistikmodells mit Vorlauf, Hauptlauf, Nachlauf werden sich verändern. Einzelne Prozessschritte, wie Ladungsübergabe beim Empfänger oder Umladungen können durch Automatisierung übersprungen werden.

PAVE

In der zunehmend standardisierten Welt ist zudem offen, wer Eigner und Betreiber große automatisierter Flotten sein wird. Experten sind überzeugt, dass autonom fahrende Nutzfahrzeuge nicht mehr dem Logistikunternehmen gehören werden, sondern dass diese die Fahrzeuge beispielsweise vom OEM oder von einer Autovermietung leasen werden, nach einem ähnlichen Modell wie man es aus dem Containerverkehr kennt. Dies wiederum würde es auch kleineren, kapitalschwachen Unternehmen erlauben, die aus dem Wegfall der Fahrerkosten resultierenden Kostenvorteile des autonomen Fahrens zu nutzen.

In unseren Interviews und der Experten-Fokusgruppe konnten wir Potentiale für autonome Lieferfahrzeuge insbesondere in mehr oder weniger abgeschlossenen Gebieten wie Großbaustellen, Betriebshöfen, Messen oder auch neuen Wohngebieten ableiten.

Wichtige Potentiale durch Automatisierung in der städtischen Logistik

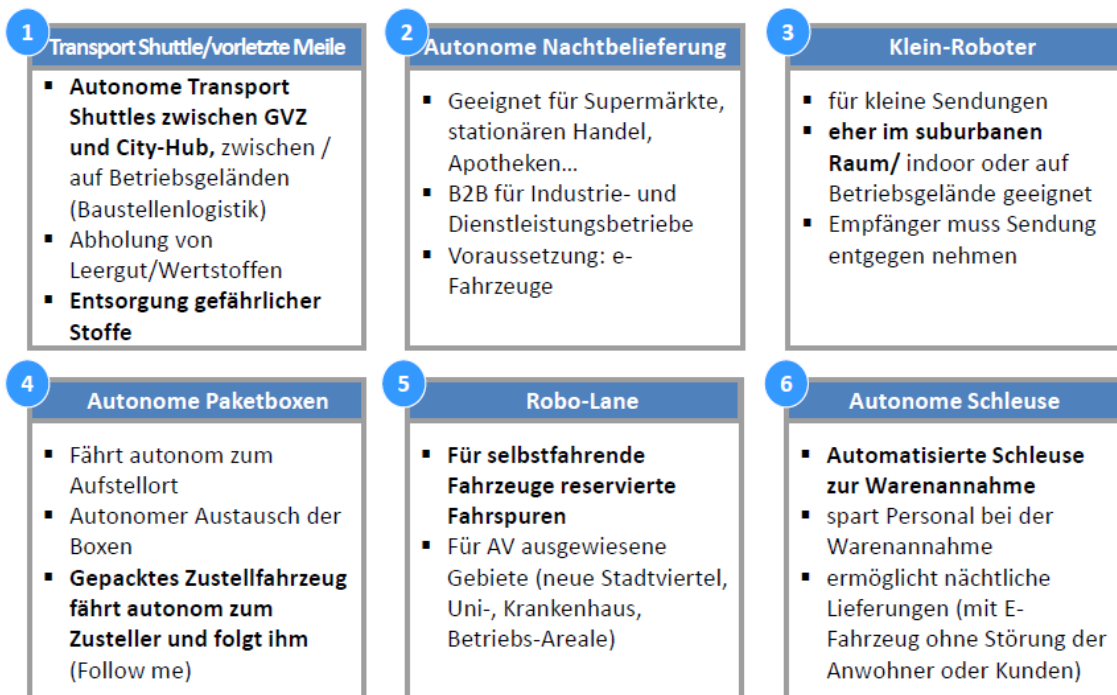


Abbildung 74: Wichtige Potentiale durch Automatisierung in der städtischen Logistik

Im dicht besiedelten urbanen Raum halten die Experten automatisiertes Fahren vor dem Zeithorizont 2035 nur in ausgewählten Fällen für machbar und sinnvoll. Das Potenzial sehen sie nicht so sehr für die immer wieder zitierte „letzten Meile“, sondern vor allem für die „vorletzte Meile“, wo autonome Shuttle-Transporte von den Logistik-Hubs am Stadtrand in den verkehrsarmen Nachtstunden Entlastung bieten könnten. Mit einem solchen Modell könnten Apotheken, Supermärkte oder im Stadtgebiet liegende Micro-Hubs beliefert werden. Eine ebenfalls automatisierte Übergabe mittels automatisierter Schleusen spart Personal bei der Warenannahme und auch die Paketdienstleister könnten die immer knapper werdende Ressource „Zusteller“ effektiver einsetzen. Die „letzte Meile“ mit der Übergabe an den Privatkunden hingegen wurde aufgrund der Erwartungshaltung der deutschen Kunden (Lieferung an die Wohnungstür) von den Experten eher als kritisch für die Automatisierung betrachtet.

PAVE

Eine solche mehrstufige Logistikköslung würde durch Automatisierung der Be- und Entladung auf Basis standardisierter Ladungsträger weiter an Effektivität gewinnen. Und sie könnte umso nutzbringender umgesetzt werden, wenn sie in die Hände einer eigens zu gründenden städtischen Logistikgesellschaft gelegt würde.

Empfehlung: Frühzeitiger Ausbau der Infrastruktur und eine kluge Rahmensetzung durch die Städte



Abbildung 75: Empfehlungen

Sowohl für den Personen- als auch den Gütertransport gilt somit: Damit das autonome Fahren einen Beitrag zur Entlastung der Verkehrssituation und für mehr Sicherheit im städtischen Straßenverkehr leisten kann, sollten die Städte der Entwicklung aktiv und offen gegenüberstehen und frühzeitig die Weichen stellen, damit alle das vorhandene Potenzial nutzen können.

4.2.2.7 Handlungsempfehlungen

Städtische Ziele und Visionen

Für große wie kleine Städte gilt, dass sie sich erstmal darüber klar werden müssen, wie ihre Stadt in Zukunft aussehen soll und was für ihre Stadt verträglich ist. Eine solche Selbsteinschätzung liegt in der Regel nicht vor. Idealerweise sollten diese Konzepte, Wohnen, Arbeiten und Transport als ganzheitliches System beinhalten. Die Umsetzung sollte von der Stadt gesteuert werden. So können Infrastrukturausbau und regulatorische Rahmensetzungen frühzeitig vorangetrieben werden. Autonome Verkehrssysteme wären darin ein integraler Baustein für den Personen- und Gütertransport. So können Städte integrative Langfristziele erreichen und Planungssicherheit für Unternehmen liefern.

Autonome Verkehrssysteme als Beitrag zur Verkehrswende

Einen Beitrag zur Verkehrswende können autonome Verkehrssysteme nur dann leisten, wenn Voraussetzungen für ihre Nutzung definiert werden. Regulative Maßnahmen wie eine City-Maut oder

PAVE

Einfahrbeschränkungen in mehr oder weniger großen Stadtgebieten (mit Ausnahmeregelungen für umweltfreundliche Fahrzeuge) schaffen hier hervorragende Einsatzmöglichkeiten. Autonome Personenverkehre sollten als gebündelte und geteilte Verkehre in den ÖPNV integriert werden. Im Güterverkehr könnten städtisch betriebene Güterverteilzentren, wie etwa der stadteigene Logistikentwickler (Sogaris) in Paris, Warenströme besser bündeln und durch die Schaffung unterstützender Infrastruktur die Automatisierung vorantreiben.

Potential Autonome Shuttles und Rufbusse: Integration in den ÖPNV

Der Trend zur autofreien oder verkehrsreduzierten Innenstadt ist schon heute in vielen Großstädten zu beobachten. Die Umsetzung kann aber nur bei einem gleichzeitigen Ausbau des ÖPNV gelingen. Hier, in der Erweiterung des ÖPNV Angebots liegt das große Potenzial für zukünftigen autonomen geteilten Personentransport. Treten DRT Verkehre als Selbständige auf, sollte geprüft werden, wie viele Anbieter und Fahrzeuge die Stadt verträgt. Dafür sind eine ganzheitliche Bestandsaufnahme und die Abstimmung mit dem bereits vorhandenen Mobilitätsangebot wichtig, um zusätzliches Verkehrsaufkommen oder die Kannibalisierung des ÖPNV zu vermeiden. Auch Stadtrandgebiete sollten versorgt werden.

Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass Anbieter sich in einer freien, nichtmonopolistischen Marktsituation in den Bereich der höchsten Effizienz bzw. Gewinnrate zurückziehen würden. Dieser liegt im Stadttinneren vor, wo im Fall Berlins bereits ein dichtes ÖPNV-Netz vorliegt. Sollen alle Stadtbewohner:innen gleichsam von DRT im Sinne eines ÖPNV profitieren, lässt sich daraus Regulierungsbedarf ableiten, der beispielsweise über Flächenlizenzen gedeckt werden könnte. Zudem suggerieren die Modellergebnisse, dass niedrige DRT-Nutzerpreise zu höheren Anteilen von Wegen führen, die derzeit noch mit dem Umweltverbund zurückgelegt werden. (TU Berlin).

Eine zukünftige Automatisierung von On-Demand-Shuttle Diensten begünstigt darüber hinaus den Betrieb von Kleistwagenflotten, die gegenüber den heute üblichen Flotten aus Kleinbussen eine stärkere Belastung des öffentlichen Verkehrssystems darstellen würden. Neue wirtschaftliche Anreize für das effiziente Bündeln von Fahrten könnten jedoch zukünftig den Einsatz größerer Fahrzeugtypen begünstigen und die Entwicklung von im öffentlichen Interesse agierenden Diensten fördern. (OvGU Magdeburg)

Sollen automatisierte On-Demand-Shuttles außerdem zur Erfüllung politischer Ziele der CO₂-Reduktion beitragen, ist eine Begleitmaßnahme zur Einführung der Shuttles zu empfehlen. Die reine Einführung einer sogenannten "Pull-Maßnahme", also einer zusätzlichen Option bzw. eines zusätzlichen Anreizes, hat in der Simulation bezüglich der CO₂-Reduktion nur geringe positive Auswirkungen und steigert die Verkehrsleistung auf der Straße. Durch Kombination mit einer "Push-Maßnahme" lassen sich jedoch stärkere Reduktionen des CO₂-Ausstoßes und der Verkehrsleistung erreichen. Die Kombination einer (harten) "Push-Maßnahme" mit einem Substitutionsangebot lässt sich bezüglich der Nutzerakzeptanz vermutlich politisch besser durchsetzen, als die reine Durchsetzung der "Push-Maßnahme". (TU Berlin)

Gesetzliche Grundlagen schaffen

für die Genehmigung autonomer Shuttles muss das Personenbeförderungsgesetz (PBefG) weiter angepasst werden. Insbesondere sollten neue Mobilitätsdienstleistungen wie digital vermittelte, nachfragegesteuerte Mobilitätskonzepte oder die Nutzung autonomer Transportmittel ausgewogene, innovationsfreundliche Festlegungen erfahren. Zusätzlich sollte der Übergang für den Betrieb autonomer Shuttles oder nachfragegesteuerter Busse aus der sogenannten „Experimentierklausel“ in den Normalbetrieb erleichtert werden.

PAVE

Kommunikation und Begeisterung

Ohne eine entsprechende Nachfrage, werden es Betreiber autonomer Verkehrssysteme schwer haben, wirtschaftlich erfolgreich zu sein. Der Wechsel vom individuell genutzten konventionellen Auto auf ein autonomes mehrfach geteiltes Fahrzeug, wird nur gelingen, wenn möglichst viele mitmachen. Langfristige Ziele, aber auch einzelne Vorschläge und Maßnahmen sollten deshalb leicht vermittelbar sein und es sollten attraktive Bilder im Sinne einer erstrebenswerten Zukunft geschaffen werden.

Potential automatisierte Mitarbeitermobilität

Viel kann auch erreicht werden, wenn autonome Verkehrssysteme für Unternehmen aus der freien Wirtschaft zum Beispiel Werksverkehre auf dem Firmengelände ergänzen oder Pendlershuttles zur nächsten Bahnstation anbieten.

Potential Immobilienentwicklung

Auch die Wohnungswirtschaft hat die Attraktivität autofreier oder verkehrsreduzierter Quartiere als Wohnform der Zukunft erkannt. Daher zeigt sich die Immobilienbranche aufgeschlossen für neue Mobilitätsangebote, möglicherweise auch mit autonomen Fahrzeugen, da es den Bauherrn von der Bereitstellung von Parkplätzen entlastet und die Attraktivität der Wohngebiete erhöhen kann.

Befähigung der Gemeinden

Verwaltungen und Entscheider sind oft nicht ausreichend auf die Herausforderungen der digitalen Mobilität vorbereitet. Gerade kleineren Kommunen fehlt es oft an Knowhow und personellen Ressourcen, um die Chancen für autonome Verkehrssysteme zu erkennen und sie für ihre eigenen Ziele zu nutzen. Hier wäre eine unabhängige Beratungsstelle für Städte und Kommunen dringend erforderlich.

Potential Fahrerarbeitsplatz

Für die drängenden Probleme des gewerblichen Güterverkehrs eröffnet das autonome Fahren große Potentiale. Einzelne Prozessschritte, wie die Ladungsübergabe im GVZ, im innerstädtischen Hub oder beim Empfänger können automatisiert oder durch Automatisierung übersprungen werden. Das Berufsbild des Fahrers (besonders des Fernfahrers) verändert sich und wird technisch aufgewertet. Er sitzt nicht mehr hinter dem Steuer, sondern wird zum Operator, der über einen Bildschirm mehrere autonome Fahrzeuge überwacht und steuert.

Potential Vorletzte Meile

Ein Effizienzgewinn wird insbesondere auf der „vorletzten Meile“ gesehen. Durch autonome Shuttle-Transporte vom Logistik-Hub am Stadtrand könnten Personaleinsatz und Fahrzeiten verringert werden, besonders in den verkehrsarmen Nachtstunden. Mit einem solchen Modell könnten Betriebe, Supermärkte oder im Stadtgebiet liegende Micro-Hubs beliefert werden. Vervollständigt würde der Warenaustausch durch eine Übergabe mittels automatisierter Schleusen. Auch die Paketdienstleister könnten die immer knapper werdende Ressource „Zusteller“ effektiver einsetzen. Die Automatisierung der „letzten Meile“ mit der Übergabe an der Haustür wurde aufgrund der Erwartungshaltung der deutschen Kunden von den Experten eher als kritisch betrachtet.

PAVE

Sonderspuren für automatisiertes und autonomes Fahren

Die Logistikbranche wünscht sich eine zeitgemäße Straßen- und Stadtplanung, die den Lieferverkehr besser berücksichtigt und nicht nur als Behinderung sieht. Dazu gehören Logistikflächen für Mikrohub, mehr und besser gemanagte Lieferzonen, definierte Lieferspuren, die in die Stadt hinein und hinaus führen, und der Ausbau einer intelligenten Infrastruktur, die auch die erforderliche Technik und Informationen liefert. In der Perspektive wären dies definierte und möglichst induktiv geführte Fahrspuren für autonome Lieferfahrzeuge und Busse, wie sie einer digitalen Stadt entsprechen (und aktuell z. B. vom israelischen Startup ElectReon in Tel Aviv, Gotland (Schweden) und in Karlsruhe getestet werden).

4.3 AVF-Potentiale in der urbanen Mobilität (INA-InUrban)

Die erarbeiteten Szenarien enthalten in ihren unterschiedlichen Ausprägungen stets Mobilitäts-Angebote mit AVF- Technologien, die entsprechend der zukünftig vermuteten Rahmenbedingungen genutzt werden. Der Potentialabschätzung werden deshalb folgende Use Cases zu Grunde gelegt.

4.3.1 Use Cases

Motorisierter automatisierter Individualverkehr

Der ADAC nennt für 2019 über 9000 aktuelle Pkw-Modelle, die mit Farben und Sonderausstattungen weiter den individuellen Anforderungen anpassbar und nahezu universell einsetzbar sind (Nah-/ Fernverkehr). Wir gehen davon aus, dass es diese Vielfalt auch in der zukünftigen e-Mobility- und AVF-Fahrzeugwelt geben wird, zumindest der Wunsch danach bestehen wird. Wesentliches Element des AVF ist eine deutlich erhöhte aktive und passive Sicherheit. Die Möglichkeiten des AVF führen mit neuen Mobilitäts-Funktionen zu einer Attraktivitätssteigerung des MIV und zu mehr Verkehr bei gleichem Fahrzeugbesitz. Auf den Fahrzeugbesitz wird nicht verzichtet, selbst wenn bei gleicher/besserer Mobilität die Kosten der neuen Mobilitätsdienste geringer sind als die variablen Kosten des eigenen Fahrzeuges.

Das eigene Auto kann kommerziellen Robotaxi- oder Ridesharing-Anbieter zeitlich /räumlich gegen Entgelt überlassen werden. In diesem Fall gelten die entsprechenden Restriktionen.

Restriktionen:

Alternative 1: AVF in privater Hand dürfen nur mit mindestens einem Insassen bewegt werden (Level 4). Die Sicherheitstechnologie steht damit jedermann zur Verfügung, die Mobilitätsvorteile entfallen.

Alternative 2: Für AVF in privater Hand werden bei Leerfahrten Gebühren erhoben. Die Bepreisung entspricht den Parkgebühren in der durchfahrenen Zone mit den höchsten Parkgebühren (€/h).

Alternative 3: Für Pkw in privater Hand werden die Kosten für Anwohnerparkausweise angehoben, z.B. auf die Höhe einer täglich angerechneten Citymaut.

Robotaxi

„Die Größe der Sharingflotte beträgt gegenüber dem IV ca. 20%, bei vollständiger Übernahme aller Pkw und ÖV-Bus Fahrten (mit Integration in den ÖV-Schienenverkehr)“ [nach MEGAFON]. Die Ausprägung dieser Flotte kann nicht die Vielfalt der heutigen Flotte haben, d.h. alle individuellen Anforderungen erfüllen. Zu untersuchen ist, in wie viele Segmente der Flotte geteilt werden kann, um die gewünschten Servicelevel und Wirtschaftlichkeit zu erreichen.

Die Fahrzeuge des Robotaxidienstes können den heutigen Taxen entsprechen, wobei auch größere Fahrzeuge zum Transport von Gruppen, Behinderten, Gepäck und Gütern denkbar sind. Kleinere Fahrzeuge, wie die Kleinstwagenklasse (wie VW e-up!) sind wirtschaftlich sinnvoll, da der durchschnittliche Besetzungsgrad 1,3 Personen beträgt, die Fahrzeuge nur im Stadtverkehr eingesetzt werden und der e-Antrieb Robustheit verspricht.

Zusätzlich ist das Problem des Ferienverkehrs zu lösen. Sowohl von der Kapazität der Flotte als auch der Qualität stehen für den Urlaubsverkehr keine Fahrzeuge zur Verfügung.

PAVE

„Die Verkehrsleistung mit Robotaxis ist 20 % höher als mit dem heutigen IV, 20% der Stellplätze werden benötigt“ [nach MEGAFON]. Die variablen Kosten entsprechen dem 1,2 fachen des AFV-MIV, die fixen etwa 1/5 zuzüglich Management und Fahrzeugclearing. Die Umstellung des urbanen Verkehrs auf Robotaxi verringert deshalb den Fahrzeugbesitz und Nutzung nur begrenzt. Robotaxis weiten die heutigen Taxi- und Mietwagenfunktionen mit differenzierten Flottenfahrzeugen aus.

Restriktionen:

Alternative 1: Für Robotaxis werden bei Leerfahrten Gebühren erhoben. Die Bepreisung entspricht den Parkgebühren in der durchfahrenen Zone mit den höchsten Parkgebühren (€/h).

Ridesharing

„Die Größe der Sharingflotte beträgt gegenüber dem IV ca. 7%, bei vollständiger Übernahme aller Pkw und ÖV-Bus Fahrten (mit Integration in den ÖV-Schienenverkehr)“ [nach MEGAFON]. Die Ausprägung dieser Flotte kann nicht die Vielfalt der heutigen Flotte haben, d.h. alle individuellen Anforderungen erfüllen. Zu untersuchen ist, in wie viele Segmente der Flotte geteilt werden kann, um die gewünschten Servicelevel und Wirtschaftlichkeit zu erreichen.

Die Größe der Fahrzeuge in geteilten on Demand Diensten wird durch das Bedienkonzept/ den Servicelevel und die Nachfragedichte bestimmt. Ein hoher Servicelevel mit adressengenauem Halt führt tendenziell zu kleineren Fahrzeugen.

Das Anfahren individueller Haltepunkte (Adresse oder Rendezvouspunkt) ist mit Umwegen und Umweg- und Haltezeiten während einer Tour verbunden. D.h. um eine Fahrtzeit zu garantieren, die nicht als größer 30% als eine MIV-Fahrt ist oder kleiner ist als die des ÖPV, muss die Fahrgastzahl beschränkt werden. Bei einem durchschnittlichen Besetzungsgrad von 1,8 bis 2,6 werden in verschiedenen Studien Fahrzeuggrößen unter 8 Personen genannt. Rendezvouspunkte oder virtuelle Haltestellen sind ein geeignetes Mittel, die Kosten zu senken und die Effizienz des Angebotes zu erhöhen. Gleichzeitig sinkt die durchschnittliche Reisezeit der Fahrgäste.

Unter virtuellen Haltestellen sollen Haltestellen verstanden werden, die für on Demand Dienste zum Halt jederzeit frei sind, jedoch nur bei Bedarf angefahren werden. Rendezvouspunkte werden wie eine Adresse spontan verabredet, können aber auch Haltepunkte sein, die anstelle einer unzugänglichen Adresse angefahren werden.

Nimmt man eine maximale Gehentfernung von ca. 125m an entspr. 2 min, ergeben sich für Berlin (1.000km²) ungefähr 31.097 Zellen. Dies erfordert etwa 62.000 virtuelle Richtungshaltestellen. Bezogen auf das gesamte Straßennetz (5480km) sind die Haltestellenabstände dann 176 m. Zum Vergleich sind die 6452 Richtungshaltestellen der BVG im übergeordneten Straßennetz 480 m voneinander entfernt.

Zusätzlich ist das Problem des Ferienverkehrs zu lösen. Sowohl von der Kapazität der Flotte als auch der Qualität stehen für den Urlaubsverkehr keine Fahrzeuge zur Verfügung.

„Die Verkehrsleistung mit Ridesharing beträgt 64 % des IV, 7% Stellplätze werden benötigt. Die variablen Kosten betragen etwa 25% und die fixen Kosten etwa 3 % pro Person bei einem Besetzungsgrad von 2,4 zuzüglich Management und Fahrzeugclearing“ [nach MEGAFON]. Die Umstellung des urbanen Verkehrs auf Ridesharing verringert deshalb den Fahrzeugbesitz begrenzt und schränkt die urbane Nutzung stark ein (Kosten deutlich geringer bei gleicher Reisezeit (kürzeste + 30% Stauäquivalent)).

PAVE

Restriktionen/Förderung

Alternative 1: Förderung durch Verzicht auf Leerfahrtenbepreisung

Alternative 2: Förderung durch Verzicht auf Citymaut

Alternative 3: Förderung durch Subventionierung

Dual Use privat AVF-Fahrzeug und Robotaxi/Ridesharing

1. Dual Use

1.1 Zeitweise Überlassung privater AVF an Robotaxi/Ridesharing- Unternehmen.

Der Überlassung liegt eine Vereinbarung des AVF-Besitzers und des Robotaxi/Ridesharing-Unternehmens zu Grunde. Hier wird Dauer, Art der Nutzung und Regelmäßigkeit der Überlassung festgelegt. Entsprechend wird die Nutzung vergütet. Gleichzeitig wird das private AVF als ein Fahrzeug des ÖV, Robotaxi/Ridesharings eingestuft und unterliegt auch während der privaten Nutzung nicht den sonst geltenden Regularien.

1.2 Dauerhafte Überlassung eines Fahrzeuges von einem Robotaxi/Ridesharing- Unternehmen an einen privaten Nutzer (Leasing) mit dem Vorbehalt der Nutzung durch den Leasinggeber. Die Dauer, Art der Nutzung und Regelmäßigkeit der Überlassung des Fahrzeuges des Leasingnehmers wird festgelegt. Entsprechend wird die Leasingrate angepasst. Gleichzeitig wird das private AVF als ein Fahrzeug des ÖV, Robotaxi/Ridesharings eingestuft und unterliegt auch während der privaten Nutzung nicht den sonst geltenden Regularien (Prime Leasing).

Für 1.1 und 1.2 beinhaltet die Vereinbarung über die Überlassung, welcher Partner die erforderlichen Services (Reinigung, Laden) übernimmt. Z.B. bei Full Service übernimmt das Robotaxi/Ridesharing- Unternehmen alle Services.

ÖPNV

Das zukünftige ÖPNV-Angebot entspricht in diesem Projekt sowohl in Preis als auch Leistungen dem heutigen Angebot. Der Einfluss des automatisierten vernetzten Fahrens wird nur gestreift, obwohl es die Struktur des ÖPNV verändern kann.

Fahrzeugflotte

Durch den Wegfall der Personalkosten und des Arbeitszeitgesetzes (Lenk- und Ruhezeiten) ergeben sich Spielräume für die Angebots- und Flottenoptimierung. Tendenziell wird die Flotte kleiner und ihre Struktur (Fahrzeuggrößen) kann den Anforderungen anders als heute angepasst werden. Der ÖPNV ist ganz wesentlich durch die verkehrs- finanz- und sozialpolitischen Vorgaben gestaltet und geprägt. Zumindest ein Teil der zu erwartenden Kosteneinsparungen kann zur Verringerung des Subventionsbedarfs des ÖPNV verwendet werden.

Hypothese

Der ÖPNV baut sein Angebot der Schienenverkehrsmittel aus, das Mobilitätsangebot der Straßenfahrzeugflotte wird optimiert unter Einbeziehung privater Mobilitätsanbieter. Der ÖPNV bietet ausschließlich fahrplanbasierte Dienste an.

PAVE

Restriktionen/Förderung

Alternative 1: Förderung durch Verzicht auf Leerfahrtenbepreisung

Alternative 2: Förderung durch Verzicht auf Citymaut

Alternative 3: Förderung durch Subventionierung

Diskussion der Use Cases

Grundsätzlich kann ein Reisender mit seinem eigenen Pkw (Fahrrad) seine Mobilität mit höchster Flexibilität selbst bestimmen, den Komfort, die Route, die Geschwindigkeit, die Kosten.

Ein Reisender mit dem ÖV muss sich flexibel anpassen an das starre Angebot, an den Komfort, den Abfahrtsort, die Abfahrtszeit, die Mitfahrer, die Route (auch Umsteigen), die Geschwindigkeit, die Kosten. Dafür erhält er das Versprechen einer verlässlichen, berechenbaren und sicheren „Beförderung“.

AVF-Fahrzeuge ermöglichen on Demand Dienste (Taxi, Ridesharing) mit Kosten, die zwischen ÖV und Pkw liegen. Der private Pkw bekommt mit AVF-Technologien eine dem ÖV vergleichbare verlässliche, berechenbare und sichere „Beförderung“. Der ÖV kann mit niedrigeren Kosten und kleineren Fahrzeugen Liniendienste mit kürzeren Fahrplanknoten/OnDemand anbieten.

	Mobilitätsangebot		Fahrzeuggröße
Pkw (Fahrrad)	Stellplatz	Flexibel++++	Plätze 4(-8)
Robotaxi	Haustür	Flexibel +++	Plätze 4(-8)
	Rendezvouspunkt	Flexibel ++	Plätze 4(-8)
Ridesharing	Haustür	Flexibel +++	Plätze (4-)8
	Rendezvouspunkt	Flexibel ++	Plätze 8
	virtuelle Haltestelle	Flexibel +	Plätze bis 16
	Bedarfshaltestelle	flexibel	Plätze bis 16
ÖPNV Fahrplan	Haltestelle	Starr +++	Plätze über 16 – 70 (100)

Tabelle 12: Mobilitätsangebote nach Flexibilität

Die Tabelle 12 verdeutlicht, je flexibler das Angebot ist, desto weniger muss sich der Reisende an das Mobilitätsangebot anpassen. Die in Kauf genommene (individuelle) Anpassung ist dort am größten, wo die Vorteilhaftigkeit des Angebotes konkurrenzlos oder zumindest in Teilbereichen vorteilhaft ist (wie z.B. Flugreise, ÖPNV-Kosten).

Die Fahrzeuggröße ist direkt abhängig von der Flexibilität des Angebotes, je flexibler das Angebot, desto kleiner sind die Fahrzeuge.

Um ein attraktives Angebot, einen hohen Servicelevel, zu erreichen, ist für ein gegebenes Gebiet eine Mindestfahrzeugflotte nötig. Während der Einführungsphase sollten deshalb Robotaxi- und Ridesharing-Dienste von einer Flotte gleich großer Fahrzeuge erbracht werden. D.h. der Disposition stehen entsprechend dem Bedarf alle Fahrzeuge der Flotte zur Verfügung. Erst bei größeren Flotten ist die Differenzierung des Angebotes mit unterschiedlichen Fahrzeugen wirtschaftlich möglich, ebenso mehrere Anbieter mit unterschiedlichem Leistungsspektrum.

Mengengerüst

Grundlage des Mengengerüsts ist hier das Forschungsprojekt „Mobilität in Städten – SrV“, Erhebungsdurchgang SrV 2013. Für Berlin ist hier letztmalig die Aufteilung der Gesamtstadt in innere Stadt (S-Bahn Ring, Hundekopf) und äußere Stadt vorgenommen worden. Diese Unterteilung ist wertvoll, da Mobilitätsverhalten und Verkehrsangebote in diesen Stadtbereichen durchaus unterschiedlich sind.

Berlin Daten SrV 2013 alle Wege

Innere Stadt		MIV	MIV Mitfahrer	ÖPNV	Fahrrad	zu Fuß	Summe
Verkehrsleistung innere Stadt	Pkm	33		47	14	6	
Verkehrsleistung	Pkm	6,01		8,56	2,55	1,09	18,20
Reisezeit	min	23,1		35,8	17,6	12,9	
Entfernung	km	8,7		8,9	3,4	0,8	
Geschwindigkeit	km/h	22,6		14,9	11,6	3,7	
äußere Stadt							
Verkehrsleistung äußere Stadt	Pkm	49		41	6	4	
Verkehrsleistung äußere Stadt	Pkm	25,63		21,44	3,14	2,09	52,30
Reisezeit	min	22,5		41,4	18,4	14	
Entfernung	km	8,9		11	3,5	0,9	
Geschwindigkeit	km/h	23,6		16	11,4	3,9	

Tabelle 13: Personenverkehr, Berlin innerer und äußere Stadt

Der Vergleich der Verkehrsleistungen zeigt, dass in der inneren Stadt der Anteil des MIV zugunsten des ÖV gering ist. Zurückgeführt wird das auf das sehr gute ÖPNV-Angebot in Verbindung mit den Restriktionen des MIV in der inneren Stadt, während die geringere ÖPNV Verfügbarkeit in der äußeren Stadt den eigenen Pkw erfordert.

Die Dreiecksdiagramme bilden die Konkurrenzbeziehungen der Verkehrsmittel MIV, ÖPNV, Fahrrad in Abhängigkeit der Wegelänge ab. Für die Wegelängen bis 15km wird das Fahrrad genutzt. In diesem Entfernungsbereich beträgt der Verkehrsanteil des MIV ca. 25% in der inneren und 50% in der äußeren Stadt. Der Anteil des ÖPNV wächst von nahe 0% auf etwa 70% in der inneren und auf 50% in der äußeren Stadt, entsprechend sinkt der Fahrradanteil. Die vergleichsweise schwache Position des ÖPNV bei kleinen Wegelängen kann mit dem Wegezweck, der uneingeschränkten Verfügbarkeit des eigenen Pkw und Fahrrades gegenüber dem haltstellen- und fahrplangebundenen ÖPNV und seinen überproportionalen Kosten (Einzelfahrschein) im Nahbereich erklärt werden.

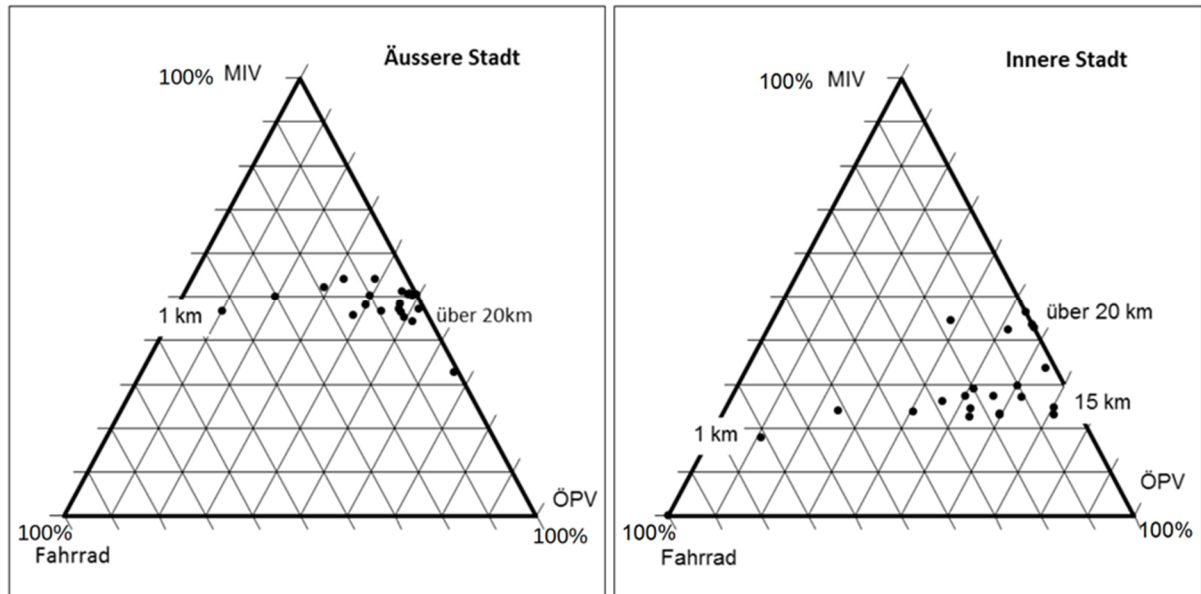


Abbildung 76: Modalsplit MIV, ÖPNV, Fahrrad nach Fahrtlänge; äussere Stadt, SrV 2013

Abbildung 77: Modalsplit MIV, ÖPNV, Fahrrad nach Fahrtlänge; innere Stadt, SrV 2013

4.3.2 Mobilitätsangebote im urbanen Personenverkehrsmarkt

4.3.2.1 Datengrundlage, AVF-Fahrzeuge, Kosten, Personenverkehr

Kostenvereinbarung

Vereinbarung für e-Fahrzeuge im Personenverkehr:

Alle Fahrzeugdaten basieren auf der ADAC-Autodatenbank 2019/2020

Die Fahrzeugpreise bleiben auf dem heutigen Niveau, da die Einsparungen durch technischen Fortschritt und Großserienfertigung der e-Autos die die Kosten der Automatisierung decken. Der technische Fortschritt in der Automatisierungstechnologie zeichnet sich ab: DJI gibt an, LiDAR-Sensoren für 800€ und 1350€ anbieten zu können. Die heutigen Preise liegen über 75.000€ und sind damit wesentlicher Kostentreiber.

Die AVF-Fahrzeuge haben alle heutigen Pkw-Aggregate und Energiebedarfe, Laden einmal täglich.

Es gibt einen Gebrauchtwagenmarkt, so dass die ADAC-Annahmen mit den entsprechenden Restwerten gelten.

Die ADAC-Kostenrechnung enthält entsprechend der privaten Nutzung die Mehrwertsteuern. Für die hier zu ermittelnden Potentiale sind Kosten/Preise der Endnutzer maßgeblich, also einschließlich aller Mehrwertsteuern. Deshalb gehen alle Kostenelemente (z.B. Fahrzeugkosten) mit Mehrwertsteuer in die Rechnung ein.

Die Kosten der Mobilitätsdienstleistungen umfasst neben den Fahrzeugkosten das Management (einschl. Hotline), Pflege- und Reinigungskosten der Fahrzeuge. [Axhausen gibt an ca. 14 CHF Overheadkosten pro Fahrzeugtag und 10 CHF Betriebskosten pro Fahrzeugtag, ohne Reinigung von 2 bis 5 CHF/100km]

PAVE

Overheadkosten einschließlich Reinigungskosten u. MwSt, ohne Unterstellung/Garage: 7244,72 €/a bzw. 603,72 €/mon. Als Overheadkosten wurden die Fuhrparkverwaltungskosten für Transporter mit 5588€/a nach lastauto omnibus angenommen und 500€/a Personalkosten für Reinigung.

AVF-Fahrzeuge, Kosten, Personenverkehr

Privat genutzt: VW e-Golf, Haltedauer 60 Monate, 31900€, 5 Plätze.

Der Golf gilt als Mittelklasse-Fahrzeug und entspricht mit seinem Preis dem durchschnittlichen Neuwagenpreis von 30.000 bis 33.000 € für 2018 in Deutschland, wie z.B. von DAT, CAR-Center Automotive Research, Autogazette, Statista angegeben.

Gewerblich genutzt für Robotaxi, Ridesharing: Nissan e-NV200 Evalia (40 kWh) (inkl. Batterie), Haltedauer 60 Monate, 43.433€, bis 7 Plätze

Rabatte für Flottenkunden 25% *), entsprechende Kostenreduktion der fixen und variablen Kosten

*) Die Rabattierung betrifft die Kosten der Anschaffung, Wartung, Reparaturen, Verschleißteile, Energie (Großabnehmer)

Fahrzeugübersicht, Pkw	Kaufpreis €	WLTP kWh/ 100km	NEFZ kWh/ 100km	Plätze	Kosten					
					36 Monate		48 Monate		60 Monate	
					Fix	Variabel	Fix	Variabel	Fix	Variabel
					€/Monat	€/km	€/Monat	€/km	€/Monat	€/km
VW e-up! Flottenrabatt Einschließlich Overhead	21975	14,5		4	323	0,133	296,5	0,124	287	0,112
									215,25	0,084
									818,98	
VW e-Golf	31900	15,8	13,2	5	438,5	0,181	403,5	0,164	387	0,151
Nissan e-NV200 Evalia (40 kWh) (inkl. Batt)	43433	25,9		5 max 7	593,4	0,242	553	0,217	515,3	0,199
Flottenrabatt									386,48	0,149
Einschließlich Overhead									990,2	

Tabelle 14: Ausgewählte Fahrzeuge für Robotaxi, Pkw privat, Ridesharing
[Daten nach ADAC-Autodatenbank 2019/2020]

Der ausgewählte Nissan e-NV200 für Robotaxi, Ridesharing ist mit einer max. Kapazität von 7 Sitzplätzen für die meisten Fahrten zu groß dimensioniert. Sinnvoll scheint eine Flotte bestehend aus e-NV200 für Gruppenfahrten bzw. Sammelfahrten und der e-Up! für Einzelfahrten. Allerdings könnte der e-Up! für den anspruchsvollen Einsatz zu fragil sein, so dass ein robusteres und damit teureres Fahrzeug geeigneter ist. Deshalb wird der e-NV200 - hier seine Kosten - ausgewählt für die Anwendung Robotaxi und Ridesharing.

4.3.2.2 Abschätzung auskömmlicher Preise/ Fahrkosten

Zur Erzielung kostendeckender Einnahmen können verschiedene Preispolitiken verfolgt werden. Dazu sind folgende Kosteninformationen erforderlich:

1. Alle Kosten werden auf die Bezugsgröße „km Beförderungsstrecke“ umgelegt
2. Die Kosten werden „verursachungsgerecht“ einer Fahrt und „km Beförderungsstrecke“ als Bezugsgrößen zugerechnet. Der Sockelbetrag kann alle einer Fahrt zurechenbaren Fixkosten enthalten, das sind die Fahrzeugfixkosten geteilt durch die Anzahl der Fahrten und die Leerfahrt zum Startpunkt der Fahrt, hier der pauschale Leerfahrtenanteil bezogen auf die Lastfahrt. Die variablen Kosten sind die variablen Fahrzeugkosten.

PAVE

3. Die in einem Zeitraum erwarteten Beförderungskosten eines Nutzers werden abgeschätzt und pauschal erhoben (flatrate, Zeitkarte). (SrV 2013 Berlin [Tab. 6.1 ff] Wegehäufigkeit der Personen 3,6 Wege/d, [Tab. 1.1] 21 km/d)

Die unten angegebenen Preise decken die Kosten für 30 Fahrten/d und einer Tagesfahrleistung von ca. 200 km, Fahrzeug e-NV200.

Robotaxi

1. km-Preis			0,36€/km
2. Sockel+km-Preis	1,20€	+	0,15€/km

Ridesharing

1. km-Preis			0,21€/km
2. Sockel+km-Preis	0,80€	+	0,08€/km

Privat-Pkw 15.000km/a

1. km-Preis			0,46€/km
2. Fix+variable Kosten	12,90€/d	+	0,15€/km

ÖPV

1. BVG Jahresabo 6000km/a			
2. AB	728€		0,121 €/km
3. BC	807€		0,135 €/km
4. ABC	978€		0,163 €/km

Fahrrad

1. km-Preis			0,08€/km
-------------	--	--	----------

Die Betriebskosten eines Fahrrades werden von *Goessling* (ohne Jahr) mit 0,052€/km angegeben. Andere private Kostenangaben reichen einschließlich Kleidung und Services bis 0,11€/km.

4.3.2.3 Grenzkostenbetrachtungen zur Beschreibung der Mobilitätsangebote

SÖNKE ALBERS [Abhängigkeit des Modal-Split im Öffentlichen Personennahverkehr von der Kundenzufriedenheit] stellte bereits 2003 fest

„daß die Verkehrsmittelwahl in starkem Maße davon abhängig ist, ob für den Weg ein Auto zur Verfügung stand, welcher Anlass bestand und welche harten ökonomischen Faktoren, wie Fahrtzeit und Fahrtkosten zwischen den beiden Alternativen bestanden. Im Ergebnis kann man feststellen, daß diese Faktoren die Verkehrsmittelwahl in deutlich stärkerem Maße beeinflussen als die weichen Faktoren der Kundenzufriedenheit.“

Im Folgenden werden deshalb Fahrtzeit und Fahrtkosten gewählt, um die Zusammenhänge im urbanen Personenverkehr zu beschreiben. Dazu geeignet ist das Fahrtkosten – Fahrtzeit – Diagramm, bei dem auf der Ordinate die relativen Fahrtkosten [€/km] und auf der Abszisse die relative Fahrtzeit [h/km] aufgetragen ist.

Die Positionierung der Mobilitätsangebote im Fahrtkosten-Fahrtzeit-Diagramm zeigt, dass der eigene Pkw auch in der inneren Stadt mit gutem ÖPNV Angebot die geringsten Fahrtzeiten und kaum höhere

PAVE

Kosten als der ÖPNV hat, wenn nur die variablen Pkw-Kosten entscheidungsrelevant sind (Punkt MIV Var. Kost im Diagramm). Das gibt die Situation eines Fahrzeugbesitzers wieder, der einen Pkw, aus welchen Gründen auch immer, besitzt und für die urbane Nutzung nur die variablen Kosten in seine Entscheidung über die Mobilitätswahl einbezieht. Die heutigen (2018) Mobilitätsdienste haben wegen ihres Overheads natürlich höhere Kosten als die variablen Kosten der selbst erstellten Mobilität mit dem Pkw. Dazu kommt bei den heutigen Carsharingdiensten die Ineffizienz durch die zu geringen Flottengrößen. Sie sind maßgeblich dafür, dass mit free-floating-Carsharing heute „kein Geld zu verdienen ist“

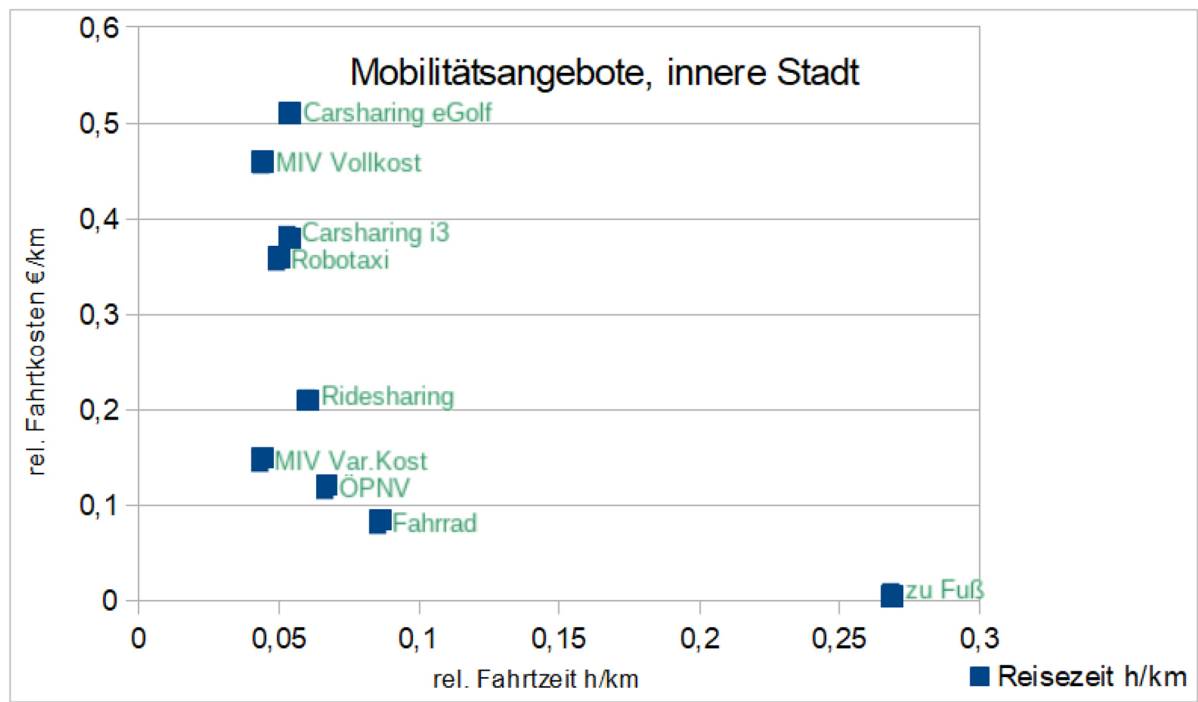


Abbildung 78: Mobilitätsangebote, Übersicht innere Stadt 2018, Preis-Zeit Diagramm

Die „Mobilitätsangebote“ zu Fuß, Fahrrad und ÖPNV gelten als inferiore Güter. Bei steigendem Einkommen verändert sich die Nachfrage von zu Fuß auf Fahrrad auf ÖPNV auf MIV. Diese Entwicklung hat zu dem heutigen Modal split im urbanen Personenverkehr geführt und ist das Ergebnis des individuellen optimalen Mobilitätsverhaltens. Die Veränderungen durch Wertewandel und veränderter Rahmenbedingungen wie COVID-19, e-Bike werden hier nicht einbezogen. Vielmehr bezieht sich diese Untersuchung nur auf den Einfluss der AVF-Technologie auf die Mobilitätsangebotspalette.

Im Preis Zeit Diagramm sind MIV, ÖPNV, Fahrrad und zu Fuß entsprechend ihren Fahrtkosten und Fahrtzeiten eingetragen. Nähert man die Kosten-Zeit Positionen der heutigen Mobilitätsangebote mit einer Trendlinie an, dann ergeben sich Grenzkosten als Steigung der Trendlinie. Die Grenzkosten geben die zusätzlich anfallenden Kosten an, wenn die „Produktion um Einheit“ ausgedehnt wird. Ökonomisch bedeuten hier die Grenzkosten, wieviel einem Nutzer die Einsparung einer Zeiteinheit wert ist (Opportunitätskosten).

PAVE

4.3.2.3.1 Grenzkosten innere Stadt

In

Abbildung 79 ist der MIV mit seinen Vollkosten bewertet, also allen Kosten, die mit dem Erwerb und Betrieb eines Fahrzeuges anfallen.

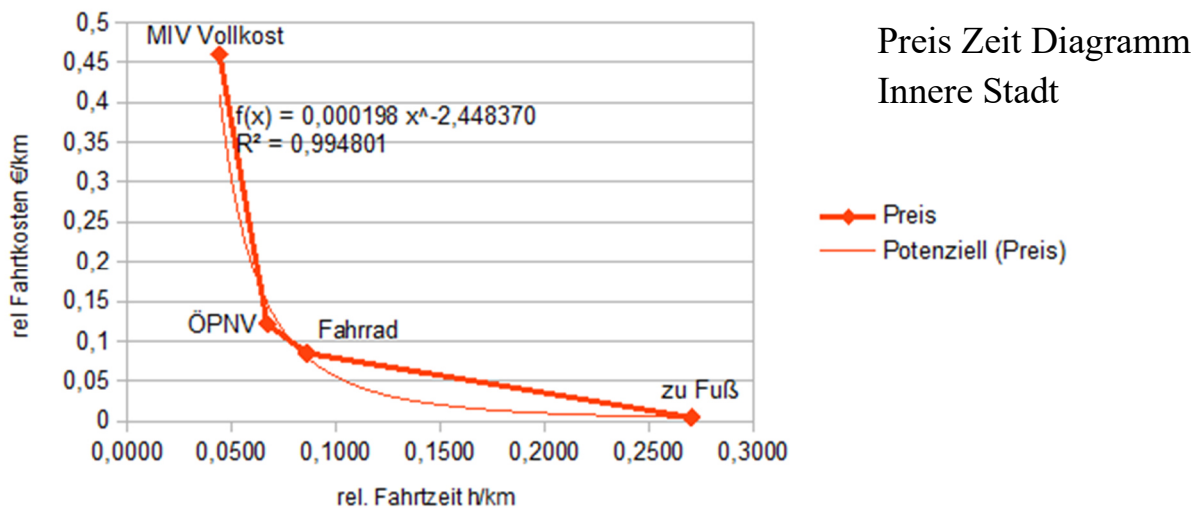


Abbildung 79 : Mobilitätsangebote MIV, ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß innere Stadt, Preis-Zeit Diagramm [SrV 2013]

Die Grenzkosten von 22,69 €/h des MIV entsprechen dem durchschnittlichen Stundenlohn in Berlin (2018: 21,64€). Die durchschnittliche Grenzkosten im urbanen Verkehr betragen 12,25 €/h. Diese Bewertung einer Stunde Fahrzeit entspricht den Literaturangaben von 12 €/h [z.B.Axhausen].

Einführung neuer AVF- Dienste in den urbanen Verkehr

Die Einfügung der Mobilitätsalternativen Robotaxi und Ridesharing führt zu geringen Veränderungen der bisherigen Trendlinie und Grenzkosten. Die Werte im Diagramm geben die Kosten für einen durchschnittlichen Pkw mit einem Fahrer, einen Robotaxipassagier und den „Einzelpreis“ im Ridesharing an.

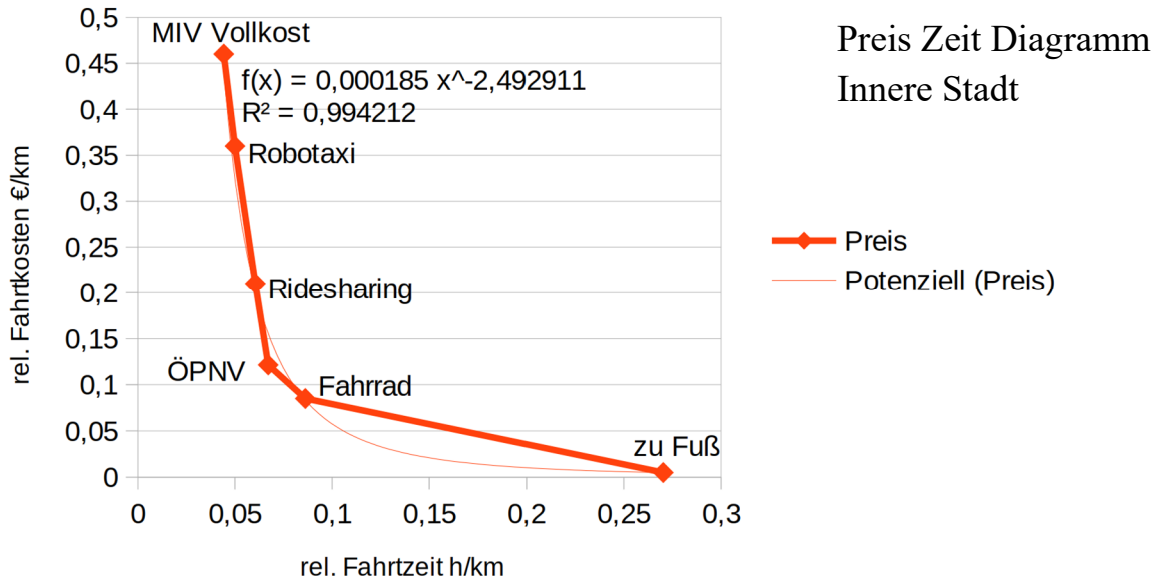


Abbildung 80: Mobilitätsangebote MIV, ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß innere Stadt, Preis-Zeit Diagramm [SrV 2013] mit Robotaxi und Ridesharing

Oben wurden die Grenzkosten/Opportunitätskosten auf Basis der Fahrtkosten so berechnet, als ob nur eine Person im Fahrzeug des MIV oder Robotaxi sitzt. Durchschnittlich ist der Besetzungsgrad im MIV aber 1,3 Personen. Im Folgenden werden die Kosten entsprechend angepasst:

- $MIV_{1,3} = MIV \text{ Kosten} / 1,3$
- $Robotaxi_{1,3} = Robotaxi / 1,3$, da das Robotaxi wie ein privater Pkw genutzt werden kann
- $Ridesharing = Ridesharing / 1,3$, da für Mitfahrer eine Ermäßigung gewährt wird.

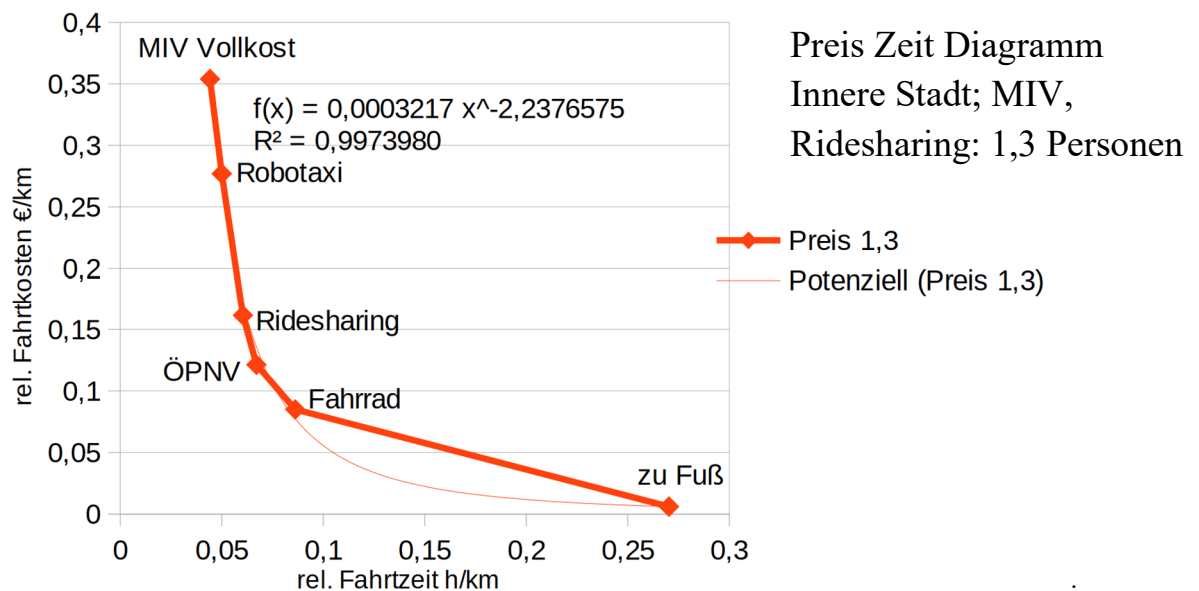


Abbildung 81: Mobilitätsangebote MIV, ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß innere Stadt, Preis-Zeit Diagramm [SrV 2013] mit Robotaxi und Ridesharing, Kosten für Besetzungsgrad 1,3

Damit entspricht das Kalkül mehr der Realität, da die Verkehrsleistung in Personen-km keine Unterscheidung zwischen Fahrer und Mitfahrer macht.

PAVE

Die durchschnittlichen Grenzkosten betragen 9,81 €/h.

Die Frage ist, wie sich die heutige Verkehrsmittelteilung durch die zwei neuen OnDemand Services verändern könnte.

Die Grenzkostenkurven zeigen, dass sich die heutigen Verkehrsmittel in ihren Grenzkosten (und auch sonstigen Eigenschaften) erheblich unterscheiden. Robotaxi und Ridesharing liegen mit ihren Grenzkosten zwischen MIV und ÖPNV. Deshalb ist die Nutzung von Robotaxi und Ridesharing für den MIV-Nutzer fast nutzenneutral. Er wählt die Alternative, die ihm in der augenblicklichen Situation (Wegezzweck) einen Vorteil verspricht. Die Verkehrsteilung würde sich geringfügig ändern durch sporadische Nutzung der Robotaxi und Ridesharingdienste durch den MIV Fahrer. Für den ÖPNV- und Fahrrad-Nutzer scheint das Ridesharing und sogar Robotaxi als „Aufstieg“ in erreichbarer Nähe zu liegen – mit niedrigeren Grenzkosten als denen des MIV entsprechend der Trendlinie. Ridesharing erfordert gegenüber dem ÖPNV 33% höhere Kosten und könnte für so ein attraktives Angebot für ÖPNV-Nutzer sein.

Die Verkehrsteilung änderte sich durch Wanderungen vom ÖV/ Fahrrad zum Ridesharing

4.3.2.3.2 Grenzkosten äußere Stadt

Die Mobilitätsangebote in der äußeren Stadt unterscheiden sich nicht wesentlich von denen der inneren Stadt. Für die äußere Stadt ergeben sich höhere Grenzkosten, d.h. die Bewohner bewerten eine Einsparung einer Einheit ihrer Mobilitätszeit höher als die Bewohner der inneren Stadt.

äußere Stadt					
	MIV Vollkost	ÖPNV	Fahrrad	zu Fuß	Durchsch.
rel. Fahrtzeit	0,0424	0,0625	0,0877	0,2564	
rel. Fahrtkosten	0,46	0,163	0,085	0,005	
Grenzkosten €/h	27,43	7,04	2,15	0,05	18,67

Tabelle 15: Mobilitätsangebote MIV, ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß äußer Stadt, Preis-Zeit Diagramm [SrV 2013]

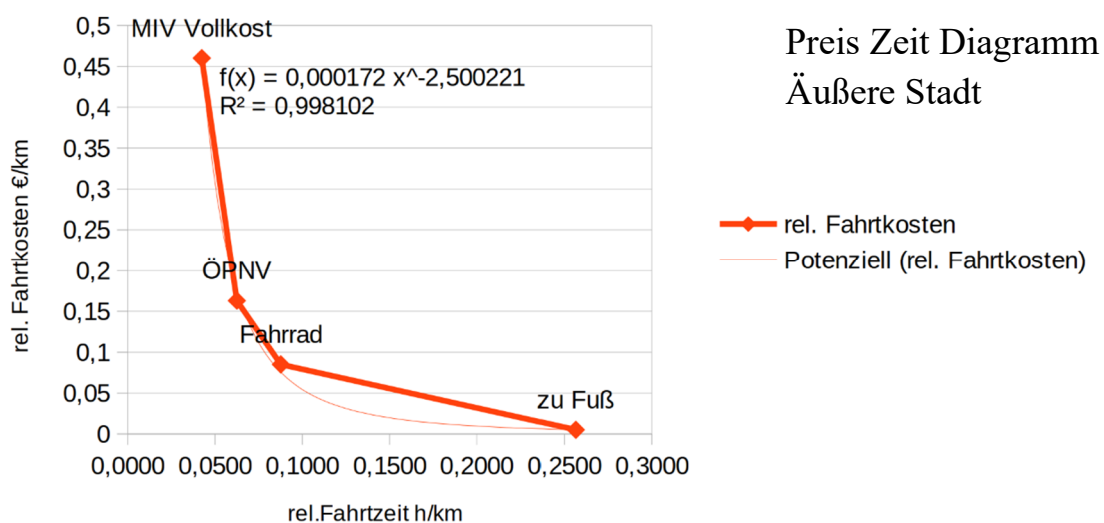


Abbildung 82: Mobilitätsangebote MIV, ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß äußer Stadt, Preis-Zeit Diagramm [SrV 2013]

PAVE

Der Besetzungsgrad von 1,3 verringert die Grenzkosten für den einzelnen Nutzer.

äußere Stadt 1,3 Besetzungsgrad					
	MIV Vollkost 1,3	ÖPNV	Fahrrad	zu Fuß	Durchsch.
rel. Fahrtzeit	0,0424	0,0625	0,0877	0,2564	
rel. Fahrtkosten	0,3538	0,1630	0,0850	0,0070	
Grenzkosten €/h	19,60	5,67	1,92	0,06	13,56

Tabelle 16: Mobilitätsangebote MIV, ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß äussere Stadt, Preis-Zeit Diagramm [SrV 2013], Kosten für Besetzungsgrad 1,3

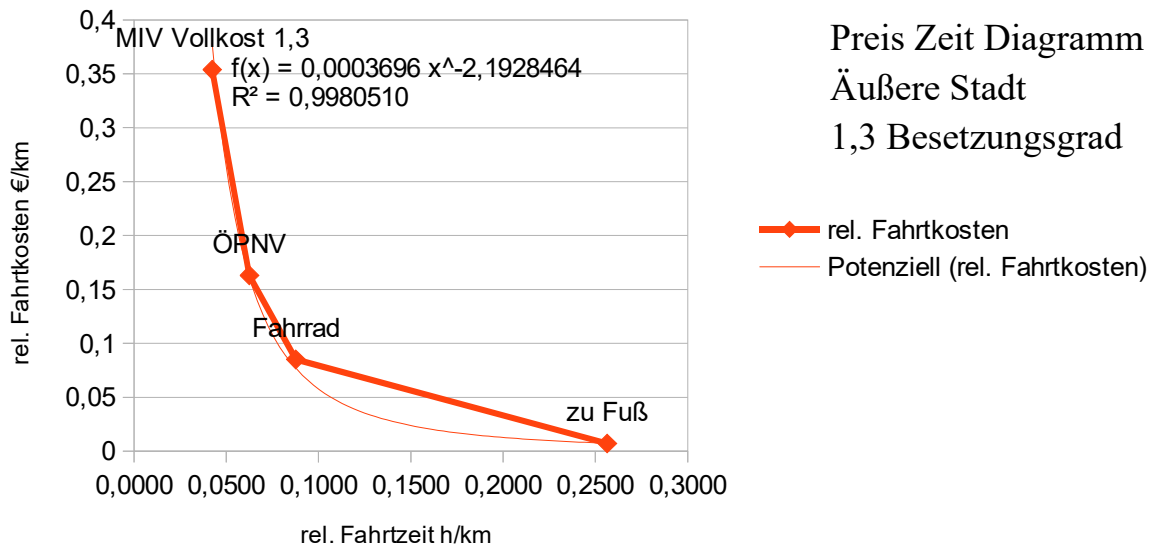


Abbildung 83: Mobilitätsangebote MIV, ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß äussere Stadt, Preis-Zeit Diagramm [SrV 2013], Kosten für Besetzungsgrad 1,3

Das Angebot neuer On Demand Dienste in der äußeren Stadt trifft auf eine schwache Präsenz des ÖPNV. Die ÖPNV Preise sind zudem höher als in den Innenbereichszonen (34 % Jahresabo), die Preise der AVF-Dienste sind im gesamten Stadtgebiet gleich angenommen. Damit stehen ÖPNV und Ridesharing im direkten Wettbewerb. Ridesharing hätte in dieser Marktpositionierung das Vermögen, große Anteile des ÖPNV auf sich zu ziehen und sogar eine Alternative für das Fahrrad zu sein.

äußere Stadt 1,3 Besetzungsgrad						
	MIV Vollkost 1,3	Robotaxi 1,3	Ridesharing 1,3	ÖPNV	Fahrrad	zu Fuß
rel. Fahrtzeit	0,04237	0,04775	0,05782	0,06250	0,08772	0,25641
rel. Fahrtkosten	0,35385	0,27692	0,16154	0,16300	0,08500	0,00700
Grenzkosten €/h	18,33	12,56	6,86	5,36	1,83	0,06

Tabelle 17: Mobilitätsangebote MIV, ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß äussere Stadt, Preis-Zeit Diagramm [SrV 2013] mit Robotaxi und Ridesharing, Kosten für Besetzungsgrad 1,3

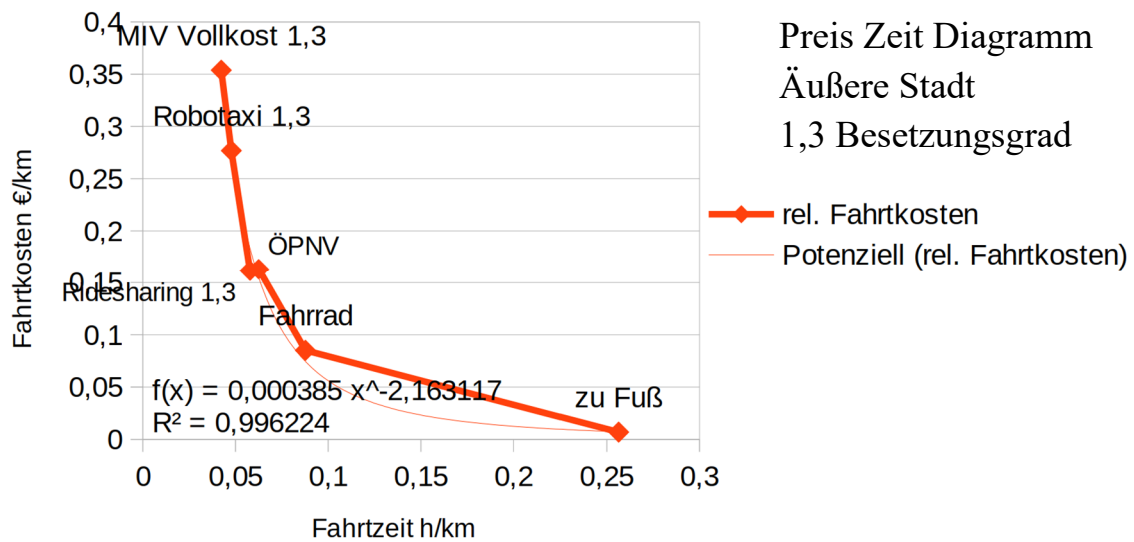


Abbildung 84: Mobilitätsangebote MIV, ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß äussere Stadt, Preis-Zeit Diagramm [SrV 2013] mit Robotaxi und Ridesharing, Kosten für Besetzungsgrad 1,3

4.3.2.3.3 Betrachtung der Fahrpreissenkung des ÖPNV durch Automatisierung

Durch den Wegfall der Personalkosten und des Arbeitszeitgesetzes (Lenk- und Ruhezeiten) ergeben sich Spielräume für die Angebots- und Flottenoptimierung. Tendenziell wird die Flotte kleiner und ihre Struktur (Fahrzeuggrößen) kann den Anforderungen anders als heute angepasst werden. Der ÖPNV ist ganz wesentlich durch die verkehrs-, finanz- und sozialpolitischen Vorgaben gestaltet und geprägt. Zumindest ein Teil der zu erwartenden Kosteneinsparungen kann zur Verringerung des Subventionsbedarfs des ÖPNV verwendet werden.

Nach dem Geschäftsbericht/GuV der BVG (Konzern) ist der Anteil der Fahrer am Gesamtpersonal ca. 46%, am Personalaufwand ca. 20% der Umsatzerlöse (einschließlich Ausgleichszahlungen Verkehrsvertrag u. Einnahmeausfälle). Einschließlich der Einsparung von 50% Verwaltungskosten ergeben sich Einsparungen von 24% der Umsatzerlöse (Annahme 50% der Verwaltungskosten sind entfallene Personalverwaltungskosten). Wird die Flotte und das Mobilitätsangebot wie bisher beibehalten, ebenso wie die Subventionierung wie heute entsprechend der politischen Zielsetzung der ÖPNV-Förderung, kann diese Einsparung an die Kunden weitergegeben werden, also 24% Preisreduktion auf alle ÖV-Fahrscheine.

äußere Stadt 1,3 Besetzungsgrad, ÖPNV automatisiert						
	MIV Vollkost 1,3	Robotaxi 1,3	Ridesharing 1,3	ÖPNV	Fahrrad	zu Fuß
rel. Fahrtzeit	0,0424	0,0478	0,0578	0,0625	0,0877	0,2564
rel. Fahrtkosten	0,3538	0,2769	0,1615	0,1239	0,0850	0,0070
Grenzkosten €/h	17,12	11,76	6,45	5,05	1,74	0,06

Tabelle 18: Mobilitätsangebote MIV, AUTOMATISIERTER ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß
 äussere Stadt, Preis-Zeit Diagramm [SrV 2013] mit Robotaxi und Ridesharing, Kosten für
 Besetzungsgrad 1,3

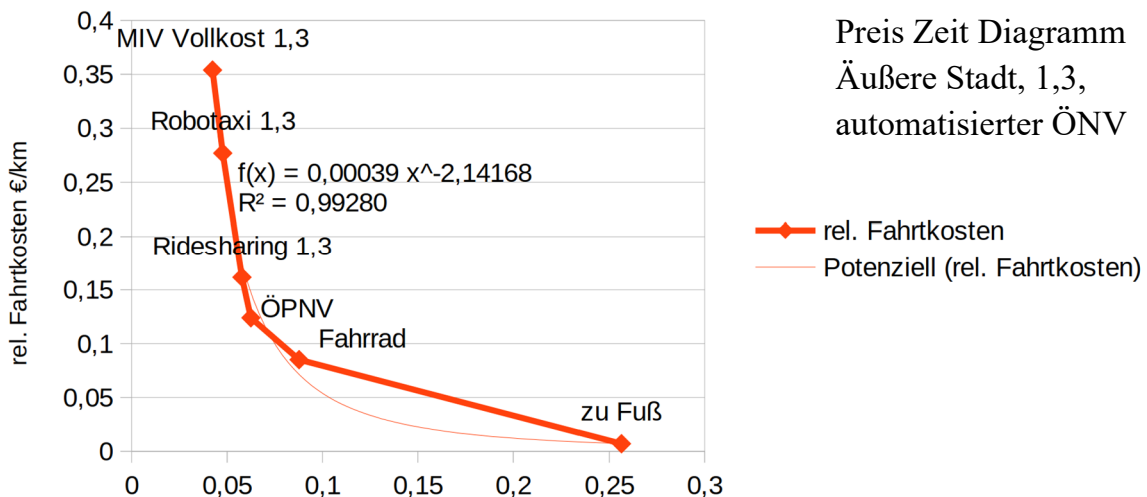


Abbildung 85: Mobilitätsangebote MIV, AUTOMATISIERTER ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß
 äussere Stadt, Preis-Zeit Diagramm [SrV 2013] mit Robotaxi und Ridesharing,
 Kosten für Besetzungsgrad 1,3

Die Verringerung der ÖPNV Fahrpreise entsprechend der Automatisierungseffekte verändert den Trendlinienverlauf nur geringfügig, auch die Grenzkosten erfahren durch die Glättung der Trendkurve nur wenig Veränderungen. Die Fahrtkosten des ÖPNV liegen aber nun unter denen des Ridesharing (30 %), so dass Ridesharing und ÖPNV nicht in unmittelbarer Konkurrenz stehen.

4.3.2.3.3 Zusammenfassung Grenzkostenbetrachtung

Die heutigen urbanen Mobilitätsangebote MIV, ÖPNV, Fahrrad, (zu Fuß) haben stark unterschiedliche Grenzkosten, wenn man sie im Zeit-Kosten-Diagramm einträgt. Die sich ergebende Grenzkostenkurve zeigt, ob ein neues Angebot vorteilhaft ist. Liegt es unterhalb der heutigen Grenzkosten, hat es gegenüber den heutigen Angeboten einen höheren Nutzen, liegt es darüber, ist das neue Angebot nicht vorteilhaft.

Die neuen Technologien Digitalisierung, E-Mobility und AVF erhöhen den Wettbewerb und die Vielfalt des Mobilitätsangebotes. Die AVF-Technologien heben die Mobilitätsangebote auf ein neues Niveau. Der MIV wird attraktiver, der ÖPNV attraktiver und kostengünstiger. Fahrerlose Taxen und Shuttles ergänzen als Robotaxi und Ridesharing das Angebot und liegen in Fahrtzeiten und Fahrtkosten zwischen MIV und ÖPNV. Zusätzlich entstehen unterhalb des ÖPNV neue Mobilitätsangebote mit dem Elektrofahrrad und e-Scooter.

PAVE

Das Ende der Grenzkostenkurve der urbanen Mobilitätsangebote ist heute durch den MIV gegeben. Eine Angebotsenerweiterung zu höheren Grenzkosten - mit geringen Marktanteilen - ist das Ziel der Flug- oder Lufttaxis.

4.3.2.4 Mobilitätsnachfrage im urbanen Personenverkehrsmarkt

Befragung PAVE

4.3.2.4.1 Input zur Potentialabschätzung AVF-Personenverkehr

In PAVE wurden umfangreiche Interviews, Workshops und Befragungen durchgeführt, die die Einstellungen zur Mobilität, das bisherige Mobilitätsverhalten und die Nutzungsbereitschaft von neuen AVF- Mobilitätsangeboten umfassten. Diese empirischen Daten wurden mit soziodemo-graphischen Kenngrößen zur Bevölkerungsstruktur und den repräsentativ erhobenen Daten der MiD und SrV abgeglichen. Dies sind insbesondere die Ergebnisse aus den „Forschungsprojekt Mobilität in Städten - SrV 2013“ und SrV 2017, „Mobilität in Deutschland – MiD 2013“ und MiD 2017, „Mobilität in Brandenburg und Berlin Integrierte Auswertung MiD und SrV 2008“, 2010 und der „Gesamtverkehrsprognose 2025 für die Länder Berlin und Brandenburg“, 2009.

Unterschiede in den folgenden Rechnungen gehen auf diese unterschiedliche Datenbasen zurück.

Der „0-Fall“ ist die Datenbasis, auf die sich die Potentialabschätzungen der AVF- Angebote, die Szenarien 2037 und die Wirkungen einer Citymaut beziehen. Wesentliche Größen zur Beschreibung der Mobilität und des Verkehrs sind die Wege der Personen - Verkehrsaufkommen – und die Verkehrsmittelwahl – ModalSplit. Das Basisjahr 2013 wurde gewählt, weil hier zu Projektbeginn die Daten weitgehend vorlagen und die SrV Daten für Berlin für die innere (Hundekopf) und äußere Stadt ausgewiesen wurden.

Das Potential der AVF-Mobilitätsdienste wird in diesen Untersuchungen als ein zusätzliches Angebot behandelt, das im Wettbewerb zu den bestehenden Mobilitätsangeboten zu Fuß, Fahrrad, ÖPNV und Pkw einschließlich Mitfahrer steht. Die AVF-Technologie erhöht die Vielfalt und Qualität der Mobilitätsangebote und kann so zu einer Steigerung der Nachfrage führen, also einen zusätzlichen Verkehr induzieren. Hier gehen wir aber von einer konstanten Nachfrage aus, die Angebote der bisherigen Verkehrsträger bleiben in ihren Leistungen und Kosten bestehen.

4.3.2.4.2 AVF Nachfrage im 0-Fall

In der PAVE-Befragung wurde die übliche Nutzungshäufigkeit der verfügbaren Verkehrsarten und die vermutete Nutzungshäufigkeit der AVF-Angebote abgefragt, wobei die Fragen an die Systematik der MiD- Erhebungen angelehnt waren. Hier wird erfragt, wie häufig verschiedene Verkehrsmittel üblicherweise genutzt werden (siehe auch Abbildung 86). Damit können Nutzungsgewohnheiten und -muster der Personen identifiziert werden, die mit einer reinen Betrachtung des Verkehrsaufkommens und der Verkehrsleistung nicht beschreibbar sind. Die Nutzungshäufigkeit kann als die Wahrscheinlichkeit der Nutzung an einem Tag – tägliche Nutzung – interpretiert werden. Die Summe der genannten täglichen Nutzungen, der Wahrscheinlichkeiten, kann dabei größer als eins sein, anders als bei der Erfassung der täglichen Wege mit einem Wegetagebuch in einer Stichtagsbefragung.

Zur Potentialabschätzung wurde die vermutete Nutzungshäufigkeit der AVF-Angebote abgefragt. In der Tabelle 19 sind Nutzungshäufigkeiten von Robotaxi und Sammeltaxi für die gefundenen Mobilitätstypen abgeschätzt. Die Mobilitätstypen differenzieren sehr gut nach der AVF-Affinität.

PAVE

Liberale, Sensationsecker und technikaffin Umweltbewußte repräsentieren ca. 55% der Grundgesamtheit und stellen über 90% der täglichen AVF-Dienstenutzer.

Dagegen ist bei Segmentierung nach der üblichen Nutzung und der Kombination der Verkehrsmittel – Modalgruppen – keine Differenzierung erkennbar (MiD Systematik).

PAVE Befragung			
Modalgruppen [MiD]		Vermutung persönliche Nutzungshäufigkeit:	
TÄGLICHE Nutzung	Modalgruppen Anteil an GG	Ridesharing Anteil an Modalgruppen	Robotaxi Anteil an Modalgruppen
	%	%	%
Auto	21,04	4,90	4,89
Auto und Rad	8,33	3,81	6,61
Auto und ÖV	17,24	4,06	5,50
ÖV	18,94	3,26	3,78
Auto, ÖV und Rad	16,05	5,04	6,86
Rad und ÖV	11,53	3,65	5,10
Fahrrad	4,29	2,07	4,35
Wenig Mobilen	2,58	4,60	2,59
	100,00		
Mobilitätstyp [PAVE]		Vermutung persönliche Nutzungshäufigkeit:	
TÄGLICHE Nutzung	Mobilitätstypen Anteil an GG	Ridesharing Anteil an Mobilitätstyp	Robotaxi Anteil an Mobilitätstyp
	%	%	%
Konservative	14,08	1,18	1,54
Liberale	11,14	10,60	11,98
Technikaffin umweltbewu	20,02	5,24	5,49
Technikskeptisch umwelt	11,16	0,97	0,79
Sensationsecker	24,32	6,08	9,64
Preissensitiv	19,28	0,63	0,99
	100,00		

Tabelle 19: Robotaxi und Ridesharing, Anteil an Modalgruppen und Mobilitätstypen

Der Modalsplit aus der Befragung stimmt gut mit dem der SrV überein. Für Berlin gesamt teilen sich die Nutzungen etwa zu gleichen Anteilen auf Robotaxi und Sammeltaxi auf. Damit verändert sich der Modal Split für Berlin gesamt (PAVE Befragung).

MODALSPLIT			
	Ohne	Mit TAXI	
	%	%	Strassenverk. %
Pkw +Mitfahrer	26,69	23,55	23,55
Davon Pkw	20,12	18,45	
Davon Mitfahrer	6,57	5,11	
ÖV	26,10	23,95	
Fahrrad	13,25	11,68	
zu Fuß	33,96	31,45	
ROBOTaxi		5,27	5,27
Sammeltaxi		4,10 %	2,05 %
Summe	100,00 %	100,00 %	30,88 %
Diff. Mit-ohne			4,18 %

Tabelle 20: Modal-Split ohne und mit AVF-Diensten, PAVE

PAVE

In der Abschätzung in Tabelle 20 gewinnen Robotaxi und Sammeltaxi von allen Mobilitätsanbietern Anteile. Diese Verluste des Umweltverbundes führen zu mehr Straßenverkehr, hier in einer Größenordnung von etwa 4% (Besetzungsgrad Robotaxi =2).

In der Befragung haben die Befragten die vermutete Nutzungshäufigkeit getrennt für Robotaxi und für Sammeltaxi angegeben. Dies ergibt die AVF-Anteile in der Tabelle 20 MODAL SPLIT oben. Betrachtet man die Antworten für Robotaxi und für Sammeltaxi gemeinsam, lassen sich vier Quadranten bilden: ob die Probanden Robotaxi und Sammeltaxi nutzen, ob sie entweder Robotaxi oder Sammeltaxi nutzen oder ob sie die AVF-Angebote ablehnen.

Die Nutzungsbereitschaft kann in vier Quadranten eingeteilt werden:

- Nutzer mit Affinität für Robotaxi und Sammeltaxi
- Nutzer mit Affinität für Sammeltaxi
- Nutzer mit Affinität für Robotaxi
- Nutzer mit Aversion gegenüber Robotaxi und Sammeltaxi

Tabelle 21 bis Tabelle 23 zeigen die grundsätzliche Akzeptanz der AVF-Angebote (Nutzungsbereitschaft) und die vermutliche tägliche Nutzung.

32% der in PAVE Befragten würden AVF-Dienste nutzen, 68% lehnen das ab. Etwa die Hälfte der affinen Nutzer neigen sowohl zu Robotaxi als auch zu Sammeltaxi, grob ein Viertel nur zu Robotaxi und ein Viertel zu Sammeltaxi.

Abgeleitet aus den Nutzenhäufigkeiten ergeben sich die voraussichtlichen tägliche Nutzungen der AVF-Dienste von insgesamt unter 10%. Auch hier sind die Nutzer von Robotaxi und Sammeltaxi mit etwa 7% die stärkste Gruppe.

PAVE Befragung Alle	Nutzungsbereitschaft		Tägl. Nutzung	
	Personen	%	Personen	%
Sammel+Robo affin	172	17,13	72,41	7,21
Sammel affin	58	5,78	7,69	0,77
Robo affin	91	9,06	13,11	1,31
Sammel+Robo avers	683	68,03	4,70	0,47
Summe	1004	100,00	97,91	9,75

Tabelle 21: AVF-Nutzungsbereitschaft und tägliche Nutzung nach AVF-affin und avers

Deutliche Unterschiede zeigen sich zwischen weiblichen und männlichen Befragten. Während 3/4 der Frauen AVF-Dienste ablehnen, sind das bei den Männern unter 2/3. Noch deutlicher ist der Unterschied bei der täglichen Nutzung, hier wählen die männlichen Befragten doppelt so oft ein Sammel- oder Robotaxi wie die weiblichen.

PAVE Befragung, weiblich	Nutzungsbereitschaft		Tägl. Nutzung	
	Personen	%	Personen	%
Qadrant				
Sammel+Robo affin	60,41	12,07	21,80	4,36
Sammel affin	24,11	4,82	2,37	0,47
Robo affin	40,59	8,11	6,58	1,31
Sammel+Robo avers	375,41	75,00	2,69	0,54
Summe	500,52	100,00	33,45	6,68

Tabelle 22: AVF-Nutzungsbereitschaft und tägliche Nutzung, weiblich

PAVE Befragung, männlich	Nutzungsbereitschaft		Tägl. Nutzung	
	Personen	%	Personen	%
Qadrant				
Sammel+Robo affin	99,87	19,99	46,08	9,22
Sammel affin	33,38	6,68	5,27	1,06
Robo affin	49,1	9,83	7,02	1,41
Sammel+Robo avers	317,24	63,50	2,11	0,42
Summe	499,59	100,00	60,49	12,11

Tabelle 23: AVF-Nutzungsbereitschaft und tägliche Nutzung, männlich

Die Akzeptanz zukünftiger AVF-Dienste ist in der inneren Stadt mit 12,5% deutlich höher als in der äußeren Stadt mit 7,8%. Ebenfalls ist die Bereitschaft den eigenen Pkw abzugeben in der inneren Stadt über doppelt so hoch, wie in der und äußerer Stadt.

AVF-Akzeptanz Innere und äußerer Stadt			
Tägliche Nutzung		Innere Stadt	Äußere Stadt
		%	%
Robotaxi	Anteil GG	7,27	4,26
Sammeltaxi	Anteil GG	5,24	3,53
Summe		12,52	7,79
Zukünftig: Pkw abgeben	Anteil Fzg.Besitzer	20,50	9,60
Citymaut: Pkw abgeben	Anteil Fzg.Besitzer	22,80	9,50

Tabelle 24: AVF-tägliche Nutzung, innere und äußere Stadt, Bereitschaft den eigenen Pkw abzugeben

Die oben erarbeiteten Daten und Zusammenhänge liefern Grundlagen für die weiteren quantitativen Untersuchungen. Die ermittelten Strukturen der Mobilitätsnachfrage sind eine Basis für die Abschätzung einer zukünftigen Nachfrage, die sich auf soziodemografische Entwicklungen stützt.

4.3.2.4.3 Restriktionen im urbanen Personenverkehrsmarkt

Verkehrliche Wirkungen einer Citymaut

Mit der Erhebung einer Citymaut wird die Verringerung des Autoverkehrs in Innenstädten verbunden. Prominente Beispiele sind London (-40% bei einer Gebühr von 10 Pfund, Mautzone 21 km², 200.000 Einwohner) und Stockholm (-20% bei einer Gebühr von 1 bis 10€, Mautzone 34km², 285.000 Einwohner). In Berlin gibt es Überlegungen, mit einer Citymaut den Autoverkehr zu vermeiden oder auf die Angebote des Umweltverbundes zu verlagern. Die Einnahmen sollen wesentlich zur

PAVE

Finanzierung eines verbesserten ÖPNV genutzt werden [Ergänzende Instrumente zur Finanzierung des Berliner ÖPNV Machbarkeitsstudie, 2020]. In der Machbarkeitsstudie wurde der Hundkopf/ Umweltzone als mautpflichtiges Zielgebiet mit 750.000 werktägliche Einfahrten, Pkw und Lkw angenommen. Die Umweltzone ist 88 km² groß und hat über 1 Mio Einwohner.

Die Gestaltung von Mautzone folgt politischen Zielsetzungen und hat ökologische und ökonomische Effekte. Durch die geographische Festlegung der Mautzone und der Preispolitik wird Einzelhandel, Arbeitsmarkt, Immobilienmarkt beeinflusst.

Im Projekt werden nur die verkehrlichen Wirkungen einer Citymaut und die sich daraus ergebenden Potentiale für neue AVF-Mobilitätsangebote abgeschätzt. Dazu wird der Hundkopf/ Umweltzone als Mautzone und 12€ Maut festgelegt. Die Maut gilt für die Einfahrt in die innere Stadt sowohl für die Bewohner der Innenstadt als auch für alle MIV-Fahrer aller Regionen.

Grundlage der Abschätzung ist die PAVE Befragung, mit der mit der die Nutzungshäufigkeiten des Pkw sowie die Reaktionen auf die Maut grob quantifiziert werden kann. Die Nutzungshäufigkeit des MIV in der inneren Stadt ist erkennbar geringer als in der äußeren Stadt.

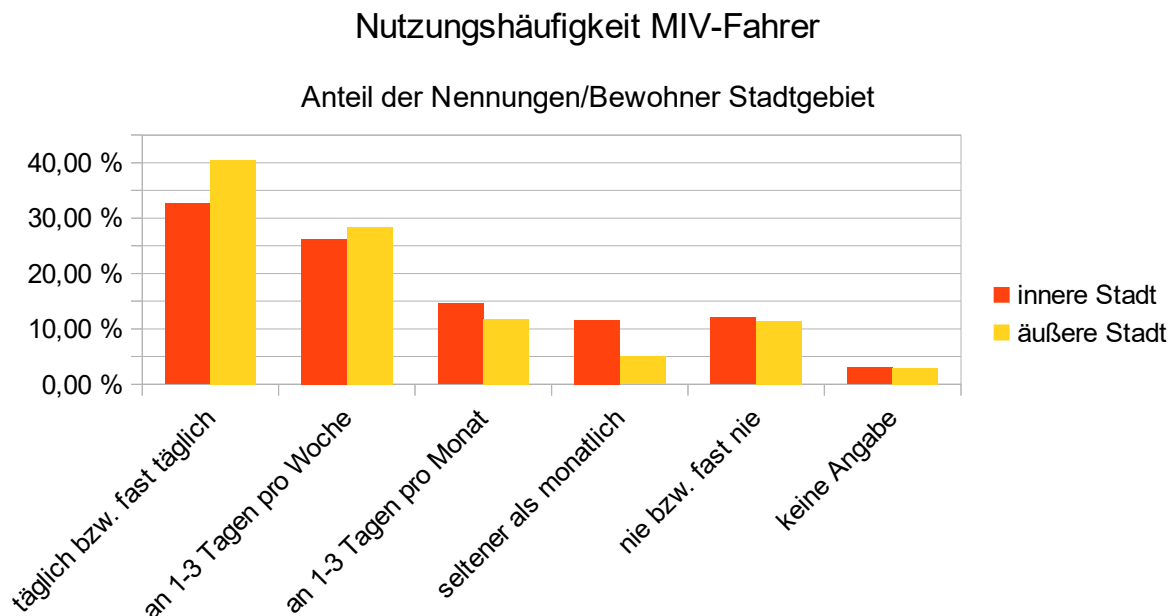


Abbildung 86: Nutzungshäufigkeit Pkw, innere und äußere Stadt

Wenn eine Citymaut von 12€ erhoben würde, würden etwa ein Drittel der Innenstädter aber die Hälfte der Außenstädter ihre Fahrten auf ein Minimum reduzieren. „20% der Innenstädter und 10% der Außenstädter würden überlegen, ihr Auto abzugeben.

Wenn eine Citymaut von 12€ erhoben würde

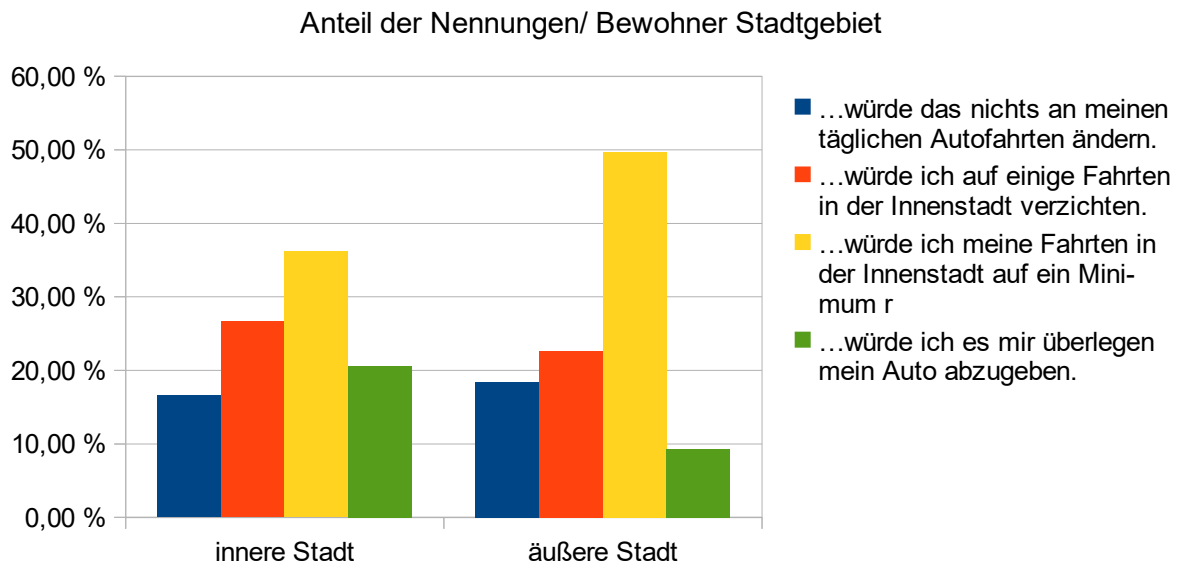


Abbildung 87: Citymaut, Verhaltensänderungen innere und äußere Stadt

Die Nennungen in Abbildung 87 müssen entsprechend der Items quantitativ bewertet werden, um die Teilnahme an dem täglichen Verkehr zu erhalten. In Abbildung 88 ist das Ergebnis der Reduktion angegeben.

Wenn eine Citymaut von 12€ erhoben würde

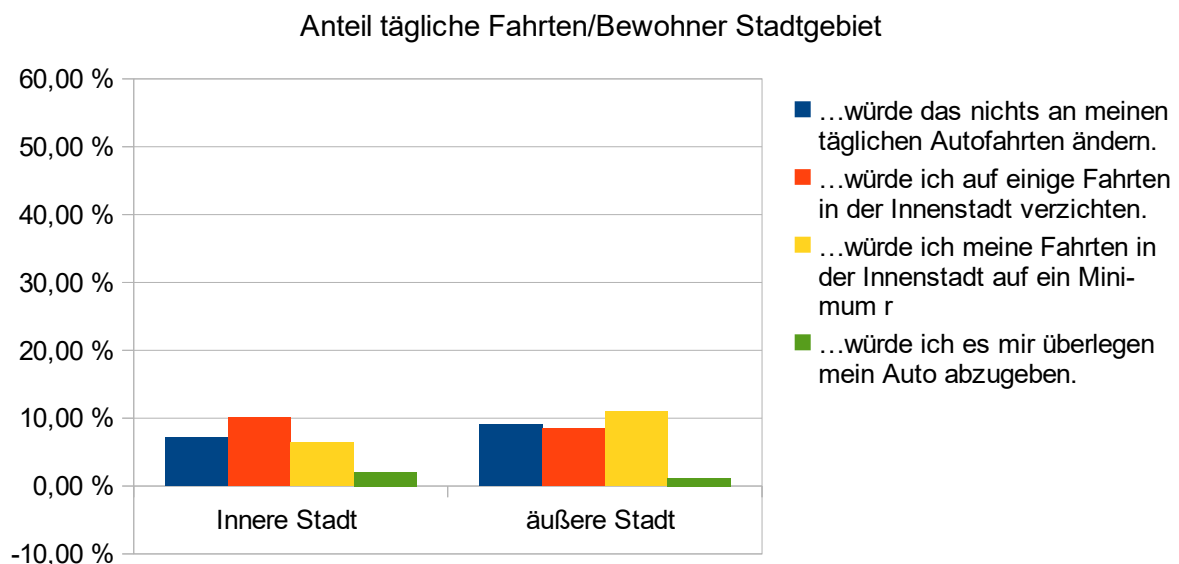


Abbildung 88: Citymaut, Änderung der täglichen Nutzung, innere und äußere Stadt

Damit ergibt sich bei vorsichtigen Annahmen insgesamt eine tägliche Verringerung der Einfahrten von 29,2% für die Innenstädter und 31,6% für die Außenstädter. Diese Werte sind natürlich mit Unsicherheiten behaftet, mit etwa 30% liegen sie zwischen den Werten von London mit 40% und Stockholm mit 20%. Ob mit dieser Verhaltensänderung ein Verzicht auf Mobilität verbunden ist oder eine Verlagerung auf die Angebote des Umweltverbundes oder andere Zielgebiete gewählt werden, ist schwer abzuschätzen.

PAVE

Die bemautekten Einfahrten verringern nicht nur die Einfahrten selbst, sondern auch die mit ihnen zusammenhängenden Wegeketten. Der Einfluss der Maut auf den Modal Split und auf den Binnenverkehr der Inneren Stadt kann auf Basis der MiD 2017 abgeschätzt werden.

Betrachtet wird der Pkw-Verkehr, wie er in der MiD 2017 für Deutschland repräsentativ erhoben wurde.

Ein Weg kann nach MiD grundsätzlich attribuiert werden mit Wohnort, Startort der Fahrt, Zielort der Fahrt. Aus diesem Datensatz können die Wege jeweils für alle Verkehrsarten ermittelt werden:

Binnenverkehr in der inneren Stadt, äußeren Stadt, Brandenburg (nach Wohnort), Einfahrten in Mautzone nach Wohnort

Da auch die Einfahrten einen Weganteil in der inneren Stadt haben, werden sie hier zusammen mit dem Binnenverkehr als Verkehrsaufkommen der inneren Stadt bezeichnet.

Bis auf den Binnenverkehr sind alle Wege der Innenstadtbewohner durch die Maut betroffen, z.B. verringert sich ihr Binnenverkehr in der äußeren Stadt, entsprechen dem Anteil, der sein Auto wegen der Citymaut nicht benutzen. So verringern sich alle MIV-Fahrten der Bewohner der inneren Stadt um 22,6%, die der Bewohner der äußeren Stadt um 5,7%. (Tabelle 25).

Die verkehrliche Wirkung der Citymaut in der inneren Stadt umfasst die bemautekten Einfahrten der Pkw der Bewohner der inneren und äußeren Stadt, also der Berliner, wie sie in der Tabelle 25 unten für den Modal Split angegeben sind. Dazu kommen die Einfahrten der Brandenburger und der Fahrer aus dem restlichen Bundesgebiet (ohne Ausländer). Die Reduktion des Verkehrsaufkommens von etwa 26% in der inneren Stadt ist in Tabelle 25 in der rechten Spalte angegeben, der Anteil des Verkehrsaufkommens nach Wohnort in den Zeilen davor. In der inneren Stadt verändert sich der Binnenverkehr der Innenstädter nicht, nur ihr Ziel- und Quellverkehr ist durch die Citymaut reduziert, insgesamt auf 81,7%. Der übrige MIV der außerhalb des Innenbereichs Wohnenden unterliegt bei seinen Fahrten in die innere Stadt der Citymaut und verringert sich auf 68,37%. Dadurch steigt der Anteil der Innenstädter in der inneren Stadt von 40 auf 44%, der der Außenstädter sinkt von 43,6 auf 40,5%.

Verkehrsaufkommen Berlin innere Stadt ohne Citymaut					Verkehrsaufkommen Berlin innere Stadt mit Citymaut					
Wege MIV Fahrer nach Wohnort					Wege MIV Fahrer nach Wohnort					
Wohnort	Binnenverkehr innere	Ziel innere	Quellverkehr innere	Verkehrsaufkommen innere	Wohnort	Binnenverkehr innere	Ziel innere	Quellverkehr innere	Verkehrsaufkommen innere	Reduktion auf
Berlin innen	78,76 %	32,89 %	29,90 %	40,04 %	Berlin innen	84,43 %	33,67 %	30,65 %	44,85 %	81,70 %
Berlin außen	10,52 %	50,28 %	51,58 %	43,57 %	Berlin außen	7,71 %	49,70 %	51,04 %	40,02 %	68,37 %
Brandenburg	1,33 %	12,75 %	13,57 %	11,00 %	Brandenburg	0,98 %	12,60 %	13,43 %	10,09 %	68,37 %
rest BRD	9,38 %	4,08 %	4,94 %	5,39 %	rest BRD	6,88 %	4,03 %	4,89 %	5,04 %	68,37 %
Summe	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	Summe	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	73,77 %

Tabelle 25: Citymaut, Änderung Verkehrsaufkommen innere Stadt

Der Modal Split mit einer Citymaut zeigt für ganz Berlin eine verhaltene Reaktion. Durch die Citymaut verliert der MIV in Berlin 3%-Punkte und dieser Anteil wird in dieser Abschätzung vollständig vom ÖPV übernommen. Bei einer Verlagerung auf die AVF-Dienste kann keine verkehrliche Entlastung des

PAVE

Straßenverkehrs erwartet werde, da das Robotaxi tendenziell zu mehr Verkehr führt. Der Anteil des Ridesharing ist zu gering, um mit nennenswerte Verkehrsentlastungen zu erreichen.

Modal Split VOR Citymaut			Modal Split mit Citymaut- MIV vollständig auf ÖPNV				
	Innere	Äußere	Berlin		Innere	Äußere	Berlin
Zu Fuß	29,62 %	25,51 %	26,85 %	Zu Fuß	29,62 %	25,51 %	26,85 %
Fahrrad	21,66 %	9,89 %	13,74 %	Fahrrad	21,66 %	9,89 %	13,74 %
MIV	20,24 %	38,75 %	32,69 %	MIV	15,60 %	36,57 %	29,71 %
Davon Fahre	16,38 %	30,51 %	25,89 %	Davon Fahrer	12,69 %	28,77 %	23,51 %
Davon Mitfa	3,86 %	8,24 %	6,81 %	Davon Mitfahrer	2,91 %	7,80 %	6,20 %
ÖPV	28,48 %	25,85 %	26,71 %	ÖPV	33,13 %	28,03 %	29,70 %

Tabelle 26: Citymaut, Änderung Modal Split

4.3.2.4.4 Zusammenfassung Mobilitätsnachfrage

In diesem Kapitel werden Grundlagen, Daten und Zusammenhänge zu weiteren Potentialabschätzungen zusammengestellt. Die Quantifizierung der Potentiale zukünftiger AVF-Mobilitätsangebote und ihre Nachfrage basiert auf den heute verfügbaren Daten zu Mobilität und Verkehr, Befragungen und Szenarien möglicher Zukünfte.

Das Potential der AVF-Mobilitätsdienste wird in diesen Untersuchungen als ein zusätzliches Angebot behandelt, das im Wettbewerb zu den bestehenden Mobilitätsangeboten zu Fuß, Fahrrad, ÖPNV und Pkw einschließlich Mitfahrer steht.

Die neuen Technologien Digitalisierung, E-Mobility, AVF erhöhen den Wettbewerb und die Vielfalt des Mobilitätsangebotes. Der MIV wird attraktiver, der ÖPNV attraktiver und kostengünstiger. Fahrerlose Taxen und Shuttles ergänzen als Robotaxi und Ridesharing das Angebot und liegen in Fahrtzeiten und Fahrtkosten zwischen MIV und ÖPNV. Zusätzlich entstehen unterhalb des ÖPNV neue Mobilitätsangebote mit dem Elektrofahrrad und e-Scooter.

Die Abschätzung der Mobilitäts-Nachfrage und ihre verkehrliche Wirkung basiert auf der PAVE-Online-Befragung von 1004 Probanden in Berlin (Kapitel 4.2). Abgefragt wurde die vermutete Nutzungshäufigkeit der AVF-Angebote. Die Clusterung der Nachfrage ergab 6 Mobilitätstypen, von denen drei über 90% der täglichen AVF-Dienstenutzer repräsentieren. Etwa ein Drittel der in PAVE Befragten würde AVF-Dienste nutzen, die voraussichtliche tägliche Nutzungen der AVF-Dienste liegt insgesamt unter 10%. Für Berlin gesamt teilen sich die Nutzungen etwa zu gleichen Anteilen auf Robotaxi und Sammeltaxi auf.

In dieser Abschätzung gewinnen Robotaxi und Sammeltaxi von allen Mobilitätsanbietern Anteile. Die Verluste des Umweltverbundes führen zu mehr Straßenverkehr, hier in einer Größenordnung von etwa 4% (Besetzungsgrad Robotaxi =2).

Das Nachfrageverhalten in der inneren Stadt unterscheidet sich von dem der äußeren Stadt erheblich. Schon heute ist die Fahrzeugverfügbarkeit im Haushalt in der Innenstadt fast 40% niedriger als in der äußeren Stadt. Die Bereitschaft der Autofahrer zukünftig auf ein Auto zu verzichten, ist mit 20% etwa doppelt so hoch wie in der äußeren Stadt. Die gleiche Wirkung hat eine Citymaut, die 22% der Innenstädter zur Abgabe des Autos bringen könnte (9,5% in der äußeren Stadt). Ebenso ist die voraussichtliche Nutzung von AVF-Diensten in der Innenstadt mit 12,5% größer als in der äußeren Stadt mit knapp 8%.

Das AVF-Potential scheint in der inneren Stadt einfacher zu erschließen zu sein als in der äußeren Stadt. In der äußeren Stadt ist die Neigung gering, das eigene Auto abzuschaffen oder AVF-Mobilitätsdienste

PAVE

zu nutzen, obwohl in der Befragung der Servicelevel und Fahrtpreis nicht nach Stadtgebiet angepasst wurde (etwa entsprechend Zone ABC im ÖPNV).

Die Einführung einer Citymaut von 12€ für die innere Stadt („Hundekopf“) würde etwa 30% der Autofahrer abhalten in die innere Stadt einzufahren. Das Verkehrsaufkommen in der inneren Stadt verringert sich um etwa 26%. Die jährlichen Einnahmen aus der Maut belaufen sich in dieser Abschätzung auf maximal 860 Mio€/a.

Durch die Citymaut verliert der MIV in Berlin 3%-Punkte im Modalsplit. Die Verlagerung auf die AVF-Dienste lässt keine spürbare verkehrliche Entlastung des Straßenverkehrs erwarten. Ebenso scheint der Pkw-Besitz/Pkw-Bestand gesamt nur gering durch AVF-Dienste beeinflussbar. Die Verlagerung auf die AVF-Dienste lässt keine verkehrliche Entlastung des Straßenverkehrs erwarten.

Die oben erarbeiteten Daten und Zusammenhänge liefern Grundlagen für die weiteren quantitativen Untersuchungen. Die ermittelten Strukturen der Mobilitätsnachfrage sind eine Basis für die Abschätzung einer zukünftigen Nachfrage, die sich auf soziodemografische Entwicklungen stützt.

4.3.3 AVF-Potentiale in der urbanen Mobilität, Marktmodelle

Marktmodell zur optimale Auslegung AVF-Ridesharing-Systemen

Grundlage des Marktmodells ist das „MATSim Open Berlin Scenario“ (Kapitel 4.5). Dieser Untersuchung liegen verschiedene MATSim Simulationsläufe für Berlin mit Veränderungen der relevanten Parameter vor. Damit entstand eine genügend große Zahl an „Stützpunkten“ mit denen der AVF-Markt in einem Modell abgeschätzt werden konnte. Ziel der Arbeiten ist, die optimale Auslegung für AVF-Ridesharing-Systeme und die optimale Preisstruktur aus betriebswirtschaftlicher Sicht zu finden.

4.3.3.4 Nachfrage Ridesharing

Für dynamische Nachfragen wie im Verkehr werden die verschiedensten Preismodelle angewendet, wie ÖV-Tarife, Taxi-Tarife mit Sockelpreis, Carsharing-Preise mit Mitgliedschaft, dynamische Preise bei Uber. Hier soll der Zusammenhang zwischen Sockelpreis und km-Preis betrachtet werden, um die optimale Höhe und das optimale Verhältnis von Sockelpreis und km-Preis zu finden.

Aus den MATSim Simulationen ist mit strukturierten Parameterveränderungen die Nachfrage über Sockelpreis und km-Preis gegeben.

Im Abbildung 89 ist die Nachfrage in Anzahl Rides (Fahrten) über Sockelpreis (0 bis 2€) und km-Preis (0 bis 0,6€/km) aufgetragen. Deutlich zu sehen ist, dass in den Hochpreisbereichen keine Nachfrage besteht.

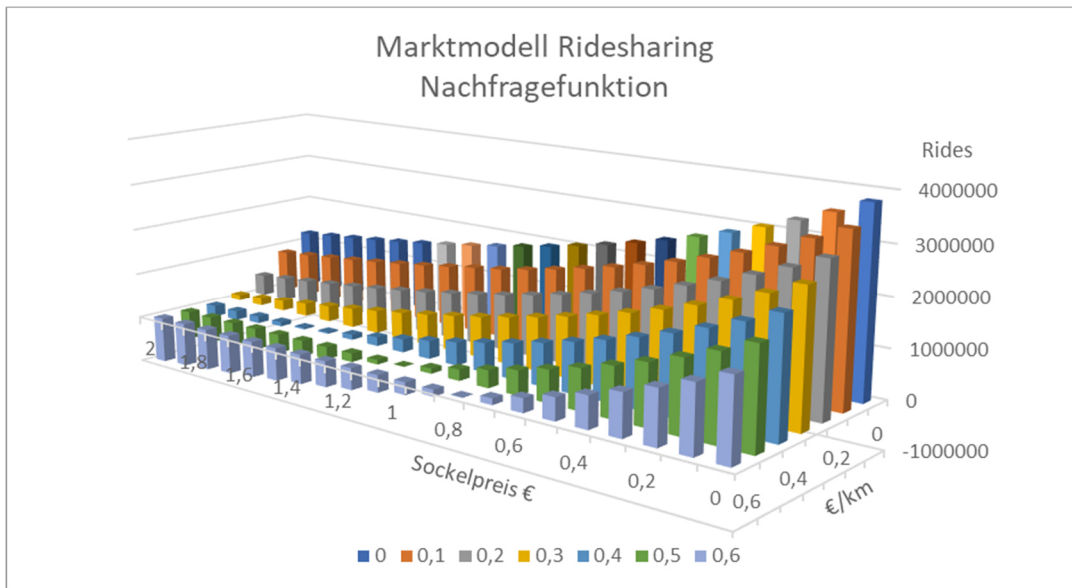


Abbildung 89: Ridesharing, Nachfragefunktion [MATSim Daten]

Abhängigkeit Ridellänge von Preisstruktur

In Abbildung 90 sind die durchschnittlichen Ridellängen in Abhängigkeit der Preise eingetragen. Verbindet man die Punkte der durchschnittlichen Ridellängen der „Sockelpreise+20c/km“ und die der „100c+km-Preise“, ergeben sich Geraden.

- Blaue, steigende Linie: Ein höherer Sockelpreis amortisiert sich erst mit größerer Fahrlänge.
- Rote, fallende Linie: Niedrigere km-Preise bei gleichem Sockelpreis führen zu höheren Fahrlängen.

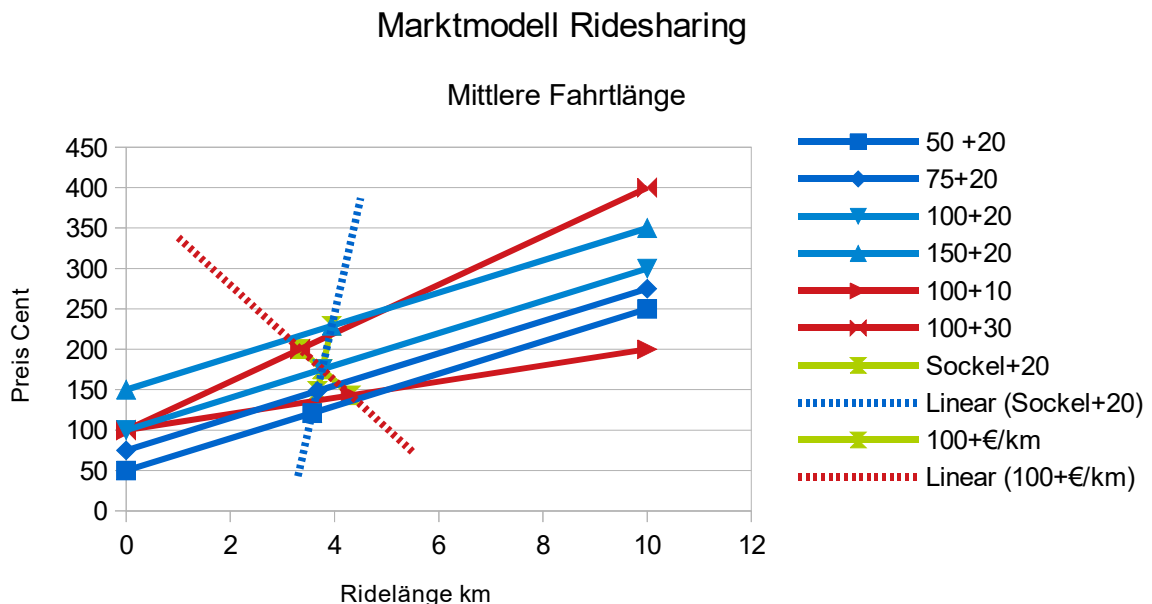


Abbildung 90: Ridesharing, durchschnittliche Fahrlänge und Fahrtpreis [MATSim Daten]

Die durchschnittliche Fahrlänge von etwa 4km deutet darauf hin, dass von den AVF-Diensten kurze MIV- und ÖPNV-Wege und längere Fahrrad- und zu Fuß-Wege übernommen werden. Zum Vergleich

PAVE

beträgt die mittlere Länge eines Weges in der inneren Stadt 4,8km, in der äußeren Stadt 6,5km (SrV 2013).

4.3.3.5 Marktmodell Ridesharing

In Abbildung 91 sind die Kosten und Erlöse über der Nachfrage für die gesamte Stadt Berlin aufgetragen. Die Simulationsläufe mit variierten Sockelpreisen von 50, 75, 100 und 150 Cent und festem km-Preis von 20 Cent sind im Bild blau gekennzeichnet, die Simulationen mit variierten km-Preis von 10, 20 und 30 Cent und festem Sockelpreis von 100 Cent sind rot gekennzeichnet. Die hohen Bestimmtheitsmaße der Trendlinien zeigen, dass die Extrapolation der simulierten Ergebnisse vertrauenswürdig scheinen.

Die Kostenfunktion AV-RS, Ridesharing wurde aus den Angaben im Projekt Megafon mit den PAVE-Fahrzeugdaten gewonnen. Die beiden Kostenfunktionen sind sehr ähnlich. Werden die durchschnittlichen Fahrtlängen berücksichtigt (Megafon ca. 5,1km/Ride, PAVE ca. 3,7km/Ride), sind die spezifischen Kosten €/Pkm nahezu gleich. Der Grund für die unterschiedliche Fahrtlänge ist, dass in MEGAFON der private Pkw und Busverkehr durch AV-Dienste ersetzt werden. In PAVE werden die AV-Dienste als zusätzliches Angebot modelliert, der „Agent“ wählt aus der gesamten Angebotspalette das für ihn günstigste Mobilitätsangebot aus. Ein weiterer Unterschied ist der Besetzungsgrad, der in PAVE wegen des höheren Servicegrades geringer ist als in MEGAFON²⁸ (Besetzungsgrad über 2).

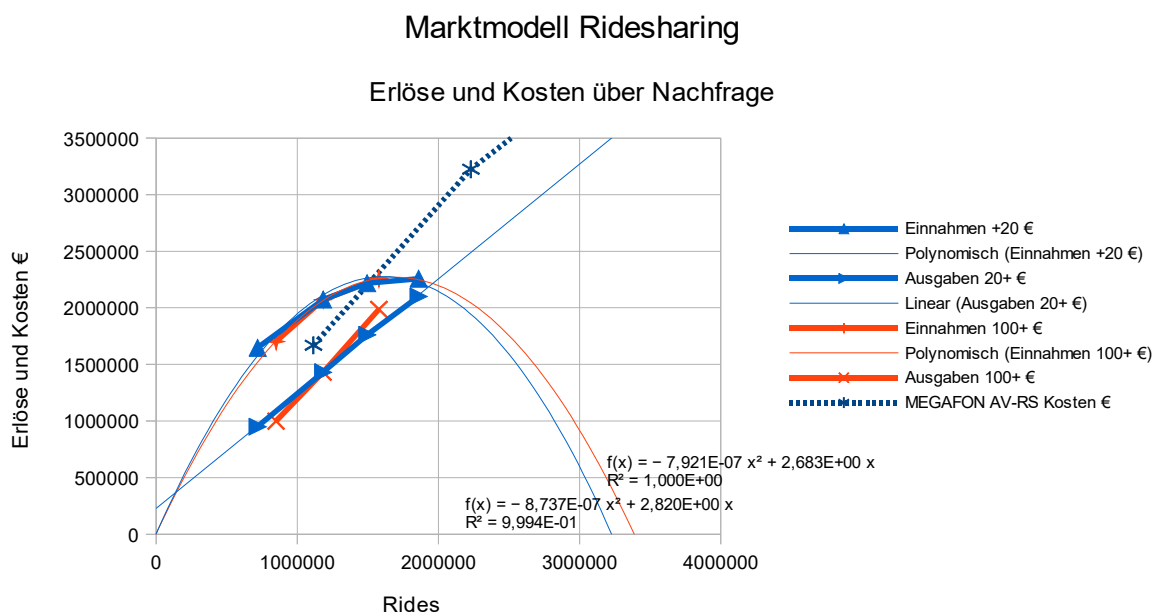


Abbildung 91: Ridesharing, Erlös- und Kostenfunktion [MATSim Daten]

²⁸ MEGAFON, Modellergebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des öffentlichen Nahverkehrs Im Projekt MEGAFON wird die Wirkung autonomer Fahrzeuge als Carsharing- (Robotaxi) und Ridesharing-System auf den Verkehr in der Region Stuttgart untersucht.

PAVE

Aus der Erlöskurve Abbildung 91 lässt sich leicht die Preisabsatzfunktion ableiten, Abbildung 92. Die aus den Simulationen ermittelten Trip-Preise liegen auf den abgeleiteten Preis-Absatz-Funktionen.

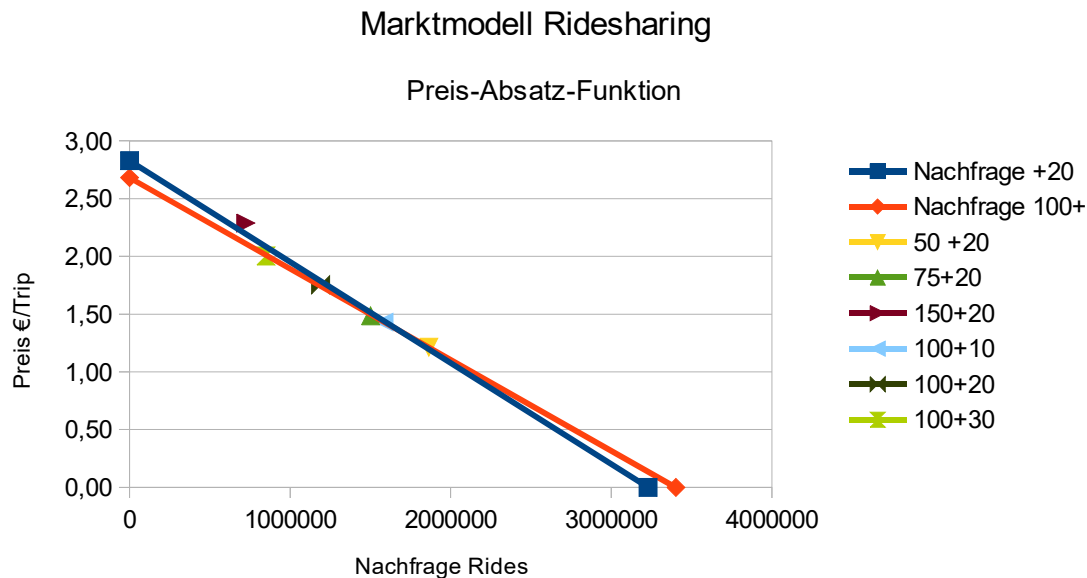


Abbildung 92: Ridesharing, Preis-Absatz-Funktion [MATSim Daten]

Das hier gefundene, grundsätzliche Marktmodell bildet die Zusammenhänge von AVF-Ridesharing-Systemen gut ab. Mit ihm lassen sich leicht optimale Lösungen für die Systemauslegung gewinnen.

Optimale AVF-Pooling Systemauslegungen [Berlin, Gesamt], Wartezeit 6,8 min [95%]			
	Preis	Nachfrage	Anteil
	€/Weg	[Wege]	% [Alle Wege]
Gewinnmaximale Auslegung	2,17	749.556	6
Kostendeckende Auslegung	1,50	1.516.552	12
Subventionierte (50%) Auslegung	0,70	2.425.442	20
Optimale AVF-Pooling Systemauslegungen [Berlin, Gesamt], Wartezeit 7,5 min [95%]			
	Preis	Nachfrage	Anteil
	€/Weg	[Wege]	% [Alle Wege]
Gewinnmaximale Auslegung	1,92	1.033.760	9
Kostendeckende Auslegung	1,02	2.067.520	17
Subventionierte (50%) Auslegung	0,60	2.549.269	21
			Basis: MATSim

Tabelle 27: Ridesharing, Optimale Systemauslegungen [MATSim Daten]

Der Einfluss des Servicelevels, hier der Wartezeit hat einen erheblichen Einfluss auf Nachfrage und Kosten. Wartezeiten deutlich unter 7min sind mit den vorliegenden MATSim-Simulationsergebnissen und den zu Grunde liegenden Rahmenbedingungen wirtschaftlich nicht darstellbar. Selbst mit subventionierter Auslegung des Pooling-Systems mit über 20% Verkehrsanteil ließe sich der MIV-Verkehrsanteil von 27% nicht ersetzen.

4.3.3.6 Marktmodell Robotaxi

Das Marktmodell Robotaxi im Bild basiert auf MATSim- Simulationenläufen mit unterschiedlichen Wartezeiten. Die Erlöskurve für 7min Wartezeit endet bei der maximalen Nachfrage von 1,6 Millionen Fahrten, etwa der Hälfte der maximalen Pooling Nachfrage. Eine Wartezeit von 5min steigert die Nachfrage erheblich, jedoch sind die Kosten etwa doppelt so hoch wie die Erlöse.

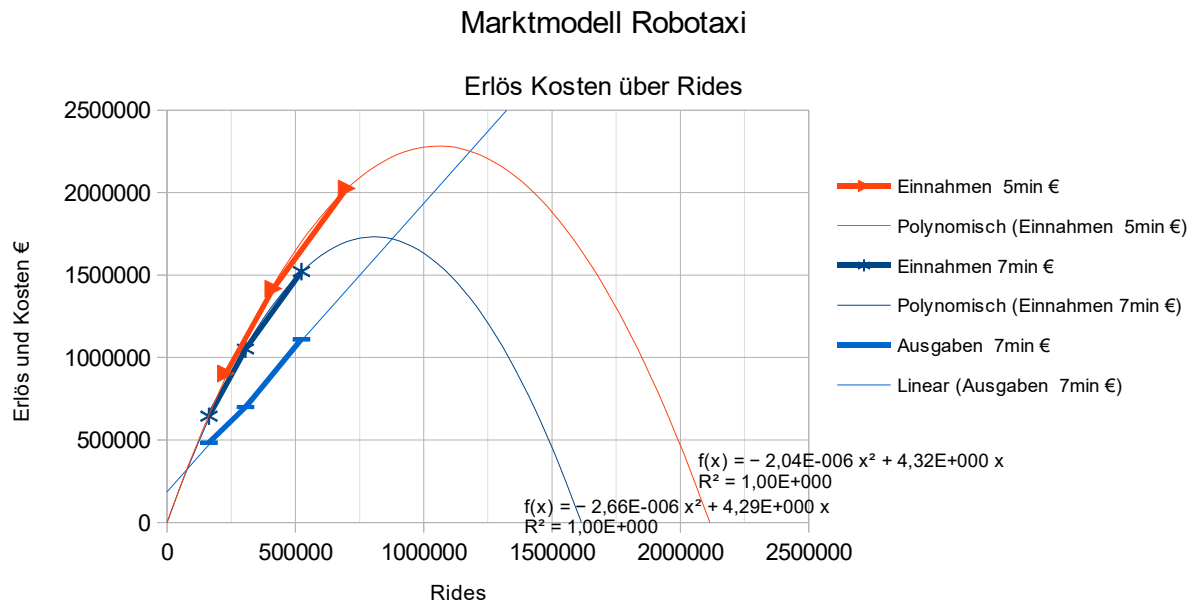


Abbildung 93: Robotaxi, Erlös- und Kostenfunktion [MATSim Daten]

Die gewinnmaximale Auslegung liegt bei 480000 Fahrten. Der durchschnittliche Preis von knapp unter 3€ entspricht dem BVG-Einzelticket. Kostendeckung ist bis zu 876000 Fahrten und einem Preis von knapp unter 2€ möglich.

Verkehrliche Wirkung AVF-Mobilitätsdienste

Die AVF-Mobilitätsdienste führen gegenüber dem 0-Fall zu einer höheren Strassenverkehrsleistung.

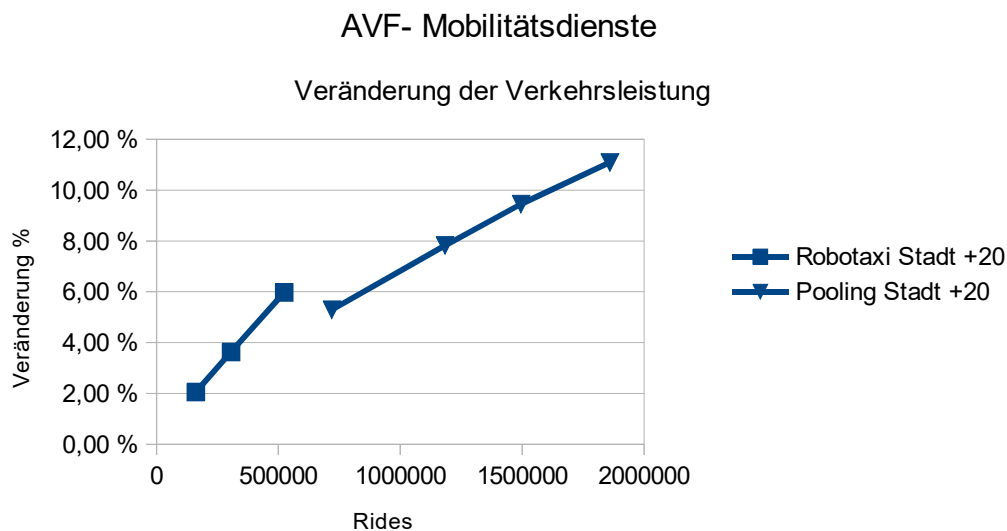


Abbildung 94: AVF-Dienste, Veränderung der Verkehrsleistung [MATSim Daten]

In Abbildung 94 sind die Veränderungen für Berlin gesamt angegeben. MATSim bildet den Verkehrsmittelwahlprozess ab, deshalb werden nicht nur Wechsler vom Pkw auf AVF-Dienste erfasst, sondern auch die Gewinne vom Umweltverbund. Der Ersatz des Pkw durch Robotaxis erhöht grundsätzlich die Verkehrsleistung, da die Robotaxis ihre Anschlussfahrt nur durch Leerfahrten erreichen, die privaten Pkw „versickern“ dagegen an Quelle und Ziel. Beim Ridesharing können schon deshalb gegenüber dem MIV mehr Fahrten entstehen, weil sich durch das AVF-Angebot die MIV-Mitfahrengemeinschaften (MIV-Besetzungsgrad von 1,3) auflösen könnten. Die hier gewählten geringen

PAVE

Wartezeiten und adressgenauen Halte verringern den Besetzungsgrad und erhöhen Leer- und Umwegfahrten (und Kosten). Deshalb erhöht sich unter diesen Randbedingungen die Strassenverkehrsleistung durch Ridesharing gegenüber dem 0-Fall.

Wie in Abbildung 95 sichtbar, verändert sich der Modalsplit des Verkehrsaufkommens. Der Anteil des Ridesharing nimmt mit sinkenden Preisen zu. Entsprechend verlieren alle Verkehrsträger des Umweltverbundes Anteile an Ridesharing. Betrachtet man das Wegeaufkommen, wird der Pkw das dominierende Verkehrsmittel. Damit steigen auch die Pkw-Fahrten, weil der Besetzungsgrad der privat Pkw gleich bleibt und der Besetzungsgrad der Ridesharing-Fahrzeuge auch bei höherem Poolingaufkommen nur gering steigt (in diesem Bereich).

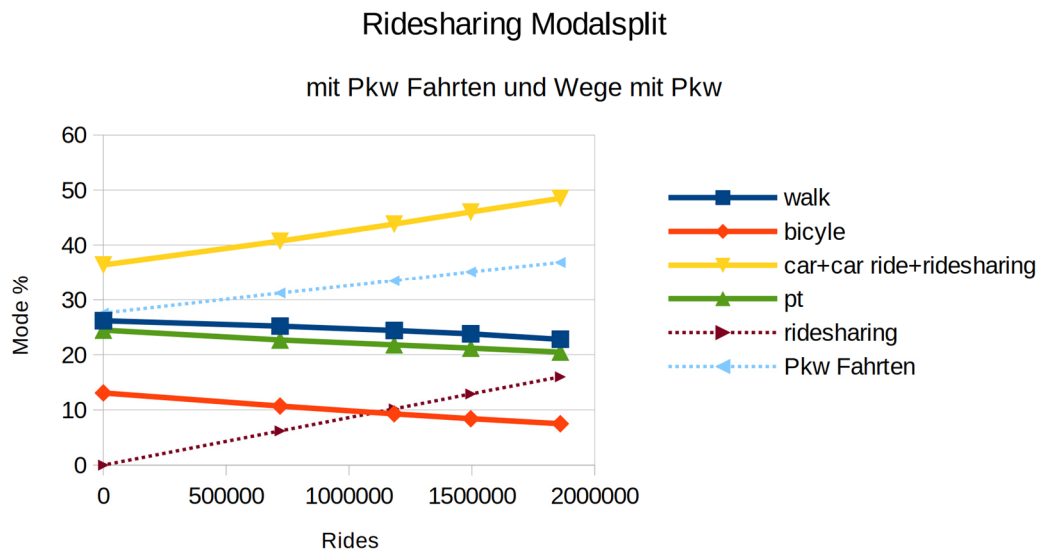


Abbildung 95: Ridesharing Modalsplit, mit Ridesharing wird der Pkw das dominierende Verkehrsmittel

Eine Senkung der Ridesharing-Verkehrsleistung ist nur mit einem höheren Besetzungsgrad - einer stärkeren Bündelung - erreichbar. Der geringe Einfluss der Fahrtkosten und des Servicegrades auf den Besetzungsgrad wurde gezeigt. So bleibt als Einflussparameter nur noch die absolute oder relative Verringerung der Fahrtzeit gegenüber dem privat-Pkw, um damit die Vorteilhaftigkeit und Attraktivität von Ridesharing zu erhöhen. Dies könnte z.B. durch Bevorzugungen der Ridesharing-Fahrzeuge gegenüber dem privaten Pkw geschehen.

4.3.3.7 Zusammenfassung Marktmodell

Die MATSim Simulationen erlauben es, ein aussagekräftiges Bild der Nachfrage, des Absatzes und der Kosten der AVF-Dienste in dem gegebenen urbanen Mobilitätsmarkt Berlin abzuleiten. Es ergeben sich Preis-Absatz-Funktionen und „klassische“ Erlös- und Kostenfunktionen. Mit diesem Marktmodell können die Gewinnzone (Gewinnschwelle, Gewinngrenze), der maximale Gewinn oder auch die bei einem erwünschten Absatz entstehenden Verluste, hier der Subventionsbedarf, abgeschätzt werden.

Die Abhängigkeit der Nachfrage und der Kosten von Servicelevel und Preis kann nachgewiesen werden. Ein Service mit Wartezeiten deutlich unter 7min sind nach den vorliegenden MATSim-Simulationsergebnissen und den zu Grunde liegenden Rahmenbedingungen wirtschaftlich nicht darstellbar. Der hohe Servicelevel mit kurzen Wartezeiten und adressgenauen Halten führt zu geringem Besetzungsgrad, längeren Umwegfahrten und Leerfahrten. Dadurch und durch die Gewinne von Kunden des Umweltverbundes erhöht sich die Strassen-Verkehrsleistung gegenüber dem 0-Fall. Die in der Gewinnzone liegenden Auslegungspunkte ergeben Pooling-Preise, die zwischen den variablen und Pkw-gesamt-Kosten pro Kilometer liegen.

4.3.4 QUANTOR®-basierte Szenarien des künftigen AVF

In diesem AP wurden mit Hilfe des Werkzeugs QUANTOR® Szenarien für das Jahr 2037 erstellt. Im Laufe des iterativen Szenarioprozesses wurde mit Hilfe von Mobilitäts- und Verkehrsexperten zunächst ein semantisches Modell in Form strukturierter und miteinander verknüpfter Tabellen erstellt, die es erlauben, den aktuellen Zustand und Hypothesen zu künftigen Entwicklungen adäquat abzubilden. Beispiel: Tägliche Wege nach Region und Modalgruppe verknüpft durch Wege/Person mit Bevölkerung nach Region und Modalgruppe.

Die Methodik erlaubt die Einbeziehung von Befragungsergebnissen zur Anreicherung bzw. Unterstützung spezifischer Hypothesen künftiger Entwicklungspfade. Das Design der PAVE Befragung (Kap 4.2.1.5) wurde so entwickelt, dass Ergebnisse dieser repräsentativen Befragung in diesen Szenarioprozess einfließen konnten. Dies betraf z.B. Fragen zu künftiger AVF Nutzung ("Affinität"). Die Antworten der Probanden z.B. auf Frage 4.2.13 und 14 nach der Selbsteinschätzung der Nutzungshäufigkeit von autonomen Taxis ("Robotaxi") bzw. Sammeltaxi ("Ride Sharing") auf einer 5er Skala von "täglich" bis "nie" lieferte Rückschlüsse über die tägliche Nutzung am Stichtag. So wurde z.B. über die Merkmalsverknüpfung Nutzung nach Hauptverkehrsmittel und Art der Affinität der Einfluß der Robotaxi- und Ridesharing-Nutzung auf den künftigen Modal Split abgeschätzt.

Ebenso flossen Ergebnisse der Agentensimulation in den Szenarioprozess ein (Kap 4.5)

4.3.4.1 Die QUANTOR®-Methodik

QUANTOR® ist ein Werkzeug, das Rechnen mit intervallskalierten Zahlen erlaubt. Es basiert auf Standard-Verfahren der deskriptiven Statistik und probabilistischer Schätzung, wie dem Bayes'schen Kalkül. Der Ansatz wurde von B. Schmid entwickelt (Schmid 1979); Weiterentwicklungen und Anwendungen sind beschrieben in Schmid (1985), Mehlmann (1993), Müller (1991, 1995).

Ein QUANTOR®-Modell verknüpft Mengen- und Wertgerüste in Form von Tabellen auf der semantischen Ebene (Semantisches Netz der Kopfzeilen- und Vorspalten-Strukturen, :). Zu jedem Tabellenelement gehört ein intervallskalierter Zahlenwert (z.B. 40 ± 5). Mit der Intervallbreite wird die Verlässlichkeit jedes Sachverhalts, jeder Aussage, Annahme oder Prognose codiert. Diese können Erhebungs-, Hochrechnungsfehler, ... oder - im Falle enger Intervalle - zu erfüllende Bedingungen, Ziele, Wünsche abbilden. Die wichtigste Eigenschaft eines solchen Modells gegenüber anderen Modellierungsansätzen ist, dass es frei von jeglichen Verhaltensannahmen (z.B. Wachstumsfunktion, Abhängigkeiten) hinsichtlich einer künftigen Entwicklung ist. Derartige Hypothesen werden ausschließlich durch Intervall-Zahlenwerte in den Tabellen ausgedrückt.

Jede in einem solchen Modell einfließende Teilinformation wird automatisch auf Konsistenz geprüft, d.h. ob sie zu Widersprüchen innerhalb eines Szenarios führt. Im Folgenden wird beschrieben, wie QUANTOR® die Herstellung konsistenter Szenarien unterstützt.

4.3.4.1.1. Konsistenzprüfung und -sicherung vernetzter Daten mit QUANTOR®

Zukunftsszenarien setzen einen wohldefinierten zeitlichen und sachlichen Ausgangspunkt voraus. Dieser Anfangszustand dient als Bezugspunkt für unterschiedliche Entwicklungspfade, künftige Ereignisse und Zustände, den Möglichkeitsraum.

PAVE

Zustands- und Ereignisräume werden in QUANTOR® durch statistische Tabellen beschrieben. Im einfachsten Fall in der Form $X(Y)$, mit X Erwartungswert und Y als Vertrauensintervall z.B. auf 95% Basis. $X(Y)$ ist zu lesen als $X \pm Y$.

Anfangszustand (2021) = 100 (0)

Szenario 1 (2022) = 110 (2)

Szenario 2 (2022) = 150 (40)

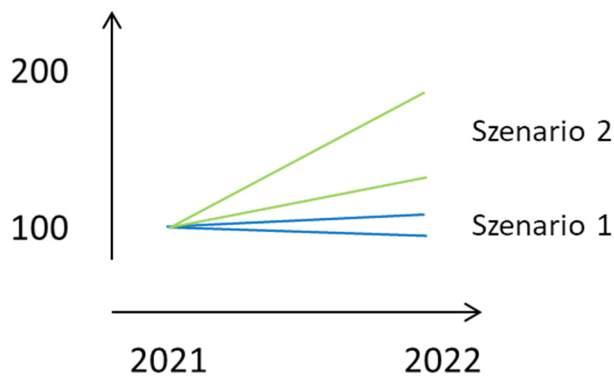


Abbildung 96: Darstellung intervallskalierter quantitativer Szenarien

Im PAVE Projekt besteht die Aufgabe, quantitative Szenarien der Potentiale künftiger Mobilität mit AVF für Berlin zu entwickeln. Zur Beschreibung der Mobilität ist u.a. der Modal Split eine geeignete Form.

Auch hier gilt: Für Zukunftsszenarien bedarf es eines wohldefinierten und verlässlichen Ausgangspunkts. Für die Vergangenheit liegen in aller Regel Daten aus unterschiedlichen Quellen in unterschiedlicher Qualität vor.

Die Strukturdaten in folgendem Beispiel sind fiktiv und dienen lediglich der Illustration.

Wege-Anteile in %	innen	außen	Summe
Pkw	16	30	21
MF	4	8	6
ÖV	28	26	26
Fahrrad	22	10	13
Fußgänger	30	26	34
Summe	100	100	100
	36	64	100

Tabelle 28: Wege-Anteile Berlin nach Hauptverkehrsart und Region [%]

Anmerkung: „innen“ bezeichnet die Innenstadt (innerhalb des S-Bahn-Rings); „ausen“ das restliche Stadtgebiet. „MF“ sind Mitfahrer

PAVE

Bei oberflächlicher Betrachtung ist nicht erkennbar, dass die Werte inkonsistent sind, also eine „unmögliche Welt“ darstellen. Eine überschlägige Kontrollrechnung unter Berücksichtigung der Gesamt-Wege Anteile (2 Drittel Außen, ein Drittel Innen) ergibt:

Für die Pkw-Wege in Zeile „Pkw“: $(2*30 + 1*16)/3 = 25$ gegenüber dem Wert 21 aus der anderen Quelle. Ähnlich bei Fußgängern in Zeile „Fußgänger“: $(2*26 + 1*30)/3 = 27$ gegenüber 34.

Die folgende Abbildung 97 zeigt das zu Tabelle 28 gehörende QUANTOR[®]-Modell

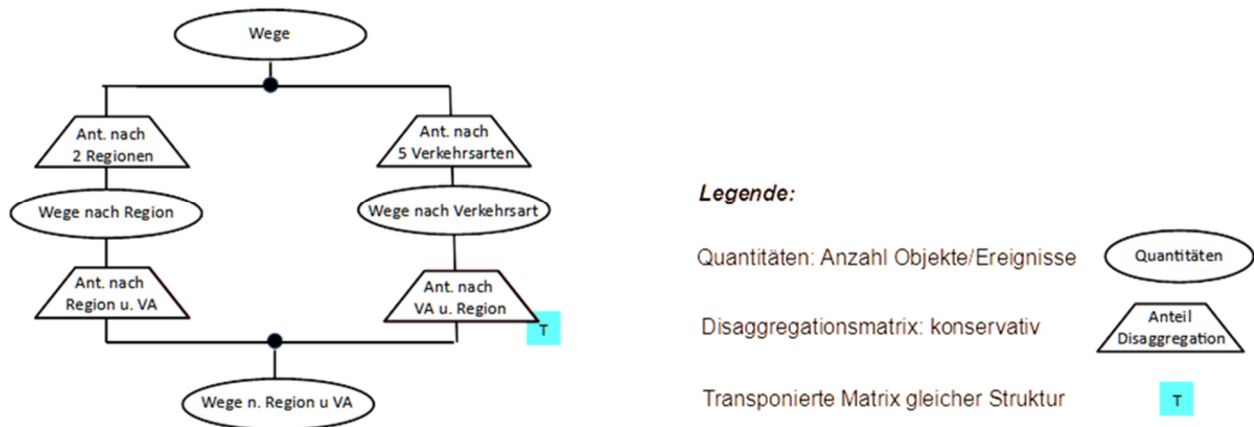


Abbildung 97: QUANTOR[®] Modell der Tabelle 28

QUANTOR[®] erkennt diese Inkonsistenz und zeigt sie auf.

In obigem Beispiel betrifft dies die Werte der Spalte „Gesamt“, die nicht zu denen der Spalten „innen“ und „außen“ passen.

4.3.4.1.2 Berechnung konsistenter Datensätze durch Berücksichtigung der Datenqualität

Die Werte der Spalte „Gesamt“ möge aus Quelle B, die der Summanden und der Wege-Anteile Gesamt aus Quelle A stammen. Kann man unterschiedliche Definitionen bei der Erhebung als Fehler ausschließen, bleibt die statistische Unsicherheit (z.B. Hochrechnungsfehler) als mögliche Erklärung. Hier setzt QUANTOR[®] an und liefert die Lösung in Form eines konsistenten Datensatzes.

QUANTOR[®]-Berechnung Variante 1 „Quellen gleicher Verlässlichkeit“

Es wird bei dieser Variante angenommen, dass beide Quellen gleich verlässlich bzw. ungenau sind. Die Mittelwerte der in QUANTOR[®] eingegebenen „a-priori“-Zeilen der folgenden Tabelle 29 und Tabelle 30 sind identisch mit denen der Tabelle 28. Für sämtliche Mittelwerte (MW) ist ein Vertrauensintervall (St. für Streuung) einzugeben. Unter obiger Annahme gleicher Verlässlichkeit beider Quellen ist dies für jeden Anteilswert gleich, hier 15% des Mittelwerts (erstes Element der Tabelle $16,0 * 15\% = 2,4$). Erst ab dieser Intervallbreite ergibt sich eine konsistente von QUANTOR[®] errechnete Lösung („a-posteriori“-Zeilen). Die deutlichsten Unterschiede zeigen sich bei den Modi Pkw und Fußgänger (grün markiert). Bemerkenswert ist auch die Veränderung von Intervallbreiten (a-posteriori vs. a-priori), die aus der Nutzung der Netzstruktur des Modells kombiniert mit dem in QUANTOR[®] implementierten probabilistischen Standard-Kalkül (Bayes) resultiert.

		MW	± St.	MW	± St.	MW	± St.
		innen		ausen		Summe	
Wegeanteil (%) nach Region und VA							
Pkw	a-prio	16,00	2,40	30,00	4,50	21,00	3,15
	a-post	15,60	2,19	27,48	2,78	23,70	1,90
MF	a-prio	4,00	0,60	8,00	1,20	6,00	0,90
	a-post	3,95	0,58	7,58	0,90	6,40	0,61
ÖV	a-prio	28,00	4,20	26,00	3,90	26,00	3,90
	a-post	27,81	3,25	26,34	2,79	26,80	2,00
Fahrrad	a-prio	22,00	3,30	10,00	1,50	13,00	1,95
	a-post	21,49	2,66	9,87	1,35	13,60	1,16
Fußgänger	a-prio	30,00	4,50	26,00	3,90	34,00	5,10
	a-post	31,20	3,37	28,73	2,88	29,50	2,01
Summe	a-prio	100	0	100	0	100	0
	a-post	100	0	100	0	100	0
Wegeanteil (%) nach Region							
	a-prio	31,60	4,70	68,40	10,30	100	0
	a-post	32,40	4,10	67,60	4,10	100	0

Tabelle 29: QUANTOR-Berechnung Variante 1

QUANTOR®-Berechnung Variante 2: „Quellen unterschiedlicher Verlässlichkeit“

In dieser Variante werden wieder dieselben Basisdaten (a-priori) aus Tabelle 28 verwendet. Nun wird angenommen, Quelle A, von der die regionalisierten Daten stammen, sei verlässlicher als Quelle B, von der die Summenanteile stammen.

Sämtliche Mittelwerte der regionalen Anteile (innen, außen) werden in folgender Tabelle mit einem Intervall von 5% des Mittelwerts versehen, die der Gesamt-Spalte mit 25%. Daraus errechnet QUANTOR® die in folgender Tabelle gezeigten a-posteriori Werte. Erwartungsgemäß finden die größten Veränderungen in der Gesamt-Spalte statt und dort auch (wie bei Variante A) bei Pkw und Fußgängern (grün).

		MW	± St.	MW	± St.	MW	± St.
		innen		ausen		Summe	
Wegeanteil (%) nach Region und VA							
Pkw	a-prio	16,00	0,80	30,00	1,50	21,00	5,25
	a-post	15,80	0,76	29,80	1,17	25,40	0,86
MF	a-prio	4,00	0,20	8,00	0,40	6,00	1,50
	a-post	3,98	0,20	7,97	0,39	6,70	0,28
ÖV	a-prio	28,00	1,40	26,00	1,30	26,00	6,50
	a-post	27,97	1,15	26,04	1,09	26,70	0,83
Fahrrad	a-prio	22,00	1,10	10,00	0,50	13,00	3,25
	a-post	21,97	0,98	9,99	0,49	13,80	0,48
Fußgänger	a-prio	30,00	1,50	26,00	1,30	34,00	8,50
	a-post	30,07	1,19	26,16	1,10	27,40	0,83
Summe	a-prio	100	0	100	0	100	0
	a-post	100	0	100	0	100	0
Wegeanteil (%) nach Region							
	a-prio	31,6	1,6	68,4	3,4	100	0
	a-post	31,7	1,4	68,3	1,4	100	0

Tabelle 30: QUANTOR-Berechnung Variante 2

4.3.2.2 Ausgewählte AVF Szenarien auf Grundlage der PAVE-Befragung

Abbildung 98. zeigt das vollständige Modell, das allen Berechnungen der folgenden Szenarien zugrunde lag.

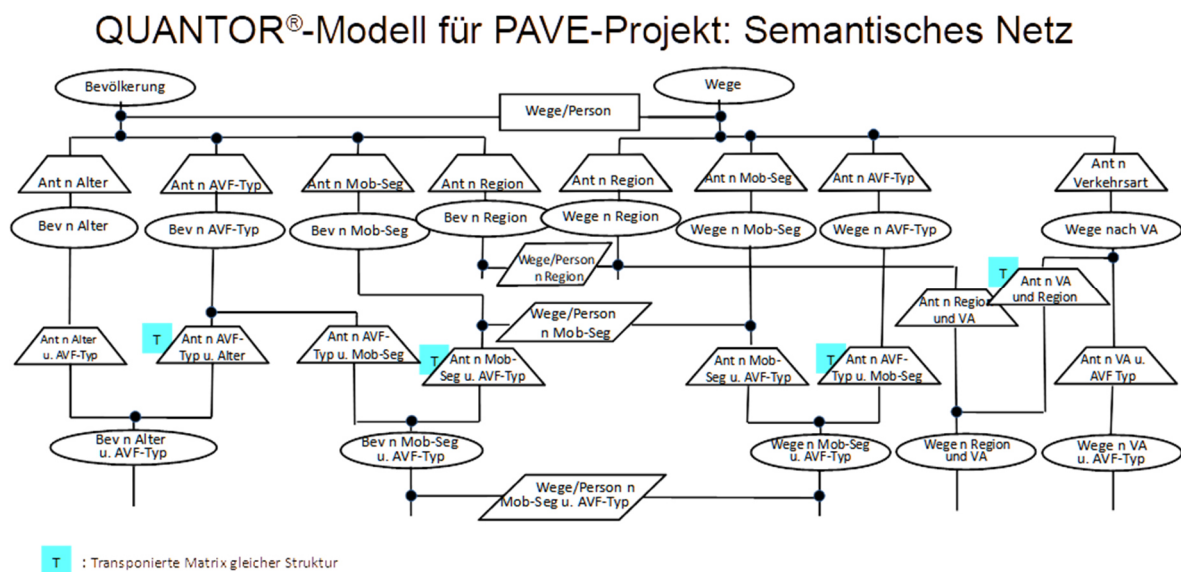


Abbildung 98: QUANTOR® Gesamtmodell für Szenarien

PAVE

Ausgewählte Szenariogrößen:

- Wege-Anteil nach AVF-Typ (Abbildung 98: erste Reihe der Trapeze, zweites von rechts)
- Wege-Anteile nach Verkehrsart (Modal Split) und AVF (zweite Reihe der Trapeze, erstes von rechts)
- Bevölkerung Anteil nach Alter und AVF-Typ (zweite Reihe der Trapeze, erstes von links). Unter Bevölkerung ist hier die Anzahl der Personen zu verstehen, die am Stichtag die entsprechenden Wege zurücklegt.

4.3.2.2.1 Szenario S0 2037 nach StEP Move

In diesem Szenario wurde die Verteilung nach Verkehrsart (Modal Split) aus der Modellrechnung StEP MoVe zugrunde gelegt (Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, 2021, S. 43)

Der StEP MoVe verfolgt das Ziel, die Verkehrswende in der wachsenden Stadt voranzutreiben.— Stärkung des Umweltverbunds aus Fuß-, Radverkehr und ÖPNV. Aus den vorgenommenen Modellrechnungen und den neuen Zahlen der SrV 2018 leitet sich im Jahr 2030 ein Modal Split³ mit einem Anteil des Umweltverbundes von mindestens 82 Prozent (davon 23 Prozent Rad, 30 Prozent Fuß, 29 Prozent ÖPNV) sowie 18 Prozent motorisierter Individualverkehr (MIV) ab.

Der Modal Split für die innere und äußere Stadt wird nicht angegeben. Wenn die heutigen grundlegenden Strukturen des Mobilitätsverhaltens, wie in SrV 2013 ermittelt, erhalten blieben, kann der Modal Split grob geschätzt werden. Bei der Substitution von Wegen durch AVF wurde angenommen, dass die 9,3% AVF-Wege (Tab 29a, Zeile "avers a-prio", Spalte "gesamt") proportional zu Lasten jedes Modus gehen,

Alle Mittelwerte für die AVF-Wege-Anteile ("Robo", "Ride") wurden aus der PAVE Befragung hergeleitet, deren Streuungen (Bandbreiten um die Mittelwerte) wurden nach folgender Regel eingegeben:

- AVF-Wegeanteile, die nicht gegliedert sind: 5% des Mittelwerts (MW)
- AVF-Wegeanteile, die nach einem weiteren Merkmal (z.B. Alter) untergliedert sind: 10%

Weitere Szenariohypothesen:

Wie oben erwähnt gibt es im Modell außer den Intervalldaten keinerlei Szenario-Hypothesen. Je enger ein Intervall, desto größer ist sein Gewicht auf das von QUANTOR[®] (A-Posteriori) berechnete Ergebnis. Zu den wenigen Größen für das Jahr 2037 mit relativ engem Intervall gehören:

- *Bevölkerung gesamt (Alter >14J) und deren Anteile nach Alter* (Quellen: Bevölkerungsprognose Berlin 2030; DeStatis Bevölkerungsvorausberechnung 2035).

Die Prognose-Varianten (obere, untere) sowie die Extrapolation von 2030/2035 auf 2037 wurden durch entsprechende Bandbreiten im Modell berücksichtigt.

$$\text{Bev ges [1000]} = 3330 (60)$$

- *Wege pro Person (alle, nach Region, nach Mobilitäts-Segment, nach AVF, in Abbildung 98 das Rechteck oben und die Rauten darunter):* Über sehr lange Zeiträume in der Vergangenheit waren diese

PAVE

Kennzahlen invariant, daher wurden diese im Modell auf 1% des Mittelwerts gesetzt. (Quelle: MID, SrV, Kap. 4.3.2.4.1)

$$\text{Wege/Pers} = 3,5 \text{ (0,035)}$$

QUANTOR®-Rechenergebnis S0:

Verringerung der AVF-Wegeanteile (Tabelle 31, a-posteriori vs a priori, Werte gerundet)

- Robo von 5,4 auf 4,9
- Ride von 4,4 auf 3,9.

Wegeanteile nach AVF		MW	Strg
Robo	a-prio	5,40	0,3 (5% des MW)
	a-post	4,90	0,10
Ride	a-prio	4,40	0,2 (5% des MW)
	a-post	3,90	0,10
Averse	a-prio	90,30	9,00
	a-post	91,20	0,10
Summe		100,00	

Tabelle 31: Wegeanteile nach AVF gesamt (QUANTOR®-Ergebnis Szenario S0)

Grund für die Verringerung der Mittelwerte: Die AVF-Verteilungen wurden im Modell (abgeleitet aus PAVE Auswertungen) mehrfach, d.h. jeweils untergliedert nach unterschiedlichen Merkmalen, eingegeben:

- Bevölkerung/Personen nach Alter und AVF,
- Wege nach Mobilitäts-Segment und AVF,
- Wege nach Region und AVF sowie
- Wege nach Verkehrsart und AVF.

Aus all diesen (redundanten) Einzelverteilungen errechnet QUANTOR® nach der Bayes'schen Methode die grün markierte wahrscheinlichste A-Posteriori-Verteilung.

Die AVF-Anteile nach Region wurden ebenfalls aus der PAVE Befragung ermittelt.

Sie liegen etwas niedriger als die aus Tabelle 31: Robo a-prio: 5,38 vs. 5,19 (Tabelle 32, Spalte Summe MW). Tabelle 32 zeigt beispielhaft wie die Wegeanteile nach Region entsprechend Tabelle 31 angepasst wurden. Allerdings liegen die Abweichungen hier und im gesamten Modell innerhalb des Vertrauensintervalls.

		Wegeanteil (%) nach Region, VA und Affinität						Werte aus Tab 31	
		MW ± St. innen		MW ± St. ausen		MW ± St. gesamt		MW ± St. gesamt	
Pkw	a-prio	3,83	0,19	16,87	0,84	12,40	1,24		
	a-post	3,83	0,18	16,91	0,73	12,62	0,49		
MF	a-prio	1,15	0,06	5,06	0,25	3,72	0,37		
	a-post	1,15	0,06	5,05	0,23	3,77	0,16		
ÖV	a-prio	27,35	1,37	25,71	1,29	26,50	2,65		
	a-post	27,60	1,09	25,97	1,02	26,50	0,75		
Fahrrad	a-prio	25,08	1,25	18,71	0,94	21,00	2,10		
	a-post	25,30	1,03	18,85	0,83	21,00	0,63		
Fußgänger	a-prio	29,97	1,50	25,81	1,02	27,10	2,71		
	a-post	30,25	1,14	26,02	1,02	27,41	0,76		
avers	a-prio	87,38		92,16		90,72		90,29	4,00
	a-post	88,13		92,80		91,30		91,30	0,08
RoboTaxi	a-prio	7,27	0,73	4,26	0,43	5,19	0,26	5,38	0,27
	a-post	6,84	0,55	3,89	0,28	4,86	0,10	4,85	0,07
RideSharing	a-prio	5,24	0,52	3,53	0,35	4,10	0,21	4,37	0,21
	a-post	5,03	0,42	3,30	0,22	3,87	0,09	3,86	0,11
Summe	a-prio	100	0	100	0	100	0	100	0
	a-post	100	0	100	0	100	0	100	0

Tabelle 32: Wege-Anteile 2037 nach Verkehrsart (Modal Split) und AVF

4.3.2.2.2 Szenario S1 "Alter"

Gegenüber Szenario S0, dem die PAVE-Befragung aus dem Jahr 2017 zugrunde liegt, wird in S1 angenommen, dass 2037 die Generation der unter 35-jährigen eine sehr viel größere AVF-Affinität aufweist; die der älteren Jahrgänge bleibe unverändert.

Quantifizierte Annahme (Tabelle 33 a-prio-Zeilen): Die unter 35-jährigen erhöhen ihre AVF-Affinität je AVF-Modus auf 9% (vgl. Nutzung). Entsprechend reduziert sich der Anteil der Aversen auf 82% Wege.

QUANTOR[®]-Rechenergebnis S1:

bei Anteilen nach Alter und AVF-Affinität: keine Änderung apriori vs a-posteriori

bei Anteil Wege gesamt nach AVF-Affinität: der Einfluß der Verhaltensänderung der <35-jährigen auf die Gesamt-Affinität liegt c.p. bei <0,5% der Wege (dies entspricht einer Anzahl von 10000 - 50000 Wegen pro Tag)

QUANTOR[®] S1 Szenarioeingaben Alter in a-prio-Zeilen

In Klammern: Vergleichswerte aus S0

		16-24 J		25-34 J	
		MW	Strg	MW	Strg
Robo	a-prio	9 (7,1)	5%	9 (7,0)	5%
	a-post				
Ride	a-prio	9 (3,3)	5%	9 (7,2)	5%
	a-post				
Averse	a-prio	82 (89,6)	1%	82 (85,8)	1%
	a-post				
Summe		100 (100)		100 (100)	

Tabelle 33: Szenario-Vergleich Alter bezüglich AVF-Affinität

QUANTOR® S1 Szenarioergebnisse in a-post-Zeilen, in Klammern: Vergleichswerte aus S0, s.o.

		MW	Strg
		Robo	a-prio
	a-post	5,1 (4,9)	0,1 (0,1)
Ride	a-prio		
	a-post	4,2 (3,9)	0,1 (0,1)
Averse	a-prio		
	a-post	90,7 (91,2)	0,1 (0,1)
Summe		100 (100)	

Tabelle 34: Szenario-Vergleich Wege-Anteile bezüglich AVF-Affinität

4.3.2.3 Zusammenfassung

In diesem Arbeitspaket wurde durch Einsatz der QUANTOR®-Methodik gezeigt:

- wie unscharfe quantitative Teilinformation aus unterschiedlichen Quellen (PAVE-Befragung, soziodemografische Prognosen, Mobilitätsexpertise) und unterschiedlicher Qualität in ein kohärentes, widerspruchsfreies Gesamtbild zusammengeführt werden kann
- wie die Qualität der verwendeten Daten explizit zu berücksichtigen ist und auf diese Art Scheingenauigkeit der Zukunftsszenarien 2037 vermieden wurde.

PAVE

Ein erheblicher Teil des Szenarioprozesses bestand in der iterativen Definition der Modellsemantik, die es ermöglichte, sowohl Ist-Daten als auch künftige Entwicklungen in der erforderlichen Verlässlichkeit abzubilden. Die Zusammenstellung der hierfür erforderlichen Datenbasis brachte nicht selten bereits wichtige Erkenntnisse über Strukturen und ihre Veränderungen bzw. Invarianten (Kap 4.3)

Ziel der PAVE-Untersuchung ist, "auf Basis des heutigen Mobilitätsverhaltens und der Transportaufgaben im urbanen Raum, Visionen zukünftiger Verhaltens- und Organisationsformen durch autonom fahrende Fahrzeuge zu entwickeln und die Anforderungen an Fahrzeuge abzuleiten, neue Organisations- und Dienstformen zu entdecken und Ihre Wirkung auf das Verkehrssystem abzuschätzen und zu bewerten." (Kap 2) Mittels der QUANTOR®-basierten Szenarien zur zukünftigen Verteilung und Abgrenzung von öffentlichem und individuellem Verkehr wurde insbesondere gezeigt, wie sich je nach Mobilitätstyp und Alter der Personen die Nutzung AVF gegenüber heutigen Individualverkehrsarten entwickeln kann. Es zeigten sich deutliche Unterschiede der Nutzungsentwicklung in Innenstadtlagen gegenüber städtischer Randlage.

Eine Verschiebung hin zur Nutzung von AVF hängt dabei sehr stark von regulatorischen Bedingungen ab - wie im City-Maut Szenario ersichtlich (Kap 4.3.2.4.3).

Es liegen weit mehr Ergebnisdaten (sowohl Input- als auch Output-seitig) des Szenario-Prozesses vor als hier aus Ressourcen- und Platz-Gründen beschrieben werden konnten. Deren Auswertung und Darstellung muss einer späteren Publikation vorbehalten bleiben. Dadurch wären noch differenziertere und verlässlichere Aussagen künftiger Entwicklungspfade möglich, wie z.B. zur künftigen Verteilung zwischen Wirtschaftsverkehr (hier insbesondere Kurier-, Express- und Paketdienstleister) und Personenverkehr. Im Projekt wurde in den QUANTOR®-Szenarien ausschließlich der Personenverkehr betrachtet.

4.4 Ausgewählte Use Cases (TU Berlin/ Gesamtteam)

Im Folgenden werden einige der im Szenarioprozess identifizierten und für die Modellierung ausgewählte Use Cases näher beschrieben.

4.4.1 Robotaxi

Der use case Robotaxi, der sich aus den Erkenntnissen in Kapitel 4.1 und 4.3 ableitet, beschreibt eine Bedienform von Personentransportdienstleistungen auf Abruf (in der Literatur auch Mobility-On-Demand, Mobility-as-a-Service oder Demand Responsive Transport) mit autonomen Fahrzeugen. Die Funktionsweise ist sehr ähnlich zu klassischen Ruftaxis. Es wird jedoch von einem digitalisierten Buchungssystem für die Erstellung von Fahrthanfragen ausgegangen. Nutzerinnen können dementsprechend per Anruf oder App-basiert Fahrthanfragen von einem Startort zu einem Zielort innerhalb eines vordefinierten Bediengebietes erstellen und erhält umgehende Auskunft über die erwartete Warte- und Fahrtzeit sowie die Transportkosten. Letztere setzen sich typischerweise aus einer fixierten Komponente (pro Fahrt) und einer variablen Komponente (pro Zeit und/oder pro Fahrtweg) zusammen. Sind die angebotenen Bedingungen für die Nutzer akzeptabel, können sie die Fahrt sofort buchen.



Abbildung 99: Beispiel für ein Robotaxi. (Quelle: PAVE)

Je nach Auslegungsart (öffentlicher Verkehr mit Bedienpflicht versus privater Anbieter) kann die Fahrthanfrage seitens des Flottenbetriebes abgelehnt werden. Im Anschluss einer erfolgreich durchgeführten Buchung wird dem/der Kunden/Kundin ein Fahrzeug aus einer zentral gesteuerten Flotte zugewiesen. Der Ein- und Ausstieg kann je nach Betriebsform an einem von dem Kunden oder der Kundin gewünschten Ort oder an einer vom Betreiber vorgegebenen (virtuellen) Haltestelle erfolgen. Während der Fahrt ist das Fahrzeug für weitere Fahrthanfragen blockiert und kann erst nach erfolgter Transportleistung einem Kunden oder einer weiteren Kundin zugewiesen werden.

4.4.2 Pooling

Unter der Bedienform Pooling wird im Folgenden eine Personentransportdienstleistung verstanden, die dem Robotaxi in den Aspekten der Buchung und Preise, der Verwendung automatisierter Fahrzeuge und der Ein- und Ausstiegsorte gleicht. Der Unterschied besteht darin, dass mehrere Fahrthanfragen gleichzeitig durch ein Fahrzeug bedient werden können. Passen Start- und Zielort sowie der Zeitpunkt der Bedienung von zwei oder mehr Anfragen in dem Sinne zueinander, dass für die einzelnen Buchenden keine inakzeptable Erhöhung der Reisezeit entsteht, werden diese Fahrthanfragen gebündelt.



Abbildung 100: Beispiel für Pooling Fahrzeuge. (Quelle: PAVE)

Hierdurch wird bei gleicher Nachfrage der Anteil der Leerkilometer der Fahrzeuge verringert und ihre Besetzung erhöht. Zudem tragen besetzte Fahrzeuge zur Aufrechterhaltung von niedrigen Wartezeiten bei, da sie auch während einer laufenden Transportleistung einer weiteren Fahrtanfrage zugewiesen werden können. Diese Form der Bedienung erfordert eine zentrale Flottensteuerung und weicht daher stärker von klassischen Taxis ab. Da der Kunde oder die Kundin mit im Vergleich zum Robotaxi längeren Fahrzeiten rechnen muss (dies wird während des Buchungsvorgangs kommuniziert), fällt das Transportentgelt geringer als Robotaxi aus.

4.4.4 Dual Use (Personen/Wirtschaftsverkehr)

Autonome Fahrzeuge bieten das Potential, zu verschiedenen Zwecken eingesetzt zu werden. So könnten etwa dieselben Fahreinheiten sowohl im Personen- als auch im Güterwirtschaftsverkehr eingesetzt werden. Je nach operativer Betriebsstrategie ist eine sequentielle Bedienung, zum Beispiel mittels modularen Wechselaufbauten, oder eine simultane Bedienung durch Auftrennung des Innenraumes denkbar. Entsprechende Fahrzeugkonzepte sind bei den großen Fahrzeugherstellern in Entwicklung und teilweise schon offiziell kommuniziert worden (Mercedes URBANETIC, Toyota e-Palette). Auch im Bereich der Forschung werden entsprechende Konzepte ausgestaltet und untersucht (DLR U-Shift). Die integrierte Bedienung von Personen- und Wirtschaftsverkehr bietet das Potential, die Gesamtfahrzeugflotte des Systems und somit den Materialfluss, entstehende Verkehrsflussprobleme, den Platzbedarf und externe Effekte zu verringern.

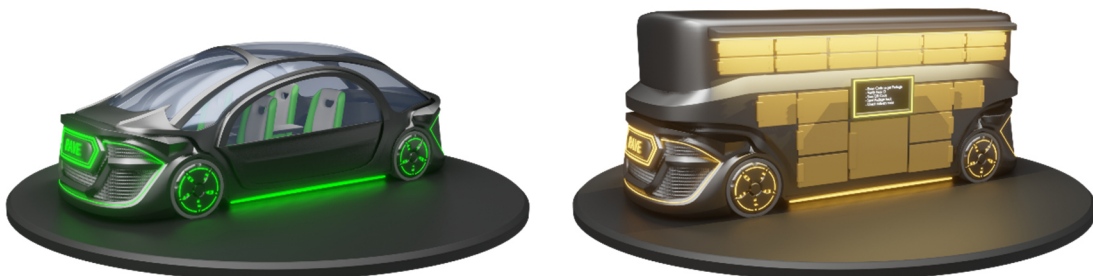


Abbildung 101: Beispiel für ein Dual Use Konzept. (Quelle: PAVE)

PAVE

Es ist wahrscheinlich, dass auch in Zukunft ein Teil der Fahrzeugflotte in privatem Besitz bleibt. Durch die Technologie des Selbstfahrens könnten Privatpersonen jedoch ihr Fahrzeug anderen Personen oder Dienstleistern während ungenutzten Zeiten zur Verfügung stellen und somit gegebenenfalls sogar Geld verdienen.

Im Rahmen einer Machbarkeits- und Potentialanalyse wurde am Beispiel des KEP-Segmentes untersucht, ob die Zeitlücken in den Trajektorien von Privatpersonen ausreichen, wie ein entsprechendes operatives Bedienkonzept aussehen könnte und welche Änderungen sich hinsichtlich der Kostenstruktur ergäben. Diese Studie wurde auf dem TRB Annual Meeting 2020 als Poster präsentiert und im Journal *Transportation Research Record 2020* veröffentlicht (Schlenther et. al 2020).

Die Zeitlücken in den Trajektorien privater Autonutzer in Berlin reichen demnach für eine integrierte, sequentielle Bedienung des Personen- und des KEP-Verkehrs durch dieselben Fahrzeugaufbauten. Hierbei wird von modularen Fahrzeugen mit Wechselaufbauten ausgegangen, wie sie zum Beispiel durch URBANETIC oder U-Shift repräsentiert werden. Ein solches Fahrzeug ist mit intelligenter Infrastruktur ausgestattet, sodass es sich bei Kenntnis über die verfügbare Zeitspanne selbstständig bei einem Logistikdienstleister melden und für einen Warentransport anbieten kann, nachdem die besitzende Person befördert wurde.

Der Logistikdienstleister kann als Konsequenz auf eine eigene Fahrzeugflotte verzichten und somit seine Fixkosten um circa 12 Prozent, abhängig von den Fahrzeugkapazitäten und des Preises für die Anleihe, senken. Allerdings sind diesen Kosteneinsparungen Risikofaktoren wie die Abhängigkeit von der Fahrzeugverfügbarkeit Dritter und Investitions- und Transferkosten für die Systemumstellung entgegen zu rechnen. Der hiervon unabhängige Effekt der Automatisierung verspricht eine Reduktion der Betriebskosten um circa 77%, der sich allein aus dem Wegfall der Lohnkosten für den Fahrer ergibt. Der sequentielle Transport von Personen und Gütern durch dieselben Fahreinheiten hätte zur Konsequenz, dass zusätzliche Leerfahrten entstünden. Diese würden einerseits zu circa 50% - 60% mehr Tourenkilometern, andererseits zu einer deutlich höheren Auslastung der Gesamtfahrzeugflotte des Systems führen. Volkswirtschaftlich betrachtet ergäben sich leichte Vorteile des Leihkonzeptes gegenüber getrennten Fahrzeugflotten, die vor allem in der verringerten Fahrzeugzahl im System begründet wären. Hierbei wurden externe Effekte wie Emissionen, Materialfluss und Platzbedarf etc. nicht berücksichtigt. Diese dürften den Vorteil des Leihkonzeptes verstärken.

In Zukunft sollte die integrierte Bedienung des Personen- und Wirtschaftsverkehrs durch dieselben Fahrzeugflotten und deren Auswirkungen folglich genauer untersucht werden. Hierbei wäre zu klären, welche Segmente des Gütertransportes mit dem Personenverkehr unter welchen Bedingungen kombinierbar sind, wie groß zu erwartende Verminderungen hinsichtlich des Materialflusses, der CO₂-Bilanz und des Platzbedarfs ausfallen und wie Bedienkonzepte aussehen und Anreize geschaffen werden könnten. Es erscheint zudem wahrscheinlicher, dass solche Fahrzeuge eher von Transportdienstleistern wie On-Demand-Flottendiensten betrieben werden, als von Privatpersonen.

4.5 Modellrechnung aus verkehrlicher Sicht (TU Berlin)

4.5.1 Methodik u. Erkenntnisse zur Simulation automatisierter On-Demand-Shuttles

In vorangegangenen Kapiteln wurden Potentiale, Wirkungsfaktoren und Ausgestaltungsmöglichkeiten verschiedener Use cases automatisierter Fahrzeuge erläutert. Insbesondere nachfragegesteuerte Mobilitätskonzepte (On-Demand-Mobility) wurden mit einer hohen Zukunftsfähigkeit und starken Potentialen hinsichtlich der Flexibilisierung des Verkehrsangebots und der Effizienzsteigerung und somit auch der Umweltwirkung assoziiert.

Dieses Kapitel beschreibt eine simulative Wirkungsanalyse von automatisierten On-Demand-Shuttles im Untersuchungsraum Berlin. Es beinhaltet Ausführungen zum methodischen Vorgehen, Beschreibungen der simulierten Szenarien und Darstellungen von Ergebnissen. Das Hauptmerk der Auswertung liegt auf den verkehrlichen und ökologischen Wirkungen der automatisierten On-Demand-Shuttles, sowie auf ausgewählten Beobachtungen und daraus entstehenden Handlungsempfehlungen (für die Politik und handelnde Akteure).

4.5.1.1 Grundlagen der Methodik

Das Kernstück der Methodik stellt die Open-Source-Software Multi-Agent-Transport-Simulation, kurz MATSim, dar (Horni et. al 2016). Dieses Softwarepaket dient zur agenten- und aktivitäten-basierten, dynamischen Simulation von großskaligen Verkehrsräumen und zur Maßnahmen-sensitiven Untersuchung von systemrelevanten aber auch externen Effekten. MATSim verfügt über Module zur Abbildung von nachfragegesteuerten, autonomen Fahrzeugflotten (DRT für Englisch demand-responsive transport) und Frachtverkehren sowie jeweils deren Management und Planung. Im Rahmen des Projektes wurden diese Module erweitert und verfeinert, sowie erstmals für die in Abschnitt 4.4.4 geschilderte Studie kombiniert.

MATSim bildet den Tagesverlauf einzelner Reisender (Agenten) anhand von Plänen ab, die aus Aktivitäten an verschiedenen Standorten und den dazwischen liegenden Ortsveränderungen bestehen. Während der physikalischen Verkehrssimulation (vgl. 'mobsim' in Abbildung 102) wird das Verkehrsangebot, bestehend beispielsweise aus dem Straßennetz und dem Liniennetz des öffentlichen Verkehrs (ÖV), mit der Verkehrsnachfrage, repräsentiert durch die Summe aller Tagespläne der Reisenden, belastet. Hierbei kann es infolge der Interaktionen der Reisenden und Fahrzeuge zu Verzögerungen und Abweichungen vom jeweiligen Plan kommen. Im Anschluss an die physikalische Simulation bewertet jeder einzelne Reisende die Durchführung des Plans mit einem Score, der dessen generalisierten Nutzen widerspiegelt. Die bei Aktivitäten verbrachte Zeit ist positiv assoziiert, das Reisen (Reisezeit, monetäre Kosten, evtl. Umstiege etc) negativ. Bevor die physikalische Simulation erneut ausgeführt wird, passt ein Teil der Agenten den jeweiligen Tagesplan an. So werden Entscheidungsdimensionen wie Verkehrsmittel-, Routen- und Abfahrtszeitwahl modelliert. Durch sehr häufiges iteratives Durchschreiten dieser Prozessschritte wird ein stochastisches Nutzergleichgewicht approximiert (Horni et. al 2016).

PAVE

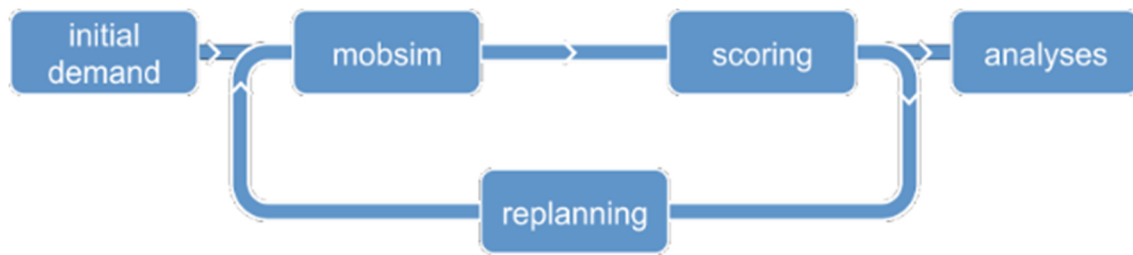


Abbildung 102: Simulationsflussdiagramm (Quelle: Horni et. al 2016)

Der beschriebene Prozess erlaubt zunächst kein reaktives Verhalten während der Verkehrssimulation. Das DRT-Modul zur Abbildung von On-Demand-Flotten greift daher auf zusätzliche Funktionalitäten zur Verfügung, die die spontane Zuweisung von Fahrzeugen zu entstehenden Nachfragepunkten (Dispatching) ermöglichen (Maciejewski 2016).

Die im Folgenden beschriebenen Erweiterungen wurden zumeist in einem projekteigenen GitHub-Repository (<https://github.com/matsim-vsp/pave>), oder zentral im MATSim-Framework (<https://github.com/matsim-org/matsim-libs>) durchgeführt. Beide Repositories sind frei zugänglich. Den Projektpartnern der OvGU wurde zudem Schreibzugriff auf das PAVE-Repository gewährt, welches das Projekt an das Open-Berlin-Szenario anbindet (siehe 4.7).

4.5.1.2 Erweiterung der Methodik: Strategische Repositionierung von Fahrzeugen

Während der Projektlaufzeit von PAVE wurde das DRT-Modul um Funktionen zur Abbildung von diversen Algorithmen für die strategische Re-Positionierung von leeren Fahrzeugen in Abhängigkeit dynamischer Parameter (Rebalancing) erweitert (Bischoff und Maciejewski 2020, Schlenther et. al 2021, Lu et. al 2021).

Zudem wurde eine Schnittstelle programmiert und der OvGU bereitgestellt, über die Algorithmen für das Dispatching und Rebalancing von außen austauschbar gemacht wurden. Diese Schnittstelle erlaubt die Verprobung und Optimierung von verschiedenen operativen Ansätzen. Koetschau et. al 2020 konnten auf dieser Basis zeigen, dass intelligente Schätzungen von Reisezeiten unter Berücksichtigung von Pufferzeiten das Spannungsfeld zwischen hoher Bedienqualität und operativen Kosten verkleinern können.

Des Weiteren wurde die Funktionalität des Rebalancing wurde im Rahmen mehrerer Studien hinsichtlich operativen und verkehrlichen Kenngrößen in verschiedenen Szenarien getestet. Lu et. al 2021 bestätigen die Erkenntnisse von Bischoff und Maciejewski 2020 und zeigen, dass die Nachfrage dank Rebalancing mit geringeren Wartezeiten bedient werden kann. Verschiedene Ansätze wirken sich verschieden aus. So können operative Kenngrößen wie gefahrene (Leer-) Kilometer im Gegensatz zu verkehrplanerischen Interessen wie einer möglichst flächendeckenden Fahrzeugverfügbarkeit und gleichverteilten Wartezeiten stehen. Dieser Problematik wurde sich im Detail in einer Studie für den Untersuchungsraum von PAVE in Berlin gewidmet. Schlenther et. al 2021 zeigen, dass ein DRT-Service ohne Rebalancing in Berlin kein einheitliches Angebotsniveau und damit ungleichen Zugang bietet. In Außenbezirken sind demnach die Wartezeiten circa zwei bis dreimal so hoch wie im Stadtinneren. Weiterhin stellen die Autoren fest, dass durch strategisches Rebalancing nicht nur ein ausgeglicheneres Angebotsniveau geschaffen werden kann, sondern sich auch die Gesamtnachfrage steigern lässt (vgl. Abbildung 103: , links ohne Rebalancing, rechts mit). Einheitliche Wartezeiten und das Niveau der Gesamtnachfrage scheinen hierbei in einem linearen Zusammenhang zu stehen.

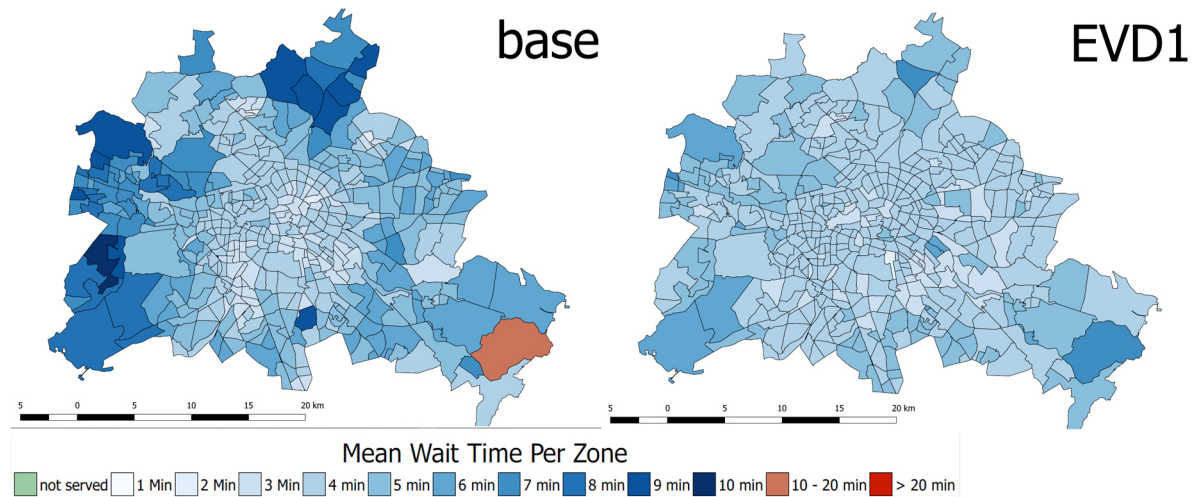


Abbildung 103: Mittlere Wartezeit je Zone ohne (base) und mit Rebalancing (EVD1).

Quelle: Darstellung nach Schlenther et. al 2021

Die Bereitstellung eines hohen Angebotsniveaus auch in Gebieten außerhalb der höchsten Nachfragekonzentration wird insbesondere wichtig im ländlichen Raum. Hier bieten automatisierte On-Demand-Shuttles das Potential, mobilitätsarme Personen neu anzubinden. Dafür sollten jedoch akzeptable Wartezeiten geschaffen werden. Wie die Studien von Lu und Maciejewski 2021 und Schlenther et. al 2021 zeigen, kann strategische Repositionierung von Fahrzeugen hierzu beitragen, kommt jedoch zum Preis einer höheren Laufleistung der Fahrzeuge. Daher sollten Anreize oder Regulierungsmöglichkeiten geschaffen werden, damit Anbieter sich nicht nur auf Gebiete mit hoher Nachfragedichte konzentrieren. Insbesondere im Beispiel von Berlin liegen diese im Stadtinneren vor, wo mit einem engmaschigen ÖV-Angebot, diversen Sharing-Konzepten und einer hohen Straßendichte bereits ein gutes Gesamtangebot für Mobilität herrscht.

4.5.1.3 Erweiterung der Methodik: Abschätzung der benötigten Flottengröße unter Annahme einer Zielwartezeit

Kaddoura et. al (2020b) haben während der Projektlaufzeit eine Methode zur Abschätzung der nötigen Flottengröße zur Bedienung einer sich in Abhängigkeit von Nutzerpreisen ergebenden Nachfrage unter der Vorgabe von einer Zielwartezeit entwickelt. So können operative Parameter des Flottenmanagements in regelmäßigen Abständen während des iterativen Simulationsprozesses (siehe Abbildung 95) angepasst werden. Zwischen den Anpassungen reagiert die Nachfrage auf diese Änderungen, sodass sich die Situation über den Verlauf der Simulation einem Gleichgewicht annähert.

4.5.1.4 Erweiterung der Methodik: Simulation von Dual-Use-Fahrzeugen

Im Rahmen des Projektes wurde die Simulation wurde dahingehend erweitert, Fahrzeuge abbilden zu können, die sowohl den Personen- als auch den Güterwirtschaftsverkehr bedienen. Zunächst wurde dies ausführlich für private autonome Fahrzeuge entwickelt und getestet. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 4.4.4 zusammengefasst.

Im Anschluss wurde das DRT-Modul von MATSim erweitert, um auch Flottenfahrzeuge simulieren zu können, die segmentübergreifend operieren. Diese Funktionalität konnte im Rahmen des Projektzeitraumes in synthetischen Testszenarios erprobt werden. Zudem wurde eine Abschlussarbeit (Master) ausgeschrieben, die die Machbarkeit einer Bedienung einer Personen- und Paketnachfrage durch autonome Flottenfahrzeuge untersucht. Diese Masterarbeit wurde nach Ende des Projektzeitraums im April 2021 abgeschlossen. Die Ergebnisse suggerieren, dass eine segmentübergreifende Operation

PAVE

von Flottenfahrzeugen hinsichtlich zeitlicher Verfügbarkeit der Fahrzeuge umsetzbar scheint und demnach das Potential bietet, die Gesamtanzahl von Fahrzeugen zu senken. In weiteren Studien und Projekten sollte man sich der technischen und operativen Machbarkeit sowie eingehenden Potentialanalysen widmen.

4.5.1.5 Erweiterung der Methodik: Abbildung von intermodalen Wegen

Um ein Szenario des PKW-Verbotes in der Innenstadt abbilden zu können, wurde das Routing in MATSim so erweitert, dass innerhalb einer Ortsveränderung zwischen zwei Aktivitäten zwischen dem PKW und einem On-Demand-Shuttle-Dienst umgestiegen werden kann. Dies bedeutet für das PKW-Verbot-Szenario, dass Reisende bei der Einreise ihr Auto am Rand der Verbotszone abstellen und anschließend ein Shuttle-Fahrzeug anfordern können bzw. dass sie bei der Ausreise von einem Shuttle-Fahrzeug in ihren eigenen PKW umsteigen können. Hierbei wird von automatisierten Privatfahrzeugen ausgegangen. Dies bedeutet, dass sich bei mehreren grenzüberschreitenden Wegen am Tag ein Umstiegsort von dem vorherigen bzw. nachfolgenden Umstiegsort unterscheiden kann.

4.5.1.5 Verfeinerung des Open-Berlin-Szenarios

Die Grundlage für die Untersuchungen der Use cases stellt das Open-Berlin-Szenario in MATSim dar (Ziemke et. al 2019). Dieses Szenario ist ein multi-modales, Aktivitäten-basiertes Szenario, das frei zugänglich ist und mit öffentlichen Daten erstellt wurde. Das Open-Berlin-Szenario wurde für die Untersuchung der Use cases Robotaxi und Pooling (siehe Abschnitte 4.4.1 bis 4.4.3) verfeinert.

In Absprache mit der INA wurden Charakteristiken der Mobilitätstypen (siehe zu Abschnitt 4.2.1) in Verhaltensparameter der Agenten in der Simulation übersetzt, sodass deren Charakteristiken sich auf Wahldimensionen wie die Verkehrsmittelwahl auswirken können. Beispielsweise nehmen "Sensation Seeker" neue Mobilitätsdienste wie einen On-Demand-Shuttle-Service weniger negativ bzw. besonders attraktiv war, was durch ein Anpassen der Modus-spezifischen Konstante (alternative specific constant) in der Nutzenfunktion modelliert wird (im Prozessschritt "scoring", siehe Abbildung 102). Diese projektspezifische Funktionalität wurde im PAVE-Repository umgesetzt.

Weiterhin wurde das Open-Berlin-Szenario selbst dahingehend aufgewertet, als dass die synthetische Bevölkerung mit personen-spezifischen Einkommensattributen ausgestattet wurde. Die Verteilung des Einkommens wurde an die Verteilung des Nettoäquivalenzeinkommens der Haushalte im Jahr 2013 angepasst (Statistisches Bundesamt 2018). Dies bewirkt, dass Agenten unterschiedlich sensitiv auf monetäre Preise für Mobilitätsangebote reagieren und führt somit zu einer realistischeren Nachfragereaktion auf On-Demand-Flotten. Im Anschluss an diese Modellverbesserung wurden die Verhaltensparameter für das Open-Berlin-Szenario neu kalibriert, um verkehrliche Kenngrößen zum Modal Split und zur Distanzverteilung der Modi gemäß der Mobilität in Deutschland (MiD) und somit den Ist-Zustand abzubilden.

4.5.1.6 Untersuchung der Skalierungseffekte von Pooling-Services

In agentenbasierten Verkehrssimulationen wird typischerweise nur ein repräsentativer Anteil (Sample Size) der Nachfrage simuliert. Im Open-Berlin-Szenario beträgt die Sample Size 10%. Aggregierte Ergebnisse bedürfen dementsprechend einer Hochrechnung. Dies ist für konventionelle Verkehrsmittel wie den PKW, das Fahrrad oder Taxi-Dienste ohne Weiteres möglich. Im Bereich von On-Demand-Flotten, die mehrere Anfragen per Pooling bündeln, ist jedoch die Nachfragedichte entscheidend für das Ausmaß, zu dem Anfragen gebündelt werden können.

Kaddoura und Schlenther (2020c) haben Skalierungseffekte von On-Demand-Flotten mit Pooling untersucht. Auf Basis dieser Untersuchung können genauere Hochrechnungen der Simulationsergebnisse erfolgen. So werden die simulierte Flottengröße und die Flottenfahrleistung im Gegensatz zur resultierenden Nachfrage nicht proportional zum simulierten Nachfrageanteil hochgerechnet.

4.5.2 Grundlegende Annahmen zur Simulation der Use cases Robotaxi und Pooling im Untersuchungsraum Berlin

Um die verkehrlichen und ökologischen Auswirkungen von automatisierten On-Demand-Flottendiensten abzuschätzen, wurde die in den vorherigen Abschnitten Methodenbausteine in Absprache mit den Projektpartnern angewandt. In die Modellierung sind die Folgenden Grundannahmen eingeflossen:

- Die On-Demand-Dienste werden als Teil des Beitrages des ÖPNV zur Daseinsvorsorge verstanden. Dies bedeutet, dass faktisch eine Beförderungspflicht herrscht und Transportanfragen von Personen nicht abgelehnt werden dürfen. Anbieter könnten in Realität hierauf mit schlechter Bedienqualität (hoher Wartezeit) in Gebieten reagieren, in denen sie ihre Profitabilität besonders gefährdet sehen. Dies würde technisch eine Umgehung der Beförderungspflicht bedeuten.
- Vor diesem Hintergrund wurde zunächst davon ausgegangen, dass On-Demand-Services regulatorischen Maßnahmen unterliegen. In Absprache mit dem Projektkonsortium wurde angenommen, dass die Zielgröße der Bedienqualität für On-Demand-Services durch das 95. Perzentil der Wartezeiten operationalisiert wird, das unter 7 Minuten liegen soll. Demnach sollten nur fünf Prozent der Wartezeiten über diesem Wert liegen. Dies soll flächendeckend im Bediengebiet gelten.
- Wie in Abschnitt 4.5.1.2 beschrieben, sind On-Demand-Flottendienste per se im Berliner Stadtkern dank einer höheren Nachfragedichte deutlich effizienter zu betreiben (Bischoff und Maciejewski 2016, Kaddoura et. al 2020a, Schlenther et. al 2021). Dies unterstreicht den Regulierungsbedarf. Aus diesem Grund wurden die Erkenntnisse aus 4.5.1.2 respektive aus Schlenther et. al 2021 genutzt, um durch strategische Repositionierung das Wartezeitenniveau im Bediengebiet möglichst gleich zu halten. Zudem wurde die in Abschnitt 4.5.1.3 beschriebene Methodik genutzt, um in Abhängigkeit sich in Folge der Nutzerpreise ergebenden Nachfrage und der erwähnten Zielwartezeit die nötige Flottengröße abzuschätzen. Die resultierenden Fahrzeugzahlen sind als Orientierungswert für eine Obergrenze zu verstehen und können durch intensivere Optimierung von Dispatch, Rebalancing oder durch eine Anpassung der Zielwartezeit geringer ausfallen.
- Die Nutzerpreise für einen Robotaxi-Service liegen über dem Niveau der Nutzerpreise für einen Pooling-Service. Dies liegt in der Angebotsqualität begründet. Da ein Robotaxi den Passagier auf direktem Weg transportiert, ist die Reisezeit im Allgemeinen niedriger. Zudem kann der Anbieter nicht mehrere Anfragen auf einmal bedienen, was Auswirkungen auf die Effizienz hat. Weiterhin tragen im Fall des Poolings bereits besetzte Fahrzeuge zur räumlichen Abdeckung des Bediengebietes und damit zu niedrigen Wartezeiten bei.
- Es wird von einem Preismodell mit zwei Komponenten ausgegangen: von einem Basispreis, der pro Beförderungsfall einmalig zu zahlen ist, und von einer distanzabhängigen Preiskomponente. Ein Basispreis bewirkt, dass kurze Fahrten unattraktiver werden. Dies wiederum verhindert, je nach Höhe, dass insbesondere Wege zu Fuß und mit dem Fahrrad seltener durch eine Fahrt mit dem On-Demand-Service ersetzt werden. Dies ist wünschenswert, um das Fahrzeugaufkommen auf der Straße, und damit externe Effekte des Verkehrs, nicht zu steigern.

- Die Umweltwirkungen wurden Kaddoura et. al 2021 berechnet, die sich auf das Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr (HBEFA) stützen (INFRAS 2019). Hierbei wurde für Flotte der Privatfahrzeuge die im HBEFA angegebene Verteilung der Antriebsstränge für 2020 auch für die Zukunftsszenarien angenommen, während die Flotten der On-Demand-Dienste als vollständig elektrisiert modelliert wurden. Durch dieses Vorgehen kann die Umweltwirkung des On-Demand-Dienstes isoliert und direkt betrachtet und bewertet werden. In der Ergebnisbetrachtung wird sich auf den direkten CO₂-Ausstoß der Fahrzeuge konzentriert. Die Modellrechnungen umfassen dabei auch weitere Partikel wie Feinstaub und NO_x. Diese sind auf der Projektwebseite ebenfalls visualisiert (siehe unten)

4.5.3 Wesentliche Erkenntnisse aus der Simulation automatisierter On-Demand-Shuttles

Nachfolgend werden die wichtigsten Teilergebnisse und Erkenntnisse aus den Simulationsexperimenten diskutiert. Dazu sei darauf hingewiesen, dass alle wesentlichen Ergebnisse der Simulationsexperimente, die die Grundlage für die nachfolgend geschilderten Erkenntnisse darstellen, auf der Domain *vsp.berlin/pave* veröffentlicht und interaktiv visualisiert wurden. Im Folgenden wird der Bereich im inneren des Berliner S-Bahn-Ringes als Innenstadt oder als Hundekopf bezeichnet. Dieser Bereich ist in einem Teil der Simulationsexperimente als Bediengebiet für automatisierte On-Demand-Shuttles deklariert und einem Bediengebiet in der gesamten Stadt gegenübergestellt worden.

Die Tabelle 35 fasst die Ergebnisse aus jenen Simulationsexperimenten zusammen, in denen die Bedienformen einzeln und ohne Begleitmaßnahmen angeboten wurden. Weitere Metriken und Simulationen sind auf der oben genannten Webseite in visualisierter Form zu finden.

Bedienform - Bediengebiet	Nutzerpreis	Nach- frage [Fahr- ten]	Flotten- größe [Fz]	geschätzter Jahresgewinn Operateur [Mill. €]	Veränderung der Verkehrsleistung in Berlin ggü. Basisfall [Fzg- Km]	Veränderung des direkten CO ₂ -Ausstoßes in Berlin ggü. Basisfall [t]
Robotaxi - gesamte Stadt	2,00 € + 0,20 €/km	523.530	23.490	150,2	5.97%	-2.95%
Robotaxi - gesamte Stadt	2,50 € + 0,20 €/km	306.030	14.900	128,4	3.63%	-1.89%
Robotaxi - gesamte Stadt	3,00 € + 0,20 €/km	160.850	8.500	86,6	2.05%	-0.93%
Robotaxi - Innenstadt	2,00 € + 0,20 €/km	130.530	4.270	53,3	1.47%	-0.77%
Robotaxi - Innenstadt	2,50 € + 0,20 €/km	71.020	2.490	39,6	0.76%	-0.60%
Robotaxi - Innenstadt	3,00 € + 0,20 €/km	37.620	1.530	25	0.33%	-0.49%
Pooling - gesamte Stadt	0,50 € + 0,20 €/km	1.860.0 40	30.380	57,6	11.09%	-5.78%
Pooling - gesamte Stadt	0,75 € + 0,20 €/km	1.495.4 60	25.172	166,9	9.45%	-4.88%

Pooling - gesamte Stadt	1,00 € + 0,20 €/km	1.183.5 60	19.964	234,3	7.82%	-3.98%
Pooling - gesamte Stadt	1,00 € + 0,30 €/km	850.090	14.361	256,8	5.46%	-2.56%
Pooling - gesamte Stadt	1,00 € + 0,10 €/km	1.578.7 90	26.908	99,1	10.80%	-6.09%
Pooling - gesamte Stadt	1,50 € + 0,20 €/km	719.240	13.020	254,4	5.29%	-2.60%
Pooling - Innenstadt	0,50 € + 0,20 €/km	511.330	7.595	22,5	2.62%	-1.17%
Pooling - Innenstadt	0,75 € + 0,20 €/km	409.920	6.293	52,1	2.14%	-1.05%
Pooling - Innenstadt	1,00 € + 0,20 €/km	326.070	4.774	73,2	1.63%	-1.03%
Pooling - Innenstadt	1,00 € + 0,30 €/km	239.090	2.726	84,2	1.31%	-0.66%
Pooling - Innenstadt	1,00 € + 0,10 €/km	418.810	6.510	44,5	2.34%	-1.15%
Pooling - Innenstadt	1,50 € + 0,20 €/km	198.530	3.299	74,3	1.03%	-0.89%

Tabelle 35: Zusammenfassung der Ergebnisse aus ausgewählten Simulationsexperimenten

4.5.3.1 Allgemeine Erkenntnisse

Die Kombination aus zugrunde gelegtem Zonen-System (Lebensweltlich orientierte Räume - Ebene Planungsraum, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen Berlin 2020) und der **Zielvorgabe von 95% der Wartezeiten unter 7 Minuten ist schwer erreichbar**. Dies ist einerseits darin begründet, dass vor allem die Nutzer in abgelegenen Ecken des Netzes am ehesten profitieren von dem Service profitieren. Diese produzieren jedoch die höchsten Wartezeiten (also auch bei kleiner Gesamtnachfrage). Zudem sind die mittleren Anfahrtzeiten insbesondere in den großen Zonen zu hoch, diese werden aber mit sinkenden Preisen und steigender Gesamtnachfrage stärker nachgefragt. Als Resultat steigt der approximierter Fahrzeugbedarf in der Simulation stark an. Methodisch wurde daher der Flottenbedarf plausibilisiert, indem eine minimale Flottenauslastung in der Spitzenzeit von 50% angenommen wurde. Dieser Wert kann nicht unendlich erhöht werden, da eine gewisse Anzahl an Fahrzeugen benötigt wird, um die Wartezeitvorgabe flächendeckend zu erfüllen. Die Wartezeitvorgabe wurde folglich zu einer weichen Randbedingung erklärt. Als Resultat liegt das 95. Perzentil der Wartezeit zwischen 6,8 Minuten und 8,1 Minuten im Pooling use case bzw zwischen 6,6 Minuten und 7,6 Minuten im Robotaxi use case.

Die Bedienform des Robotaxi ist weniger attraktiv als Pooling. Die Begründung hierfür liegt einerseits im höheren Preis und andererseits darin, dass die Pooling-Rate mit Werten von circa 1,4 bis 1,5 Passagierkilometern pro Lastkilometer niedriger ausfällt, als teilweise erwartet. Somit ist die Wahrscheinlichkeit, auch im Pooling-Service eine Angebotsqualität auf Robotaxi-Niveau zu bekommen, recht hoch. Die simulierte Poolingrate unterschätzt tendenziell reale Pooling-Raten, da nur

PAVE

mit Samples der Population gerechnet wird und die Poolingrate von der Nachfragedichte abhängt. Untersuchungen der OvGU haben jedoch ebenfalls ergeben, dass Pooling-Raten von über 1,8 nur sehr schwer erreichbar sind. Da die Profitabilität der Pooling-Services höher ist, würde sich im Wettbewerb ein solcher Service gegenüber der Bedienform Robotaxi durchsetzen. Dies wäre auch aus verkehrsplanerischer Sicht sinnvoll, da Bündelungseffekte gewollt sind. In einem Teil der Simulationsexperimente wurden beide Bedienformen im Wettbewerb angeboten. In diesen Simulationsexperimenten wurde davon ausgegangen, dass der Robotaxi-Service im Bereich des Hundekopfes in der Innenstadt operiert, während Pooling im gesamten Stadtgebiet angeboten wird.

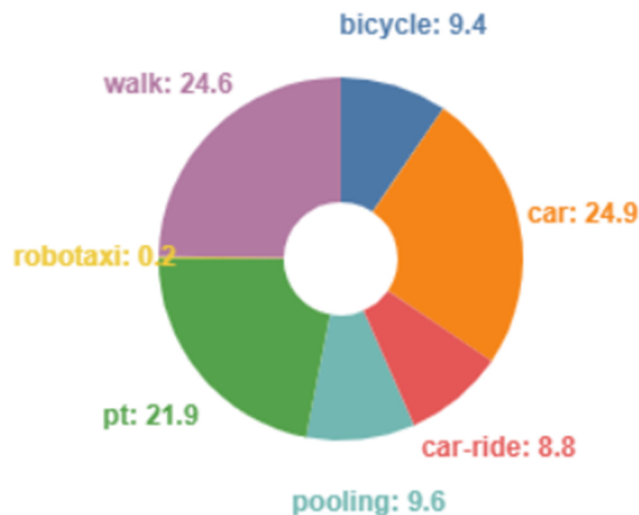


Abbildung 104: Modal Split für Berlin aus der Simulation beider Bedienformen im Wettbewerb.

‘pt’ steht für ‘Public Transport’, also den öffentlichen Verkehr. ‘car-ride’ sind PKW-Mitfahrende.

Abbildung 104 stellt den sich in der Simulation ergebenden Modal Split dar, wenn für beide Services ein Kilometerpreis von 0,20 €/km, sowie für den Robotaxi-Service ein Einstiegspreis von 2 € und für den Pooling-Service ein Einstiegspreis von 1 € fällig wird.

Beide Bedienformen führen zu einer Steigerung des Verkehrsaufkommens. Dies ist hauptsächlich durch den hohen Anteil der Wechsler vom Umweltverbund, die die PKW-Abschaffenden überkompensieren, sowie durch die zusätzlichen Leerfahrten zu begründen. Beispielsweise liegt in der Simulation der Anteil der Nutzer, die vorher für den entsprechenden Weg den PKW benutzten, bei einem Preis von 1,50 € + 0,20 €/km bei 26,7 %. Demgegenüber liegt dieser Anteil bei einem Preis von 0,50 € + 0,20 €/km bei 21,6 %. Wie aus Tabelle 35 abzulesen, hängt die Steigerung des Verkehrsaufkommens mit der Gesamtnachfrage des On-Demand-Systems und somit mit den Nutzerpreisen zusammen. Daher sollten aus verkehrlicher Sicht zu billige Preise vermieden werden. Dies unterstreicht, dass ein **Einstiegs- oder ein Mindestpreis von hoher verkehrlicher Bedeutung** ist. Je höher die Nutzerpreise sind, desto geringer fällt die Gesamtnachfrage aus. Allerdings steigt auch der operative Gewinn - sowohl absolut, als auch pro Fahrzeug. Der Gewinn pro Fahrzeug ist bei gleichen Nutzerpreisen für das Bedienebiet Innenstadt immer höher im Vergleich zum Bedienebiet der ganzen Stadt. Dies unterstreicht die eingangs formulierte These und damit einen **Regulierungsbedarf**, da sich Anbieter in einer freien, nicht-monopolistischen Marktsituation in den Bereich der höchsten Effizienz bzw. Gewinnrate zurückziehen würden. Dieser Regulierungsbedarf könnte beispielsweise über Flächenlizenzen gedeckt werden.

PAVE

Abbildung 105 stellt die Veränderung des Verkehrsaufkommens für Nutzerpreise von 0,50 € + 0,20 €/km für einen Pooling-Service dar. Es ist zu erkennen, dass die Einführung eines Shuttle-Service zu einer flächendeckenden Steigerung des Verkehrsaufkommens im jeweiligen Bediengebiet führt. Das zusätzliche Verkehrsaufkommen auf den Hauptadern des Berliner Straßennetzes beträgt größtenteils zwischen 200 Fzg/Tag und 500 Fzg/Tag. Im Falle des Bediengebietes der Innenstadt ist außerhalb des Bediengebietes auf einigen Straßenzügen ein sehr leichter Rückgang von circa 50 Fzg/Tag zu beobachten.

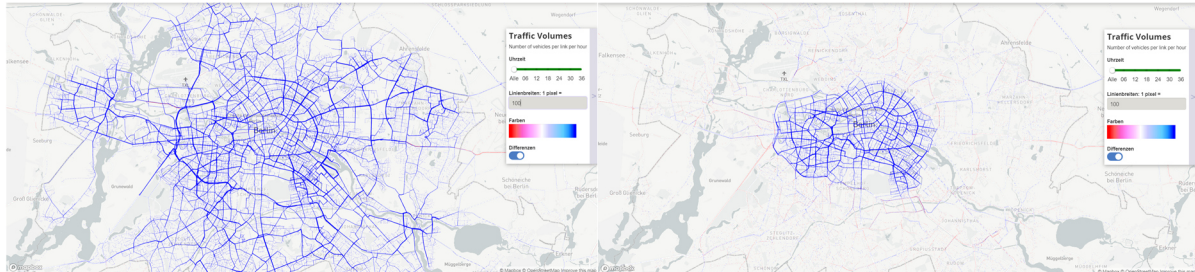


Abbildung 105: Veränderung des Verkehrsaufkommens

Links: Bediengebiet ganze Stadt. **Rechts:** Bediengebiet Innere Stadt. Blaue Straßenzüge bedeuten eine Steigerung, rote Straßenzüge einen Rückgang des Verkehrsaufkommens, wobei die kleinste dargestellte Breite einer Veränderung von 100 Fzg/Tag bedeutet.

Eine Einführung von elektrischen On-Demand-Shuttles führt generell zu einer Minderung des direkten CO₂-Ausstoßes des Verkehrs. Dies ist dadurch begründet, dass Fahrten mit dem PKW teilweise ersetzt werden und die elektrischen Fahrzeuge keinen direkten CO₂-Ausstoß produzieren. Somit stellen sich in Bezug auf diese Metrik keine negativen Effekte durch Wechsler vom Umweltverbund auf den Shuttle-Service ein. Dies bedeutet, dass die Minderung des direkten CO₂-Ausstoßes direkt mit der Nachfrage nach dem Shuttle-Service zusammenhängt. Je mehr Nachfrage der On-Demand-Dienst anzieht, desto höher ist die CO₂-Einsparung. Bei billigen Preisen, die zu einer hohen Nachfrage führen, wächst jedoch der Anteil der Wechsler vom Umweltverbund, was wiederum zu einer höheren Steigerung des Verkehrsaufkommens und somit zu potentiell mehr Stau Problemen führt (siehe oben).

Abbildung 106 stellt die simulierte CO₂-Wirkung eines On-Demand-Pooling-Dienstes bei unterschiedlichen Einstiegspreisen dar. Es ist auf einigen Abschnitten von Hauptadern außerhalb der Innenstadt eine Steigerung des CO₂-Ausstoßes zu erkennen. Diese punktuellen Steigerungen werden jedoch von der Innenstadt nach außen abnehmenden Minderung des CO₂-Ausstoßes kompensiert. Die stärksten Reduktionen sind auf den Hauptstraßen in der Innenstadt zu beobachten und liegen in der Größenordnung von 30 bis 70 g/m pro Tag. Abbildung 106 illustriert darüber hinaus die indirekte Wirkung des Einstiegspreises für den Shuttle-Dienst auf die CO₂-Bilanz des Verkehrssystems. Wie oben erläutert, trägt der elektrische Shuttle-Dienst bei gleichbleibender Verteilung der Antriebe privater Fahrzeuge zur Verminderung des CO₂-Ausstoßes des Verkehrs bei. Dieser Effekt ist bei niedrigeren Preisen höher.

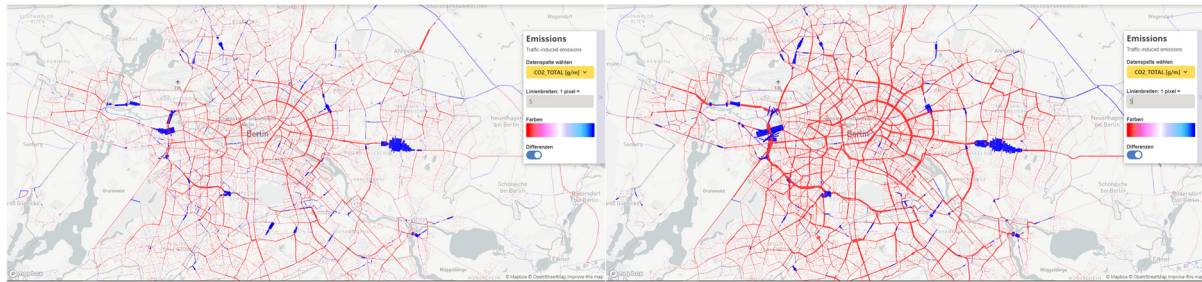


Abbildung 106: Veränderung des direkten CO₂-Ausstoßes durch Fahrzeuge

Links: Nutzerpreis 1,50 € + 0,20 €/km. **Rechts:** Nutzerpreis 0,50 € + 0,20 €/km. Blaue Straßenzüge bedeuten eine Steigerung, rote Straßenzüge einen Rückgang des CO₂-Ausstoßes, wobei die kleinste dargestellte Breite einer Veränderung von 5 g/m am Tag bedeutet. Dargestellt ist der Ausstoß pro Meter, um die unterschiedliche Länge von Straßenzügen zu berücksichtigen.

4.5.3.2 Simulation begleitender regulatorischer Maßnahmen

In Verknüpfung an die Szenarientwicklung dieses Projektes und insbesondere an “das schöne kollektive Szenario” (siehe Abschnitt 4.1.2) wurde in Simulationsexperimenten untersucht, wie eine zusätzlich zur Einführung beider Bedienformen (Robotaxi und Pooling) erhobene PKW-Maut wirkt, die nur für Privatfahrzeuge anfällt. Zudem wurde untersucht, wie sich ein PKW-Verbot in der Innenstadt auswirken könnte, wenn als Substitutionsangebot ein Pooling-Service eingeführt wird. In der Folge werden die wesentlichen Erkenntnisse dieser Untersuchungen zusammengefasst.

Für die Wirkungsanalyse einer PKW-Maut wurde von einer Distanzmaut ausgegangen, die sich für PKW-Nutzende in den variablen Kosten niederschlägt. Diese Maut fällt für alle PKW-Fahrten und somit flächendeckend an. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurde untersucht, welche Auswirkungen sich ergeben, wenn sich die variablen Kosten von 0,20 €/km verdoppeln bzw. verdreifachen (Ziemke et. al 2019). Die Fixkosten für den PKW betragen 5,30 €/Tag. Dies wurde für verschiedene Kombinationen von Nutzerpreisen für beide Services durchgeführt. Die Wirkungsweise und -schwere der Maut ist hierbei nicht wesentlich von den Preisstrukturen der Services abhängig. Aus diesem Grund wird nachfolgend exemplarisch und entsprechend zum obigen Beispiel von einem Distanzpreis von 0,20 €/km für beide Services und einem Einstiegspreis von 1 € für den Pooling-Service und einem Einstiegspreis von 2 € für den Robotaxi-Service ausgegangen.

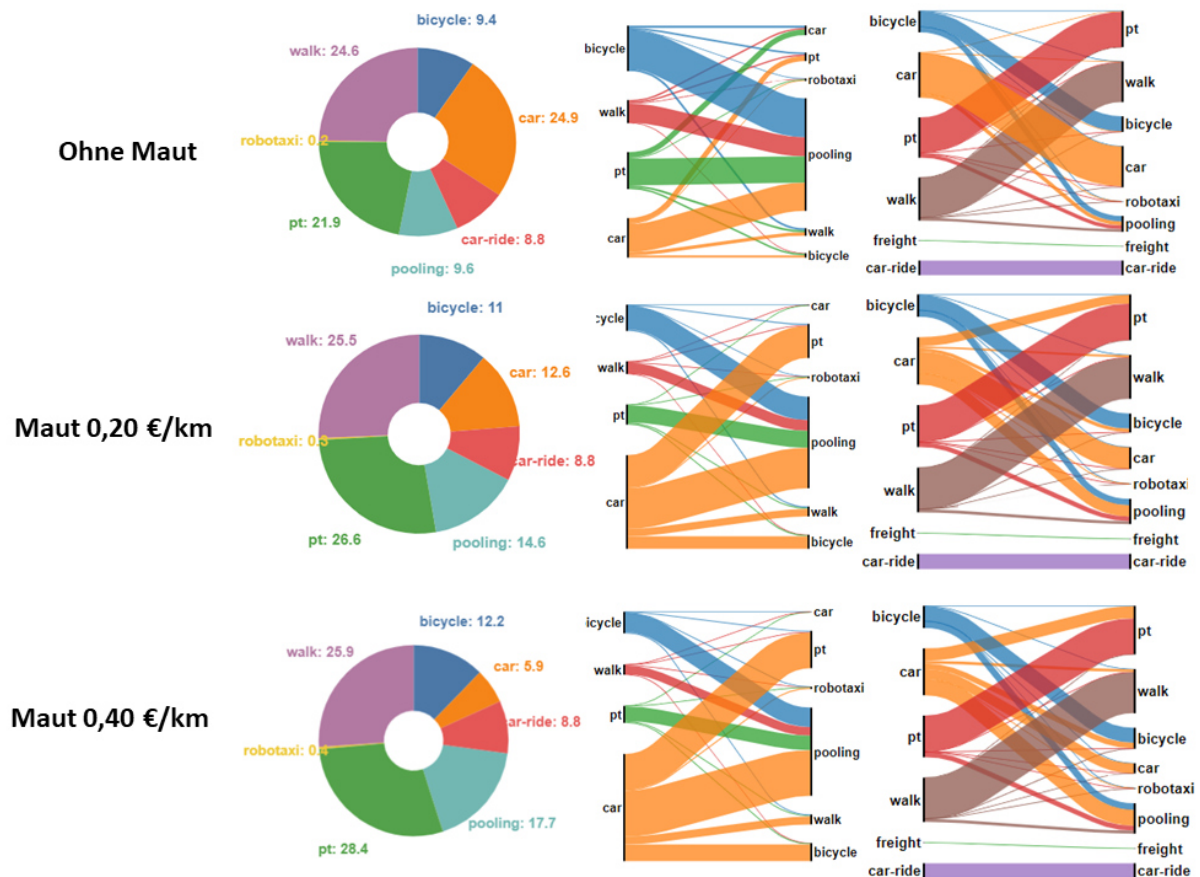


Abbildung 107: Effekte einer PKW-Distanzmaut auf den Modal Split in Berlin.

Links: sich in der Simulation ergebender Modal Split. **Mitte:** Moduswechsel-Diagramme nur mit Wegen für die sich das Verkehrsmittel im Vergleich zum Basisfall (linke Seite des Diagramms) im Planfall (rechte Seite des Diagramms) ändert. **Rechts:** Moduswechsel-Diagramm mit allen Wegen.

Abbildung 107 zeigt die Auswirkungen der PKW-Maut auf den Modal-Split. Hierbei zeigt sich, dass eine Verdopplung der variablen Nutzerkosten von 0,20 €/km auf 0,40 €/km den Anteil der Wege mit dem privaten PKW circa halbiert. Eine weitere Erhöhung um 0,20 €/km auf 0,60 €/km zieht eine weitere Halbierung mit sich. Der größte Teil der ehemaligen PKW-Wege werden mit dem Pooling-Service zurückgelegt. Eine Einführung der Maut erhöht jedoch den Anteil derjenigen PKW-Wege, die mit dem Umweltverbund (bicycle, walk, pt) substituiert werden. Diese Effekte führen in Summe zu einer starken Reduktion der Fahrleistung auf der Straße. Ohne Maut würde die Einführung beider Bedienformen die Fahrleistung im Vergleich zum Basiszenario um circa 7,8% (nach oben diskutierten Begründungen) steigern. Die zusätzliche Einführung einer Distanzmaut in Höhe der variablen PKW-Kosten, also 0,20 €/km, senkt in der Simulation die Fahrleistung um 27,7% im Vergleich zum Basisfall. Im Falle einer PKW-Distanzmaut von 0,40 €/km senkt sich die Fahrleistung um 46,6% gegenüber dem Basisfall.

Die Distanzmaut wirkt über die Fahrleistung hinaus zusätzlich positiv auf den direkten CO₂-Ausstoß des Verkehrs. Vermindert die Einführung des Substitutionsangebotes alleine den CO₂-Ausstoß in Berlin in der Simulation um 4% gegenüber dem Ist-Zustand, so steigt dieser Wert bei zusätzlicher Einführung einer Distanzmaut von 0,20 €/km auf 53,5% und liegt für eine Maut von 0,40 €/km gar bei 79%. Zudem könnten durch Einführung der Maut Einnahmen in Höhe von circa 3,6 Millionen € bis 3,9 Millionen € am Tag entstehen.

PAVE

Sollen automatisierte On-Demand-Shuttles zur Erfüllung politischer Ziele der CO₂-Reduktion beitragen, ist folglich eine Begleitmaßnahme zur Einführung der Shuttles zu empfehlen. Die reine Einführung einer sogenannten “Pull-Maßnahme”, also einer zusätzlichen Option bzw. eines zusätzlichen Anreizes, hat in der Simulation bezüglich der CO₂-Reduktion nur geringe positive Auswirkungen und steigert die Verkehrsleistung auf der Straße. Durch Kombination mit einer “Push-Maßnahme” lassen sich jedoch stärkere Reduktionen des CO₂-Ausstoßes und der Verkehrsleistung erreichen. Die Kombination einer (harten) “Push-Maßnahme” mit einem Substitutionsangebot lässt sich bezüglich der Nutzerakzeptanz vermutlich politisch besser durchsetzen, als die reine Durchsetzung der “Push-Maßnahme”. Hierbei ist zu beachten, dass die hier angenommenen Mautpreise tendenziell hoch und nur schwer als initiale Werte durchzusetzen sind. Die Ergebnisse zeigen jedoch klare Verläufe der Verbesserungen des Verkehrsgeschehens und seines ökologischen Fußabdruckes auf und sind in abgeschwächter Form auch bei geringeren Mautpreisen zu erwarten.

In einem weiteren Simulationsexperiment wurde die Wirkung eines **Verbotes privater PKWs in der Innenstadt** bei gleichzeitigem Einführen eines Substitutionsangebotes in Form eines Pooling-Services, der nur im Stadtinneren operiert, untersucht. In diesem Fall wurde von einem Nutzerpreis von 0,50 € + 0,20 €/km ausgegangen. In dem simulierten Szenario ist die Stadtautobahn A100 weiterhin für den privaten MIV zugelassen, sodass der Durchgangsverkehr weiterhin über diese Ader fließen kann. Die Verbotszone ist durch die Stadtautobahn bzw. den S-Bahn-Ring umrandet. In der Randzone können Reisende zwischen dem privaten PKW und dem Shuttle-Service umsteigen.

Abbildung 108: zeigt die Auswirkungen des Szenarios auf den Modal Split in Berlin. Der Anteil der mit dem privaten PKW zurückgelegten Wege halbiert sich etwa. Ein Großteil der Wege wird mit dem Umweltverbund substituiert. Da ein Umstieg zwischen privatem Auto und Shuttle-Service nicht nur monetär sondern auch zeitlich kostenintensiv ist, ergibt sich nur ein kleiner Prozentsatz derartiger intermodaler Wege. Berücksichtigt man die intermodalen Wege bei der Wechseldynamik, so ergibt sich ein höherer Anteil jener On-Demand-Shuttle-Nutzenden, die für den gleichen Weg im Basisszenario den privaten PKW benutzt haben, als im Vergleichsszenario ohne PKW-Verbot. Insgesamt ist die Anzahl der Pooling-Fahrten im Vergleich zum Szenario mit demselben Angebot (Nutzerpreis und Bediengebiet) aber ohne privates PKW-Verbot um circa 58 % höher.

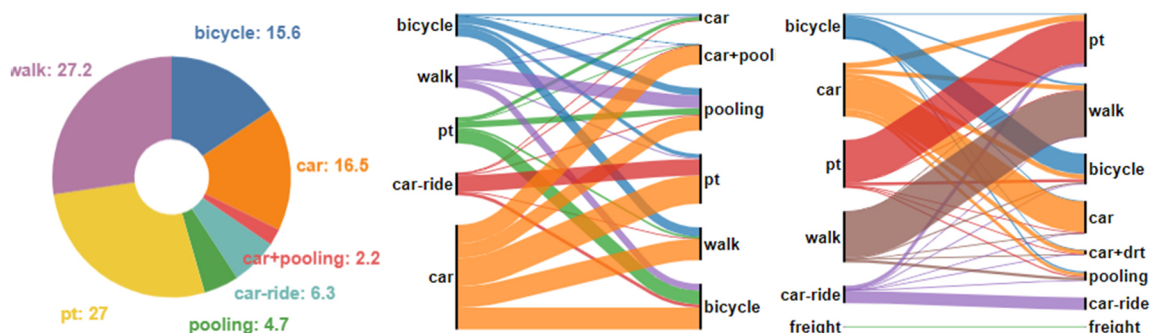


Abbildung 108: Modal Split und Modal Shift im PKW-Verbotsszenario.

Links: Modal Split. **Mitte:** Moduswechsel-Diagramm nur für Wege, für die das Verkehrsmittel gewechselt wird. **Rechts:** Moduswechsel-Diagramm mit allen Wegen.

Abbildung 109: stellt die verkehrlichen und ökologischen Wirkungen des Szenarios im Vergleich zum Ist-Zustand dar. Es ist zu erkennen, dass es zu einer Steigerung des Fahrzeugaufkommens auf der Stadtautobahn A100 in Höhe von bis zu circa 2500 Fahrzeugen am Tag kommt. Dies liegt daran, dass hier der Grenzbereich der PKW-Verbotsszone liegt. Im Innenstadtbereich sinkt das

PAVE

Fahrzeugaufkommen auf allen Hauptstraßen deutlich um Werte von teilweise 2000 Fz/Tag (Bereiche wie Mühlendamm, Hohenzollerndamm, Landsberger Allee). In den Nebenstraßen ist hingegen teilweise ein leichter Anstieg des Fahrzeugaufkommens in Höhe von circa 100 Fz/Tag bis 300 Fz/Tag zu beobachten. Dies ist durch häufigere Durchquerungen der Flottenfahrzeuge bzw. deren Leerfahrten zu begründen. Insgesamt verringert sich das Fahrzeugaufkommen in ganz Berlin um circa 9% gegenüber dem Ist-Zustand. Im Vergleich zum Szenario ohne PKW-Verbot und demselben Pooling-Angebot verringert sich das Fahrzeugaufkommen um circa 12%. Im linken Bereich von Abbildung 109 ist die Veränderung des direkten CO₂-Ausstoßes gegenüber dem Ist-Zustand zu erkennen. Während im Bereich der Innenstadt der Straßenverkehr nun keinen direkten CO₂-Ausstoß mehr aufweist, steigert sich der Ausstoß auf der Stadtautobahn in den Bereichen des höheren Fahrzeugaufkommens um bis zu 600 g/m pro Tag. Insgesamt wird in Berlin im Vergleich zum Basisfall circa 18,2 % weniger CO₂ direkt durch den Verkehr emittiert. Im Vergleichsszenario ohne PKW-Verbot beträgt die Reduktion des CO₂-Ausstoßes in Berlin gegenüber dem Basisfall circa 1,2 %.

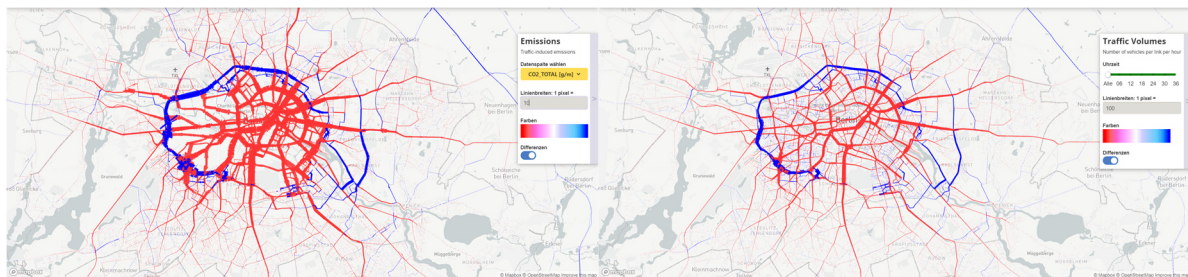


Abbildung 109: Räumliche Wirkung des PKW-Verbots in der Innenstadt.

Links: Veränderung des Direkten CO₂-Ausstoßes des Verkehrs gegenüber dem Ist-Zustand in g/m. Es ist zu beachten, dass im Gegensatz zu oben die geringste dargestellte Breite einem Ausstoß von 10 g/m entspricht. **Rechts:** Veränderung des Verkehrsaufkommens gegenüber dem Ist-Zustand in Fz/Tag. Die geringste dargestellte Breite entspricht einer Veränderung von 100 Fz/Tag. Die Farbkodierung entspricht denen in Abbildung 106 und Abbildung 105.

4.5.4 Zusammenfassung

Dieses Kapitel beschreibt eine simulative Wirkungsanalyse von automatisierten On-Demand-Shuttles im Untersuchungsraum Berlin. Es beinhaltet Ausführungen zum methodischen Vorgehen, Beschreibungen der simulierten Szenarien und Darstellungen von Ergebnissen. Das Hauptmerk der Auswertung liegt auf den verkehrlichen und ökologischen Wirkungen der automatisierten OnDemand-Shuttles, sowie auf ausgewählten Beobachtungen und daraus entstehenden Handlungsempfehlungen (für die Politik und handelnde Akteure).

Das Kernstück der Methodik stellt die Open-Source-Software Multi-Agent-Transport-Simulation, kurz MATSim, dar. Im Rahmen des Projektes wurden die MATSim-Module erweitert und verfeinert, Schnittstellen zur Verprobung und Optimierung von verschiedenen operativen Ansätzen des Projektpartners OvGU geschaffen:

- Während der Projektlaufzeit von PAVE wurde das DRT-Modul um Funktionen zur Abbildung von diversen Algorithmen für die strategische Re-Positionierung von leeren Fahrzeugen in Abhängigkeit dynamischer Parameter (Rebalancing) erweitert.
- Die strategische Repositionierung von Fahrzeugen auch in Gebieten außerhalb der höchsten Nachfragekonzentration. Das ist insbesondere wichtig im ländlichen Raum und kann zu

PAVE

akzeptablen Wartezeiten beitragen, führt jedoch zum Preis einer höheren Laufleistung der Fahrzeuge.

- Entwicklung einer Methode zur Abschätzung der nötigen Flottengröße zur Bedienung einer Nachfrage unter der Vorgabe von einer Zielwartezeit.
- Simulationsverfahren von Dual-Use-Fahrzeugen, die sowohl im Personen- als auch dem Güterwirtschaftsverkehr eingesetzt werden können.
- Routing zur Abbildung von intermodalen Wegen mit privat Pkw und On-Demand-Shuttle-Diensten.
- Verfeinerung des Open-Berlin-Szenarios mit Ergebnissen der PAVE-Befragung wie dem Verhalten der Mobilitätstypen und Ausstattung der Agenten mit Einkommensattributen.
- Methode zur Berücksichtigung der Nachfragedichte zur Skalierung der Flottengrößen und Fahrleistungen für On-Demand-Flotten.

Mit dem so modifizierten MATSim-Modell wurden umfangreiche Simulationsexperimente für Robotaxi- und Pooling-Dienste und die innere und gesamte Stadt durchgeführt (zum Teil veröffentlicht unter der Domain vsp.berlin/pave). Eine Simulation liefert für gegebene Parameter alle wesentlichen Kenngrößen eines On-Demand-Dienstes. Die Abhängigkeit der Nachfrage und der Kosten kann durch Parametervariationen des Preises und des Servicelevels – hier die Wartezeit - abgeschätzt werden. Der Gewinn pro Fahrzeug ist bei gleichen Nutzerpreisen für das Bedienegebiet Innenstadt immer höher im Vergleich zum Bedienegebiet der ganzen Stadt. Gewinnorientierte Anbieter würden sich in den Bereich der höchsten Effizienz bzw. Gewinnrate zurückziehen. Das Ziel einer guten Versorgung auch abgelegener Gebiete kann nur durch Regulierungen sichergestellt werden.

Die Zielvorgabe von 95% der Wartezeiten unter 7 Minuten ist schwer erreichbar und ein wesentlicher Grund für eine Pooling-Rate mit Werten von circa 1,4 bis 1,5 Passagierkilometern pro Lastkilometer, die niedriger ausfällt als erwartet. Beide Bedienformen, Robotaxi und Pooling, führen zu einer Steigerung des Verkehrsaufkommens. Dies ist hauptsächlich durch den hohen Anteil der Wechsler vom Umweltverbund, die die Wechsler vom Pkw überkompensieren, sowie durch die zusätzlichen Leerfahrten zu begründen. Die Flotten der On-Demand-Shuttles erneuern sich wegen der hohen Fahrleistungen schneller als privat Pkw. Sie besitzen deshalb die neuste umweltfreundliche Technologie und mindern damit die Emissionen des Verkehrs. So führt die Einführung von elektrischen On-Demand-Shuttles generell zu einer Minderung des direkten CO₂-Ausstoßes des Verkehrs.

Da verkehrsreduzierende Effekte durch AVF-Mobilitätsdienste nicht erreicht werden, wurde die Wirkung regulatorischer Maßnahmen abgeschätzt. Ziemke untersuchte, welche Auswirkungen eine Distanzmaut hat, wenn sich die variablen Kosten des Pkw von 0,20 €/km verdoppeln bzw. verdreifachen (Ziemke et. Al 2019). Exemplarisch zum obigen Beispiel wird von einem Distanzpreis von 0,20 €/km für beide Services und einem Einstiegspreis von 1 € für den PoolingService und einem Einstiegspreis von 2 € für den Robotaxi-Service ausgegangen. Hierbei zeigt sich, dass eine Verdopplung der variablen Nutzerkosten von 0,20 €/km auf 0,40 €/km den Anteil der Wege mit dem privaten PKW circa halbiert. Eine weitere Erhöhung um 0,20 €/km auf 0,60 €/km zieht eine weitere Halbierung mit sich. Der größte Teil der ehemaligen PKW-Wege werden mit dem Pooling-Service zurückgelegt. Eine Einführung der Maut erhöht jedoch den Anteil derjenigen PKW Wege, die mit dem Umweltverbund (bicycle, walk, pt) substituiert werden. Diese Effekte führen in Summe zu einer starken Reduktion der Fahrleistung auf der Straße. Ohne Maut würde die Einführung beider Bedienformen die Fahrleistung im Vergleich zum Basiszenario um circa 7,8% (nach oben diskutierten Begründungen) steigern. Die zusätzliche Einführung einer Distanzmaut in Höhe der variablen PKW-Kosten, also 0,20 €/km, senkt in der Simulation die Fahrleistung um 27,7 % im Vergleich zum Basisfall. Im Falle einer PKW-Distanzmaut von 0,40 €/km senkt sich die Fahrleistung um 46,6 % gegenüber dem Basisfall. Die jährlichen

PAVE

Einnahmen aus der Distanzmaut ergeben in grober Abschätzung etwa 2,2 Mio€/a, sowohl bei einer Maut von 0,20 €/km als auch bei 0,40 €/km.

Das Verbot privater PKWs in der Innenstadt bei gleichzeitigem Einführen eines Substitutionsangebotes in Form eines Pooling Services, der nur im Stadtinneren operiert, verringert das Fahrzeugaufkommen in ganz Berlin um circa 9% gegenüber dem Ist-Zustand. Im Vergleich zum Szenario ohne PKW-Verbot und demselben Pooling-Angebot verringert sich das Fahrzeugaufkommen um circa 12%.

4.6 Evaluation identifizierter Transport- und Mobilitätsdienstleistungen (OvGU)

Im Folgenden wird das Optimierungsframework vorgestellt sowie die Schnittstelle zur Verkehrssimulation. Anschließend werden Untersuchungen bezüglich der Potentiale automatisierter Gütertransporte diskutiert. Hierbei liegt der Fokus auf der besonders herausfordernden letzten Meile bzw. automatisierten Kurier-Express-Paket-Diensten. Abschließend werden die Ergebnisse der umfangreichen Untersuchungen automatisierter Mobilitätsdienstleistungen vorgestellt.

4.6.1 Evaluationsframework

Für die betriebswirtschaftliche Untersuchung der Transport- und Mobilitätsdienstleistungen erfolgte die Entwicklung und Implementierung eines Evaluationsframeworks, primär bestehend aus dem zunächst vorgestellten Optimierungsframework sowie einer Schnittstelle zur Verkehrssimulation MATSim.

4.6.1.1 *Optimierungsframework*

Innerhalb des Projektes erfolgte die Entwicklung eines leistungsstarken sowie flexibel einsetzbaren Optimierungsframeworks. Der Fokus lag dabei auf den, zur Evaluation der Dienste, vielfältig zu lösenden Tourenplanungsproblemen. Für darüber hinaus betrachtete Planungsprobleme wurden Lösungsansätze implementiert, die im Zusammenhang mit den entsprechenden Untersuchungen vorgestellt werden. Das Tourenplanungsproblem, auch bekannt als „Vehicle Routing Problem (VRP)“, ist mit seinen Varianten eines der am besten im Bereich Operations Research erforschten Problemklassen. Es befasst sich mit dem Management einer Fahrzeugflotte sowie den durchzuführenden Transportaufträgen unter Berücksichtigung aller gegebenen Nebenbedingungen wie Liefer-/Abholzeitpunkte, Reichweitenrestriktionen, etc. Für eine umfangreiche Einführung sowie eine Übersicht grundlegender Lösungsansätze sei unter anderem auf Toth and Vigo (2002) sowie Sharda et al. (2008) verwiesen.

Als Grundlage für das Optimierungsframework wurde das Verfahren der in Ropke and Pisinger (2006) vorgestellten Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) genutzt. Dieses (meta)-heuristische Lösungsverfahren wurde ursprünglich zur Optimierung von statischen „Pickup-and-Delivery-Problemen“ entwickelt, bei welchem der Transport von Gütern von Abholstandorten (Pickup) zu Lieferstandorten (Delivery) geplant wird. Dieser Algorithmus wurde ausgewählt, da er über Jahre hinweg auf eine Vielzahl komplexer Tourenplanungsprobleme angewandt wurde und durchweg gute Ergebnisse in relativ kurzen Laufzeiten erzielt hat. Ein weiterer Grund ist, dass der Algorithmus sowohl zur Minimierung der Anzahl der Fahrzeuge beispielsweise im Kontext eines strategischen Flottenmanagements als auch zur Minimierung der zu fahrenden Distanzen im Zuge des operativen Auftragsmanagements angewandt werden kann. Dieses Verfahren ermöglicht auch das Lösen von reinen Abhol- bzw. Lieferproblemen sowie die Berücksichtigung unterschiedlicher Nebenbedingungen, wie beispielsweise maximaler Lenkzeiten bei traditionellen Transportdienstleistungen, Fahrzeugkapazitäten sowie Abhol- bzw. Lieferzeitfenster. Mittels der Zeitfenster lassen sich zudem die besonderen Anforderungen von Mobilitätsdienstleistungen abbilden, welche beispielsweise die maximal zulässige Wartezeit und Reisedauer der Passagiere betreffen.

Neben statischen Tourenplanungsproblemen, bei denen a priori eine einmalige Tourenplanung unter Berücksichtigung aller erforderlichen (statischen) Informationen erfolgt, erfordern innovative Transportdienstleistungen zudem das operative Auftragsmanagement in Form einer dynamischen Tourenplanung. Insbesondere im Zusammenhang mit digitalisierten Buchungsprozessen entstehen Dienstleistungen bei denen parallel zur Auftrags Erfüllung stochastisch neue Kundenaufträge eingehen,

PAVE

die eine kurzfristige Annahmebestätigung und Erfüllung erfordern. Für einen umfassenden Überblick über die Forschung zur dynamischen Tourenplanung sei auf Psaraftis et al. (2016) und Ritzinger et al. (2016) verwiesen. Zur Untersuchung solcher On-Demand-Dienste wurde für das Optimierungsframework im Rahmen des Projekts eine angepasste Version der ALNS entwickelt. Diese Large Multiple Neighborhood Search (LMNS) wurde im Detail in dem 2020 veröffentlichten Konferenzband der Euro Working Group on Transportation von Haferkamp und Ehmke (2020a) vorgestellt (siehe Anhang „*An Efficient Insertion Heuristic for On-Demand Ridesharing Services*“). In diesem Beitrag erfolgte die Evaluierung des Algorithmus anhand des Pooling Use-Cases. Dabei konnte mittels umfangreichen mathematischen Simulationen gezeigt werden, dass die im Rahmen des PAVE-Projektes entwickelte LMNS bei vertretbaren Laufzeiten klassischen Einfügeheuristiken überlegen ist.

4.6.1.2 Schnittstelle zur Verkehrssimulation

Neben der Implementierung der Algorithmen zur Identifizierung aussichtsreicher Fahrzeug- und Dienstkonzepte erfolgte im Rahmen der Entwicklung des Evaluationsframeworks die Realisierung einer partnerübergreifenden Schnittstelle zur agentenbasierten Verkehrssimulation MATSim. Diese Schnittstelle ermöglicht die Evaluierung der Planungsalgorithmen unter realitätsnahen Bedingungen sowie die Verwendung der Algorithmen zum dynamischen Management von Transportaufträgen innerhalb der Verkehrssimulation.

Innerhalb von MATSim wurden zu diesem Zweck Funktionalitäten umgesetzt, welche es ermöglichen externe Software und Algorithmen einzubinden. Daher kann trotz unterschiedlicher Datenstrukturen auf die in der Verkehrssimulation MATSim definierten Mobilitäts- und Gütertransportaufgaben zugegriffen werden. Zudem ist es möglich alle verfügbaren Transportdienstleister und deren Fahrzeugflotten anzusprechen. Die von der Verkehrssimulation zur Verfügung gestellten Informationen werden in entsprechende Formate des zuvor beschriebenen Optimierungsframeworks umgewandelt und anhand der implementierten Algorithmen im Rahmen der zu untersuchenden Spezifikationen geplant und optimiert. Die Ergebnisse werden anschließend in Form der einzelnen Agenten und deren Aufgaben an die Verkehrssimulation zurückgegeben. Bei Bedarf lassen sich im Sinne des Flottenmanagements weitere Dienstleistungsfahrzeuge anlegen und in die Simulation integrieren.

Bei der Kombination von Simulation und Optimierung ergeben sich einige Vorteile, aber auch ein paar Nachteile. Die zusätzliche Laufzeit gegenüber individuell spezialisierter Analysen stellt einen deutlichen Nachteil dar. Es bestehen darüber hinaus Herausforderungen in der Vernetzung, da im Allgemeinen unterschiedliche Fachtermini verwendet werden und sich der Fokus durchgeführter Analysen teilweise grundlegend unterscheiden kann. Während bei der Optimierung häufiger Details und Auswirkungen einzelner Parameter betrachtet werden, so werden in der Simulation die Analysen mit dem Fokus auf die gesamtverkehrlichen Auswirkungen durchgeführt.

Zu den entscheidenden Vorteilen zählt die Anwendungsmöglichkeit von Optimierungsverfahren direkt in der Verkehrssimulation, um Auswirkungen innovativer Mobilitäts- und Transportdienstleistungen auf die gesamte verkehrliche Situation beobachten und identifizieren zu können. Für die Forschung an neuen innovativen Transport- und Mobilitätsservices und deren bestmögliche gesamtwirtschaftliche Optimierung lässt sich die integrative Anwendung von Simulation und Optimierung ebenfalls hervorragend einsetzen. Neuartige Algorithmen und Dienste können schnell und teilweise erstmals unter realitätsnahen Bedingungen angewendet und evaluiert werden, bevor sie in der Praxis eingesetzt werden. Exemplarisch wurde dies von Kötschau et al. (2021) im Rahmen des Verbundprojektes durchgeführt und veröffentlicht (siehe Anhang „*Combining Simulation and Optimisation to Design Reliable Transportation Services with Autonomous Fleets*“).

4.6.2 Transportdienstleistungen

Die Auslieferung von Gütern im Privatkundenbereich ist mit sehr hohen Kosten auf der letzten Meile verbunden. Insbesondere in Deutschland erwarten Kunden einen hohen Service zu sehr geringen Preisen (Köhler et al., 2020). Daher wird aktuell intensiv an innovativen und kostengünstigen Transportdienstleistungen geforscht. Im Folgenden soll auf das enorme Kosteneinsparpotenzial auf Automatisierung basierender Belieferungskonzepte eingegangen werden. Dabei wird vorwiegend die direkte Haustür-Lieferung betrachtet, da diese momentan von vielen Kunden favorisiert und als Standard erwartet wird.

4.6.2.1 Roboterbasierte Zustellungen

Im Gütertransport der Zukunft können fahrerlose autonome Lieferfahrzeuge Haustür-Lieferungen übernehmen. Dabei handelt es sich um eine mögliche Art der Zustellung auf der letzten Meile, d.h. die Kunden erhalten ihr Paket komfortabel direkt an der Haustür innerhalb eines vorab definierten Zeitfensters. Das automatisierte oder auch manuelle Beladen von autonomen Transportern ist konzeptionell recht einfach umzusetzen. Eine Herausforderung hingegen stellt die Übergabe der Pakete an den Kunden dar. Derzeit wird an verschiedenen Konzepten gearbeitet, beispielsweise könnte eine Drohne vom Transporter ausgehend zum Kunden fliegen. Einfacher wäre es, wenn der Kunde eine Benachrichtigung erhält und selbst zum Transporter kommt, welcher über eine Art Packstation-System das richtige Paket an den Kunden übergibt. Die wichtigsten Vorteile einer solchen Belieferung sind die enormen Kosteneinsparungen, da kein Fahrer benötigt wird, sowie die nicht vorhandenen Arbeitszeitbeschränkungen, was eine Zustellung rund um die Uhr sowie am Wochenende ermöglicht und wodurch Kunden auf speziellen Wunsch somit sogar zu genaueren und auch außergewöhnlichen Zeiten beliefert werden können.

Ein weiterer Ansatz zur autonomen Belieferung stellen kleinere Lieferroboter dar, welche bereits heute eingesetzt werden. Diese Lieferroboter sind in kleineren Außenstellen stationiert, sogenannten Hubs, welche nur wenige Kilometer, entsprechend der Reichweite der Roboter, vom Kunden entfernt sind. Von dort aus beliefern sie jeden Kunden einzeln und direkt. Vorteile beispielsweise gegenüber der Belieferung mit größeren autonomen Fahrzeugen sind zum einen die bereits vorhandene technische Verfügbarkeit und zum anderen die außerordentlich geringen Energiekosten, welche bei der Belieferung auftreten. Zudem sind die Anschaffungskosten eines kleinen Roboters geringer, demgegenüber werden jedoch deutlich mehr benötigt. Daher ist es betriebswirtschaftlich zu evaluieren, ob es sich hierbei wirklich um einen bedeutenden Vorteil handelt.

In Kooperation mit der University of Iowa wurden erste Untersuchungen zu einer roboterbasierten Auslieferung von Gütern durchgeführt (Bakach et al., 2021). Dabei werden kleine autonome Roboter der Firma Starship einer konventionellen LKW-basierten Lieferung kostentechnisch gegenübergestellt. Wie bei der konventionellen Auslieferung verlassen die Pakete mit einem LKW oder Transporter das Depot. Der Unterschied besteht darin, dass dieser die Kunden nicht direkt, sondern kleine Umschlagsplätze in einem zweistufigen Zustellnetzwerk beliefert, die so genannten Hubs. Von den Hubs aus befördern die eingesetzten Lieferroboter autonom in einzelnen Pendeltouren die Pakete zu den Endkunden. Die Hubs sind über das Belieferungsgebiet verteilt und dienen als Ausgangsbasen für die Roboter, da deren Reichweite aufgrund technischer Gegebenheiten in den durchgeführten Berechnungen auf ca. 6 Kilometer beschränkt ist. Auf Basis synthetischer Auftragsdaten wurde innerhalb unterschiedlicher Szenarien sowohl die Anzahl eingesetzter Roboter, als auch die benötigte Anzahl lokaler Hubs anhand mehrerer kombinierter mathematisch formulierten Modellen minimiert. Die Problemstellungen wurden dabei als Mixed-Integer-Programm modelliert und mittels Gurobi-

PAVE

Solver gelöst. Es konnte gezeigt werden, dass eine außerordentliche Reduzierung der Betriebskosten mit der roboterbasierten Lieferung gegenüber den herkömmlichen LKWs möglich ist. So ergeben sich Einsparungen von etwa 70 Prozent bei Lieferungen ohne Zeitfenstern, oder sogar bis zu 90 Prozent, wenn Kundenzeitfenster berücksichtigt werden. Für detaillierte Einblicke in die Methodik und die Ergebnisse sei auf das im *Networks Journal* veröffentlichte Paper von Bakach et al. (2021) verwiesen (siehe Anhang „*A Two-Tier Urban Delivery Network with Robot-based Deliveries*“). Die gefundenen theoretischen Potentiale wurden für PAVE auf Szenarien im Großraum Berlin angewandt und erneut evaluiert, siehe folgendes Kapitel.

4.6.2.2 Vergleich automatisierter Belieferungskonzepte

Im Folgenden wird das kostentechnische Service Design, die Lösungsverfahren sowie der experimentelle Aufbau und Ergebnisse zu den beiden Belieferungskonzepten (a) autonome Lieferfahrzeuge und (b) autonome Lieferroboter erläutert. Dies dient der Potenzialabschätzung neuartiger automatisierter Transportkonzepte zur Lieferung von Gütern auf der letzten Meile. Diese ist aktuell noch mit den größten Herausforderungen und Kosten in der gesamten Lieferkette verbunden. Einsparungen haben daher ein enormes Potenzial das Serviceangebot zu Gunsten aller Stakeholder zu verbessern.

4.6.2.2.1 Service Design und Kostenkalkulation

Entscheidend für eine Potenzialabschätzung ist die Definition möglichst realistischer Kostensätze für den Einsatz der einzelnen Fahrzeuge und Roboter sowie des Personals bei der konventionellen Belieferungsmethode. Verglichen wird im Folgenden das Konzept der autonomen Lieferroboter mit der direkten Belieferung durch Lieferfahrzeuge, sowohl autonom wie durch Fahrer. Für die herkömmliche Lieferung mit Fahrern setzen sich die Kosten aus den Fahrzeugfixkosten, den Overheadkosten je Fahrzeug, einer variablen Kilometerpauschale und den Personaleinsatzkosten zusammen. Auf Basis der Bundesverkehrswegeplanung von 2015 (Planco Consulting GmbH et al., 2015) wurden die Kostensätze für den Einsatz der Transporter von Schlenther et al. (2020) übernommen. Ebenfalls nach Schlenther et al. (2020) wird auch hier davon ausgegangen, dass sich die Kosten der Automatisierungstechnologien sowie der einhergehenden Elektromobilität über die Zeit reduzieren und an die Preise von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren angleichen werden. Daher entsprechen die Kostensätze für das Konzept der autonomen Lieferfahrzeuge denen der herkömmlichen Transporter, es bleiben jedoch die zeitabhängigen Personalkosten unberücksichtigt.

Für die Lieferroboter werden Hubs benötigt, diese sind monatlich gemietet zu einem angenommenen Preis von 300 €. Dieser Wert wird auf eine Nutzungszeit von 300 Tagen pro Jahr verteilt und beläuft sich somit auf 12 € Fixkosten pro Arbeitstag. Die Hubs werden durch einen größeren Truck beliefert, angenommen wurde dazu ein 7,5-Tonner Mercedes-Benz Atego. Die einzelnen Kosten wurden ebenfalls aus der Bundesverkehrswegeplanung von 2015 übernommen und entsprechend der von Schlenther und Kollegen präsentierten Werten extrapoliert (Planco Consulting GmbH et al., 2015; Schlenther et al., 2020). Hinzu kommen der angenommene Verbrauch von 14,79 l/100 km (Spritmonitor, 2020), welcher mit einem konservativ berücksichtigten Dieselpreis von 0,9 €/l (BGL, 2021) verrechnet wurde. Abschließend sind die Kosten der autonomen Lieferroboter zu bestimmen. Zum aktuellen Zeitpunkt sind kaum Informationen verfügbar, da diese sich derzeit in der Entwicklung und Einführungsphase befinden. In den Experimenten wurde daher ein Kaufpreis von 2000 € angenommen, welcher auf 3 Jahre abgeschrieben und zusammen mit einer Pauschale für Wartungs- und sonstige Kosten von 400 € pro Jahr auf 300 angenommene Nutzungstage verteilt wurde. Dies ergibt Fixkosten von 3,56 € pro Roboter pro Tag. Hinzu kommen die Overheadkosten, welche vereinfacht mit 5 % der Kosten für einen Truck

PAVE

angenommen wurden und sich daher auf 1,21 € belaufen. Letztlich sind die geringen Einsatzkosten der Roboter der entscheidende Vorteil dieses Belieferungskonzepts. Entsprechend Bakach et al. (2021) kostet es 2 Cent die Batterie eines Roboters vollständig zu laden. Aufgrund der möglichen Einsatzzeit von 2 h ergeben sich Kosten von ungefähr 1 Cent pro Stunde.

In der folgenden Tabelle 36 sind alle Kosten, die den Experimenten zugrunde liegen, noch einmal zusammengefasst:

	Fixkosten	Overheadkosten	Einsatzkosten	Personalkosten
Transporter mit Fahrer	8,03 €	17,47 €	21,85 €/100 km	17,64 €/Stunde
Autonomer Transporter	8,03 €	17,47 €	21,85 €/100 km	-
Truck mit Fahrer	11,11 €	24,16 €	36,58 €/100 km	17,64 €/Stunde
Autonomer Roboter	3,56 €	1,21 €	0,01 €/Stunde	-
Hub	12,00 €	-	-	-

Tabelle 36: *Kostenübersicht automatisierter Gütertransportkonzepte*

4.6.2.2 Lösungsmethodik und weitere Parameter

Zur Bestimmung der minimalen Flottengröße wurden aktuell gängige Lösungsverfahren aus der Literatur herangezogen. Aufgrund der Art und Komplexität der betrachteten Probleme sind diese nur schwer in realistischer Zeit lösbar. Es wurde daher vorwiegend mit heuristischen Verfahren und weniger exakten Modellen gearbeitet um Lösungen möglichst am Optimum zu finden. Prinzipiell unterscheiden sich die Herangehensweisen von der herkömmlichen bzw. autonomen Auslieferung zu der mit den autonomen Lieferrobotern deutlich.

Belieferung mit Lieferfahrzeugen

Zur Bestimmung der optimalen Flottengröße wurde die ALNS des in Abschnitt 1.1. vorgestellten Optimierungsframeworks verwendet. Dabei werden die Ladungskapazitäten der Fahrzeuge berücksichtigt, welche ebenfalls wie die Kostensätze aus Schlenther et al. (2020) übernommen wurden. Im Fall der nicht autonom fahrenden Fahrzeuge wurden maximale Personaleinsatzzeiten von 8 Stunden und die bereits vorgestellten Personaleinsatzkosten berücksichtigt. Neben diesen Restriktionen werden das Endergebnis und die minimal benötigte Anzahl an Fahrzeugen stark durch die Belieferungszeitfenster der Kunden bestimmt. Vereinfacht wurde eine durchschnittliche Zustelldauer von 4 Minuten angenommen.

Belieferung mit Lieferrobotern

Die Lösung für die Lieferroboter besteht aus der optimalen Anzahl Hubs und Roboter je Hub sowie den minimierten operativen Kosten für den Truck. Diese Lösung wurde nach der eingangs skizzierten Methode von Bakach et al. (2021) ermittelt unter Nutzung der zuvor genannten Kostenparameter. Bakach et al. minimieren nicht nur die Anzahl der benötigten Roboter, sondern auch die Anzahl der verhältnismäßig kostenintensiven Hubs unter Berücksichtigung der Einsatzzeit des zur Verteilung verwendeten LKWs. An den Hubs wurde dabei eine Bearbeitungszeit von 1 Minute pro Paket für den LKW-Fahrer angenommen. Die technischen, Roboter-spezifischen Parameter wurden komplett

PAVE

übernommen: Die Roboter sind auf den Fußwegen mit 3 km/h bis zu einer Maximaldauer von 2 Stunden unterwegs, bevor sie wieder aufgeladen werden müssen. Bei den Kunden verbringen die Roboter eine Servicezeit von 4 Minuten. Die Arbeitszeiten der Roboter sind in dieser Untersuchung nicht beschränkt und orientieren sich somit an den Kundenzeitfenstern.

4.6.2.2.3 Experimenteller Aufbau

Zur Beurteilung der Anwendbarkeit und zur Abschätzung des Potenzials der vorgestellten automatisierten Belieferungskonzepte wurden drei realitätsnahe Szenarien konzipiert, welche variierende Auftrags- und Serviceumgebungen repräsentieren. Alle Szenarien orientieren sich am Großraum Berlin und basieren auf realen Belieferungsdaten eines großen deutschen Paketdienstleisters. Durch den Einsatz autonomer Fahrzeuge sind keine Arbeitszeitrestriktionen zu berücksichtigen und es sind häufiger Zustellungen innerhalb enger, vom Kunden gewünschter Zeitfenster möglich. Daher wurde jedem Kunden ein Belieferungszeitfenster von 2 Stunden zugeordnet, welche basierend auf der Häufigkeitsverteilung von Auftragsdaten eines online Lebensmittelhändlers aus Köhler et al. (2020) zufällig bestimmt wurden. In allen drei Szenarien erfolgt die Lieferung ausgehend vom zuständigen Verteilzentrum. Jedes Szenario wird durch 340 Kundenaufträge eines Tages mit Zeitfenstern zwischen 10 und 22 Uhr repräsentiert und beinhaltet zudem eine Auswahl potentieller Hubs für die Umverteilung im Konzept der autonomen Lieferroboter. Als mögliche in Frage kommende Hubs wurden überwiegend Parkhäuser oder vereinzelt Parkplätze von Supermärkten ausgewählt, welche eine vernünftige Abdeckung der Kunden ermöglichen.

Szenario 1: Das urban-zentrierte Szenario

Für dieses Szenario wurde der zentral in Berlin gelegene Postleitzahlenbereich 10247 ausgewählt, mit den fünf in orange gekennzeichneten Roboter-Hubs. Dieser Bereich repräsentiert eine sehr hohe Auftragsdichte mit kurzen Wegen zwischen den einzelnen Kunden.



Abbildung 110: Das urban-zentrierte Szenario

Szenario 2: Das suburban-zentrierte Szenario

Im zweiten Szenario wurde der am Rande Berlins gelegene Postleitzahlenbereich 12355 mit ebenfalls fünf Hubs ausgewählt. Hier wird eine etwas geringere Auftragsdichte mit leicht höheren Wegen zwischen den Kunden am Stadtrand untersucht.

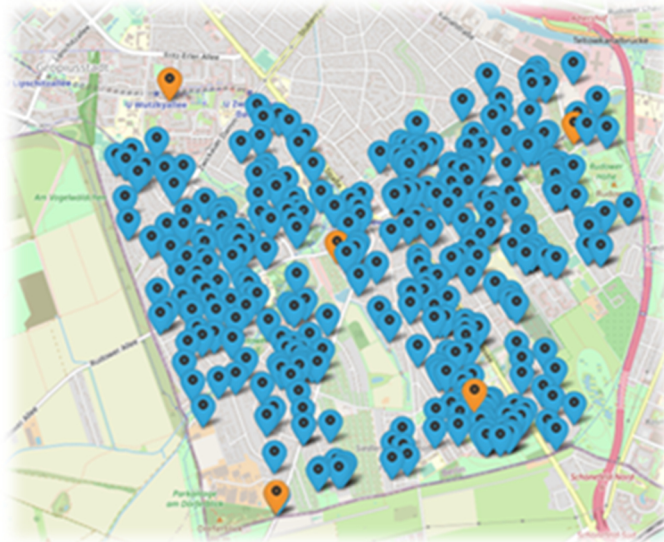


Abbildung 111: Das suburban-zentrierte Szenario

Szenario 3: Das urban-gestreute Szenario

In diesem Szenario sind die Kunden über das gesamte Stadtzentrum verteilt. Für dieses recht große Auftragsgebiet fällt die Nachfrage mit 340 Lieferaufträgen verhältnismäßig gering aus. Aufgrund der sich somit ergebenden hohen Distanzen zwischen den Kunden und dem generell größeren Einsatzgebiet wurden im dritten Szenario 10 Hubs ausgewählt, um eine Belieferung aller Kunden durch die Roboter sicherstellen zu können.



Abbildung 112: Das urban gestreute Szenario

4.6.2.2.4 Ergebnisse

Die durchgeführten Untersuchungen zu den automatisierten Belieferungskonzepten zur Haustür-Lieferung auf der letzten Meile zeigen ein außerordentliches Potenzial zur Kosteneinsparung. Verglichen mit der konventionellen Lieferung ist die bereits umsetzbare Belieferung mit autonomen Lieferrobotern über 60 % günstiger. Sobald vollständig autonome Fahrzeuge auf den Straßen unterwegs sind, werden Kosteneinsparungen von bis zu 88 % denkbar. Diese Ergebnisse werden im Folgenden erläutert.

Herkömmliche Belieferung

In der klassischen Belieferung sind die Personalkosten der größte Kostenfaktor, siehe Tabelle 37. Die Personalkosten betragen in allen untersuchten Szenarien etwa ein Drittel der Gesamtkosten. Insgesamt sind die Kosten im dritten Szenario am höchsten, in dem sich die Kunden über ein größeres Belieferungsgebiet erstrecken. Im zweiten Szenario steigen die Kosten aufgrund der leicht höheren Entfernung zwischen den Kunden merklich an.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Anzahl Touren	6	7	9
Gesamte Distanz	205,95 km	363,84 km	693,36 km
Gesamte Einsatzzeit	41,04 h	47,99 h	60,03 h
Fahrzeugkosten	198 €	258 €	381 €
Personalkosten	724 €	847 €	1059 €
Gesamtkosten	922 €	1105 €	1440 €

Tabelle 37: Ergebnisse herkömmlicher Belieferung

Autonome Lieferfahrzeuge

Die zu erwartenden Kosten bei einer fahrerlosen Auslieferung sind deutlich geringer, siehe Tabelle 38. Dies liegt entscheidend an den wegfallenden Fahrerkosten. Darüber hinaus lassen sich deutliche Einsparungen aufgrund der nicht vorhandenen Arbeitszeitbeschränkungen erzielen. So zeigt sich eine mögliche Halbierung der eingesetzten Fahrzeuge und daraus resultieren zusätzlich kürzere gesamtverkehrliche Distanzen.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Anzahl Touren	3	3 (min wäre 2)	4
Gesamte Distanz	144,16 km	235,70 km	594,97 km
Fahrzeugkosten	108 €	128 €	232 €

Tabelle 38: Ergebnisse autonomer Lieferfahrzeuge

Autonome Lieferroboter

Gegenüber den autonomen Lieferfahrzeugen ist der Einsatz von autonomen Lieferrobotern bereits heute umsetzbar. Im untersuchten Konzept ist noch immer ein Fahrer im Einsatz, Hubs müssen eingerichtet werden und es werden in den betrachteten Szenarien bis zu 50 Roboter benötigt, um die Lieferungen innerhalb der gewünschten Kundenzeitfenster durchzuführen. Wie Tabelle 39 entnommen werden kann, liegen die Kosten somit deutlich zwischen denen der autonomen und herkömmlichen Belieferung und belaufen sich auf etwa das Doppelte der autonomen Lieferfahrzeuge und ca. ein Drittel der Auslieferung mit Fahrern. Die entscheidenden Kostenfaktoren sind die Anschaffungs- und Wartungskosten der Roboter sowie die Personalkosten für den Fahrer, welcher die Verteilung der Pakete an die Hubs durchführt

PAVE

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Anzahl Hubs	1	23	10
Truck Distanz	41,64 km	53,19 km	83,91 km
Truck Fahrzeit	0,76 h	1,24 h	1,78 h
Truck Servicezeit	5,67 h	5,67 h	5,67 h
Anzahl Roboter	20	39 (13 je Hub)	50 (5 je Hub)
Roboter Einsatzzeit	147,32 h	290,90 h	357,4 h
Hubkosten	12 €	36 €	120 €
Truckkosten	50 €	54 €	66 €
Fahrerkosten	113 €	122 €	131 €
Roboterfixkosten	95 €	186 €	238 €
Robotereinsatzkosten	1,47 €	2,91 €	3,57 €
Gesamt	273 €	401 €	559 €

Tabelle 39: Ergebnisse autonomer Lieferroboter

Gegenüberstellung

Anhand der Tabelle 40 lässt sich im direkten Vergleich festhalten, dass die Kosteneinsparungen durch die Automatisierung enormes Potenzial aufweisen und weitere Forschungen und Subventionen daher vielversprechend erscheinen.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Herkömmliche Belieferung	922 € (100 %)	1105 € (100 %)	1440 € (100 %)
Autonome Lieferfahrzeuge	108 € (11,71 %)	128 € (11,58 %)	232 € (16,11 %)
Autonome Lieferroboter	273 € (29,61 %)	401 € (36,29 %)	559 € (38,82 %)

Tabelle 40: Kostentechnischer Vergleich untersuchter Konzepte im privaten *Gütertransport*

Szenario 3, bei welchem wenige Kunden in einem relativ großen Belieferungsgebiet angesiedelt sind, zeigt deutlich höhere Kosten in allen untersuchten Konzepten. Es wird eine gewisse Auftragsdichte benötigt um einen wirtschaftlich effizienten Service aufrechtzuerhalten. Besonders während der Einführung neuer Dienstleistungen zeigt sich dies häufig als Hindernis. So sind beispielsweise Lieferungen in ländlichen Gebieten nur schwer wirtschaftlich zu gewährleisten. Die deutlich geringeren Kosten der innovativen Transportkonzepte könnte zu neuen Anbietern und Diensten führen, da die Einstiegsherausforderungen bei vorhandenen Technologien deutlich reduziert sind. Erkennbar wird dies zudem im Vergleich der zu erwartenden Lieferkosten pro Kunden, siehe Abbildung 113.

PAVE

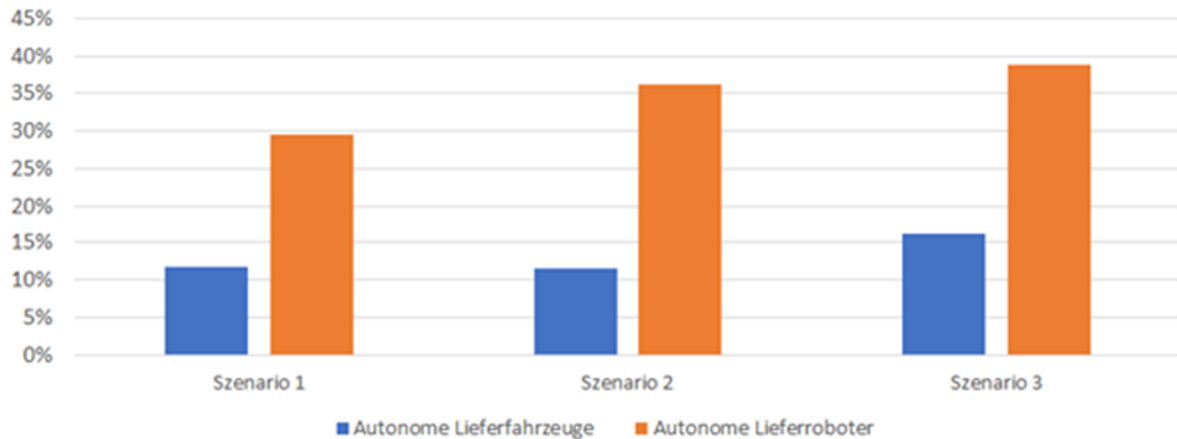


Abbildung 113: Gegenüberstellung der Gesamtkosten pro Paket

Der Einsatz von autonomen Lieferfahrzeugen zeigt in den ersten beiden Szenarien, bei welchen die Distanzen zwischen den Kunden leicht ansteigen, nur wenig Mehrkosten, siehe Abbildung 114. Bei den Lieferrobotern hingegen verursachen diese, aufgrund der kleinen Batterien und geringen Reichweiten, bereits einen merklichen Anstieg der Kosten. Im zweiten Szenario führen die höheren Entfernungen bei den Lieferrobotern zu mehr Fahrzeit, mehr benötigten Robotern und zusätzlichen Hubs.

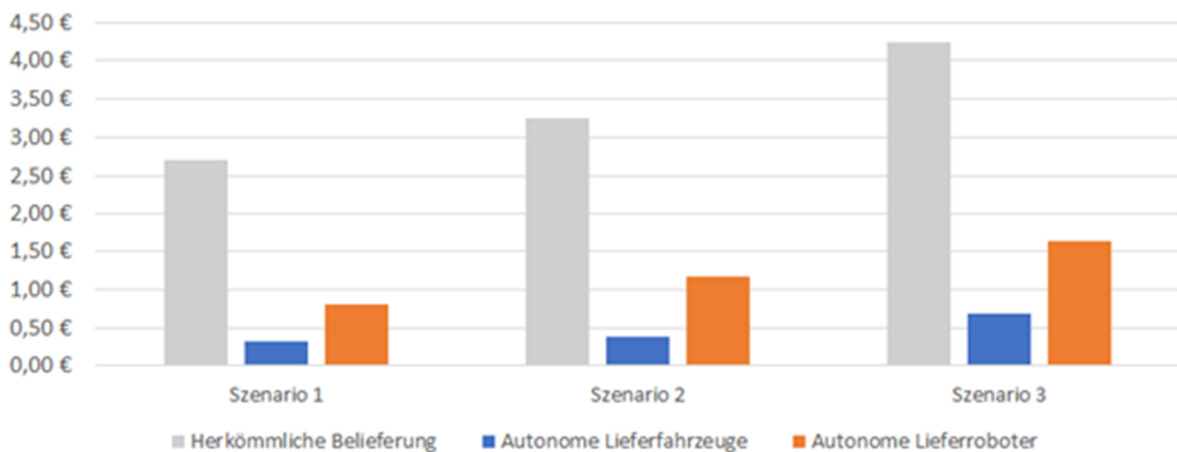


Abbildung 114: Relative Gesamtkosten pro Paket zur nicht autonomen Belieferung

Es erscheint also eine Auftragslage von ca. 300 Kunden pro Hub mit beispielsweise 20 Robotern bei gegebenem technischen Stand und 2-stündigen Zeitfenstern als besonders wirtschaftlich. Insbesondere aufgrund zukünftiger Verbesserungen bezüglich der Reichweite der Lieferroboter ist davon auszugehen, dass sich deren Wirtschaftlichkeit in den kommenden Jahren noch verbessern wird.

Eine Automatisierung des Gütertransports ist insbesondere auf der letzten Meile mit hohen technischen und finanziellen Herausforderungen verbunden. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen ein deutliches Potenzial, dass sich Investitionen in innovative Technologien langfristig rentieren würden, insbesondere in dicht besiedelten Gebieten.

4.6.3 Mobilitätsdienstleistungen

Als für autonome Technologien relevante Mobilitätsdienstleistungen wurden insbesondere die Use-Cases *RoboTaxi* sowie *Pooling* identifiziert. Im Folgenden werden die dienstspezifischen Untersuchungen vorgestellt, welche ergänzend zu der umfangreichen Potenzialabschätzung innerhalb der Verkehrssimulation MATSim durchgeführt wurden. Im Gegensatz zu diesen Untersuchungen liegt der Fokus bei den folgenden Abschnitten auf der Evaluation unterschiedlicher Dienstleistungsdesigns, welches im Rahmen der Verkehrssimulation nicht durchführbar wäre.

Die im folgenden vorgestellten Schwerpunkte führten im Rahmen des Verbundprojektes jeweils zu eigenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen. Im ersten Abschnitt wird anhand des RoboTaxi-Use-Cases auf die Potentiale der Automatisierung für neue zuverlässige Mobilitätsdienste unter Berücksichtigung stochastischer Reisezeiten eingegangen. Daraufhin wird mit Fokus auf den Use-Case *Pooling* das strategische Flottenmanagement von Ride-Sharing-Diensten betrachtet, insbesondere im Licht der sich durch autonome Fahrzeuge wandelnden Kostenstrukturen. Der letzte Teil befasst sich mit dem aktuellen Stand der Forschung hinsichtlich des Umgangs mit Unsicherheit der Nachfrage bei On-Demand Diensten sowie der evaluation unterschiedlicher Steuerungsansätze im Kontext des Use-Cases *Pooling*. Es sei darauf hingewiesen, dass alle Arbeiten unter Annahme der vor Covid-19 vorherrschenden Mobilitätstrends entstanden und somit die Konsequenzen der Pandemie für die untersuchten Mobilitätsdienste nicht reflektieren. Dies wird aus zeitlichen Gründen im Anschluss an das Verbundprojekt durch ergänzende Untersuchungen nachgeholt, welche auf die zusätzlich durchgeführten quantitativen Befragungen aufbauen.

4.6.3.1 Design zuverlässiger Mobilitätsdienstleistungen

Die Beförderung von Personen ist in städtischen Gebieten wie Berlin häufig von Unsicherheiten geprägt. Aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens und der limitierten Infrastruktur kommt es insbesondere zu den Hauptverkehrszeiten oder an speziellen Bündelungspunkten wie Flughäfen oder Bahnstationen immer wieder zu unvorhersehbaren Verzögerungen im Verkehrsablauf. Mobilitätsdienstleister, in unserem Falle repräsentiert durch das RoboTaxi, müssen diese Störungen vorhersehen und berücksichtigen, um den Kunden einen möglichst zuverlässigen Service bieten zu können.

Ein herkömmlicher Taxi- oder Shuttle-Fahrer kann beispielsweise für jeden Kunden etwas zusätzliche Zeit einplanen, um mögliche Verspätungen abzufangen. Diese zusätzlichen Pufferzeiten sind jedoch nicht so leicht zu bestimmen. Bei zu großen Pufferzeiten führen sie schnell zu entgangenen Umsätzen, wohingegen keine Berücksichtigung zu Verspätungen und unzufriedenen Kunden führen kann. Die genaue Planung und flexible Berücksichtigung der zu erwarteten Fahrzeiten lässt sich nur schwer mit menschlichen Fahrern realisieren. Es ist nicht abzuschätzen wie ein Fahrer reagiert, wenn ihm berechnete Fahrzeiten und Fahrwege von einem komplexen Algorithmus vorgegeben werden, insbesondere wenn es aufgrund eines neuen Kunden oder einer sich ändernden Verkehrssituationen zu spontanen Planänderungen kommt. Daher wird die Umsetzung solch hochpräziser Planungen in der Praxis erst durch vernetzte und autonome Fahrzeuge ermöglicht. Demgegenüber setzen derartige Dienstleistungen ausgeklügelte Algorithmen voraus, welche das operative Flottenmanagement übernehmen.

Zusätzlich haben verschiedene Kunden verschiedene Anforderungen. Manche Kunden möchten zum günstigsten Preis an ihr Ziel und sind dazu bereit ein paar Minuten Verspätung in Kauf zu nehmen. Andere Kunden haben den Wunsch pünktlich und so schnell wie möglich an ihr Ziel zu gelangen, beispielsweise, weil sie geschäftlich unterwegs sind. Um allen Kunden und ihren Wünschen

PAVE

entsprechend gerecht zu werden, bieten Serviceanbieter häufig verschiedene Buchungsoptionen an. Es lohnt sich also zu untersuchen, wie ein auf den speziellen Kunden angepasster Grad an Pünktlichkeit gewährleistet werden kann. Individuelle Kundenwünsche lassen sich im hohen Detailgrad nur noch maschinell mit ausgeklügelten Systemen und Algorithmen berücksichtigen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden erste Analysen zur Bedeutung von zeitlichen Puffern in der Planung von Personenbeförderungsaufträgen durchgeführt. Im Paper “Combining Simulation and Optimisation to Design Reliable Transportation Services with Autonomous Fleets” von Kötschau et al. (2021) wurden Ansätze zur Berechnung sinnvoller Puffergrößen vorgestellt und miteinander verglichen. Für detaillierte Einblicke in die Methodik und die Ergebnisse sei auf das 2021 im Konferenzband der Euro Working Group on Transportation veröffentlichte Paper verwiesen (siehe Anhang „Combining Simulation and Optimisation to Design Reliabl Transportation Services with Autonomous Fleets“). Untersucht wurde im Speziellen der Kompromiss zwischen Servicequalität und Kosten aufgrund potenziell erhöhter Leerlaufzeiten und verlängerter Tourdauern als Folge der Einplanung von Puffern. Für einen Auszug der Ergebnisse siehe Tabelle 41. Die Tabelle zeigt vier Varianten der Planung von Puffern, welche anschließend in der Verkehrssimulation MATSim zu unterschiedlichen Abfahrtszeiten evaluiert wurden. Im Fall von “BASE” werden die Touren mit den minimalen Fahrzeiten ohne zusätzliche Puffer geplant. In “SD” wurden durchschnittlichen Fahrzeiten und die Standardabweichung als zusätzliche Puffer herangezogen. Als eine anspruchsvolle Lösungsmethodik wurde das Original von Jabali et al. (2015) eingesetzte LP-Modell (“oLP”) verwendet und eine zweite angepasste Version entwickelt (“aLP”). Es zeigen sich Verspätungen (“spät”) bei 98% der Kunden, wenn ohne Puffer ein hohes Servicelevel gewährleistet werden soll, das heißt, wenn Kunden in einer sehr genau definierten Zeit abgeholt und am Ziel ankommen möchten. Eine signifikante Reduzierung der Verspätungen auf 3,2% begleitet von einer um 8,84% erhöhten Tourdauer (“zusätzl. Dauer“) ist mit der aktuell vielversprechendsten Lösung möglich.

	Früh	Pünktlich	Spät	durchschn.	max.	durchschn.	max.	zusätzl.
	[%]	[%]	[%]	zu früh	zu früh	zu spät	zu spät	Dauer
				[mm:ss]	[mm:ss]	[mm:ss]	[mm:ss]	[%]
BASE	0,0	2,0	98,0	- 00:00	- 00:00	+ 33:27	+ 92:39	0,00
oLP	69,7	16,5	13,8	- 02:47	- 10:25	+ 01:36	+ 05:36	6,21
SD	77,9	11,9	10,2	- 02:35	- 10:07	+ 01:29	+ 04:53	6,57
aLP	87,5	9,3	3,2	- 03:06	- 11:49	+ 00:59	+ 02:31	8,84

Tabelle 41: *Einhaltung des Service-Levels von 1-minütigen Zeitfenstern am Zielort der Kunden*

In dieser Arbeit wurden die Auswirkungen von einfachen und komplexeren Puffern, für die Planung von zuverlässigen Personenbeförderungen ermöglicht durch autonome Flotten, demonstriert. Basierend auf der Integration von Optimierung und Simulation, welche im Abschnitt 1.2. “Schnittstelle zur Verkehrssimulation” erläutert wurde, konnte gezeigt werden, dass sinnvoll geplante Puffer einen guten Mittelweg aus Premium-Service für Fahrgäste und Betriebskosten schaffen können. Diese Erkenntnisse lassen sich auf den Use-Case der RoboTaxis übertragen und es kann davon ausgegangen werden, dass sich die gewonnenen Lösungsansätze besser mit autonom und integriert fahrenden Fahrzeugen implementieren lassen als mit herkömmlichen Fahrern. Daher entstehen durch den Einsatz von RoboTaxis neue Möglichkeiten kundenspezifische Serviceoptionen anzubieten, welche die Akzeptanz der Kunden und bei gewissen Premiumkunden die Bereitschaft höhere Preise zu zahlen fördern wird.

4.6.3.2 *Strategisches Flottenmanagement für automatisierte Ride-Sharing-Dienste*

Vor dem Hintergrund der fortschreitenden Entwicklung autonomer Fahrzeuge entstanden in den letzten Jahren weltweit Ride-Sharing-Dienste, welche entsprechend dem Use-Case *Pooling* einen komfortablen Mobilitätsdienst zu geringen Kosten versprechen. Solange diese Dienste auf menschliche Fahrer angewiesen sind, basiert deren Geschäftsmodell meist auf dem zentralisierten Betrieb einer Flotte von Kleinbussen. Für diese Kleinbusse wird durch effizientes Bündeln von Fahrten eine hohe Auslastung und damit Kostenvorteile gegenüber konventionellen Taxi-Diensten angestrebt.

Im Folgenden wird untersucht, welche Auswirkung die Einführung autonomer Fahrzeuge auf das strategische Flottenmanagement von Ride-Sharing-Diensten hat. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf dem Wegfall der Fahrerkosten und der damit einhergehenden Veränderung der Kostenstruktur. Diese Veränderung führt einerseits zu sinkenden Kosten pro eingesetztem Fahrzeug und somit andererseits zu einer Bedeutungszunahme der Kosten pro gefahrenem Kilometer. Dies könnte dazu führen, dass sich größere Flotten, die aus kleineren Fahrzeugen bestehen, beim Einsatz autonomer Fahrzeuge als besonders profitabel erweisen.

Um diese Hypothese zu untersuchen, werden für unterschiedlich große Fahrzeugtypen kostenminimale Ride-Sharing-Flotten bestimmt. Dies erfolgt für konventionelle und automatisierte Flotten mittels der Simulation eines statischen, operativen Auftragsmanagements. Darüber hinaus wird das Potenzial heterogener Flotten mittels zweier ergänzender Ansätze in Betracht gezogen. Abschließend wird die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf On-Demand Ride-Sharing-Dienste mittels der Simulation des dynamischen, operativen Auftragsmanagements untersucht.

Zusätzlich zu den wirtschaftlichen Aspekten, die in diesem Bericht primär analysiert werden, können andere Faktoren bei der Bestimmung einer geeigneten Flotte eine wichtige Rolle spielen. Vor diesem Hintergrund sei auf Vosooghi et al. (2019) verwiesen, welche die Flottenkomposition für große, automatisierte Ride-Sharing-Dienste untersuchen, ohne fahrzeugtypabhängige Kosten zu berücksichtigen. Einen umfangreichen Überblick über die Forschung zu automatisierten Ride-Sharing Diensten findet sich darüber hinaus bei Narayanan et al. (2020).

Im folgenden Abschnitt wird zunächst der betrachtete Ride-Sharing-Dienst sowie die berücksichtigten Fahrzeugtypen vorgestellt. Anschließend wird im zweiten Abschnitt die Lösungsmethodik erläutert. Basierend darauf erfolgt anschließend die Vorstellung des experimentellen Aufbaus sowie der mittels rechnerischer Simulation gewonnenen Ergebnisse. Abschließend werden die Erkenntnisse und die sich daraus ableitenden Potentiale autonomer Fahrzeuge zusammenfassend wiedergegeben.

4.6.3.2.1 *Service Design und Fahrzeugtypen*

Betrachtet wird das strategische Flottenmanagement eines Ride-Sharing-Dienstes entsprechend dem Use-Case *Pooling*. Der angenommene Dienst ermöglicht in einem begrenzten, urbanen Gebiet die kurzfristige Erfüllung eingehender Fahrthanfragen, wobei Passagiere bereit sind das Fahrzeug während der Fahrt mit Passagieren anderer Anfragen zu teilen.

Eine Fahrthanfrage definiert sich aus Anfragezeitpunkt, Start- und Zielort sowie Anzahl der zu befördernden Passagiere. Aus dem Anfragezeitpunkt ergibt sich außerdem ein Zeitfenster, in dem die Erfüllung der Anfrage erfolgen muss. Dieses beginnt wenige Minuten nach dem Anfragezeitpunkt und endet in Abhängigkeit von der mit einem Faktor multiplizierten Fahrzeit vom Start- zum Zielort. Der Faktorwert spiegelt die im Verhältnis zur Fahrzeit angenommene Toleranz der Passagiere für zusätzliche Wartezeiten und Umwege wieder, die eine effiziente Bündelung von Anfragen ermöglichen.

PAVE

Zur Erfüllung der Fahrthanfragen wird im strategischen Flottenmanagement eine kosteneffiziente Fahrzeugflotte bestimmt. Als Vorgabe wird dabei angenommen, dass die Flotte in der Lage sein muss alle erwarteten Anfragen unter Einhaltung kapazitäts- und zeitbezogener Restriktionen zu erfüllen. Zu diesem Zweck kann eine homogene Flotte, bestehend aus einem Fahrzeugtyp, oder eine heterogene Flotte, bestehend aus verschiedenen Fahrzeugtypen, betrachtet werden. Es gilt dabei die Annahme, dass Fahrthanfragen auf verschiedenen Fahrzeuge aufgeteilt werden können, wenn die Anzahl der zu befördernden Passagiere die Kapazität aller eingesetzten Fahrzeugtypen überschreitet.

Für die Bestimmung der kosteneffizienten Flottenkomposition werden die drei Fahrzeugtypen Kleinwagen, Kleinwagen und Kleinbus in Betracht gezogen. Deren Eigenschaften unterscheiden sich hinsichtlich der verfügbaren Sitze sowie der Höhe der fixen- und variablen Kosten. Die fixen Kosten umfassen die Abschreibung auf den Kaufpreis sowie die pro Fahrzeug anfallenden Fuhrparkverwaltungskosten. Die variablen Kosten setzen sich wiederum aus den durchschnittlich pro Kilometer anfallenden Strom- und Wartungskosten zusammen. Zusätzlich zu diesen Kosten sind bei Annahme eines konventionellen Ride-Sharing-Dienstes die Fahrerkosten pro Fahrzeug zu berücksichtigen.

4.6.3.2.2 Lösungsmethodik

Im ersten Schritt erfolgt für jeden der drei Fahrzeugtypen die Evaluierung einer homogenen Flotte. Dies erfolgt, indem das operative Auftragsmanagement für jeden Fahrzeugtyp anhand unterschiedlicher Nachfrageszenarien optimiert wird. Hinsichtlich dieser Nachfrageszenarien werden zunächst vollständige Informationen angenommen, sodass die Minimierung der Gesamtkosten durch das Lösen eines statischen Tourenplanungsproblems möglich ist. Der übliche Ansatz, zuerst die Flottengröße und dann die Fahrleistung zu minimieren, hat sich zur Minimierung der Gesamtkosten sowohl für konventionelle als auch für automatisierte Flotten als zweckmäßig erwiesen. Die Umsetzung beider Schritte erfolgt mittels der im Optimierungsframework bereitgestellten ALNS. Auf Basis der pro Fahrzeugtyp ermittelten Ergebnisse werden anschließend die jeweiligen Durchschnittskosten pro Fahrthanfrage ermittelt, um den kosteneffizientesten Fahrzeugtypen zu identifizieren.

Auf Basis dieser ersten Ergebnisse erfolgt mittels einfacher Ansätze die Bestimmung zweier heterogener Flotten. Ziel ist es damit zu zeigen, dass heterogene Fahrgemeinschaften ein Potenzial zur Kostenreduzierung haben können. Zukünftig bietet sich zur Bestimmung heterogener Flotten die Adaption eines aus der Literatur bekannten Lösungsansatzes an, wie beispielsweise von Brandão (2009) oder Hiermann et al. (2016) vorgestellt.

Der erste in diesem Beitrag angewandte Ansatz basiert auf der Annahme, dass bei einem konventionellen Ride-Sharing-Dienst auf Grund der hohen Fahrerkosten die Gesamtkosten primär von der Flottengröße abhängen. Vor diesem Hintergrund erfolgt die Bestimmung der heterogenen Flotte auf Basis der für den größten Fahrzeugtypen generierten operativen Tourenpläne. Zu diesem Zweck wird der maximale Besetzungsgrad pro Tour bestimmt, um anschließend Fahrzeuge des größten mit denen des kleinsten zulässigen Fahrzeugtyps zu ersetzen.

Bei dem zweiten Ansatz werden wiederum vom kleinsten Fahrzeugtypen ausgehend die heterogenen Flotten bestimmt. Dies beruht auf der Hypothese, dass sich bei automatisierten Ride-Sharing-Diensten Flotten aus kleinen Fahrzeugen als besonders kosteneffizient herausstellen. Die Idee bei dem Ansatz ist, dass trotz des primären Einsatzes des Kleinwagen, die Passagiere einer Fahrthanfrage nicht auf verschiedene Fahrzeuge aufgeteilt werden müssen. Dies ist einerseits im Sinne der Passagiere und ermöglicht andererseits das Ausnutzen der durch die Anfragen gegebenen Bündelungen. Die Umsetzung erfolgt, indem für die Flotte aus Kleinwagen initiale Tourenpläne berechnet werden, welche Anfragen

PAVE

mit einer kapazitätsüberschreitenden Passagieranzahl nicht berücksichtigen. Anschließend werden solange erst Kleinbusse und anschließend Kleinwagen der Flotte hinzugefügt, bis alle Anfragen eingeplant werden konnten. Abschließend wird die finale Minimierung der Fahrzeuganzahl sowie der Fahrleistung durchgeführt.

Für die Untersuchung der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf On-Demand Ride-Sharing-Dienste wird der Einsatz der durchschnittlich identifizierten homogenen und heterogenen Flotten bei einem dynamischen, operativen Auftragsmanagement simuliert. Da sich aus den in Abschnitt 3.3. präsentierten Untersuchungen ergab, dass die Leistungsfähigkeit bei On-Demand-Diensten generell um 10 bis 20 % geringer ausfällt, werden jedoch alle identifizierten Flotten entsprechend um 20 % vergrößert. Die dynamische Tourenplanung zur Realisierung des operativen Auftragsmanagements erfolgt, indem für jede eingehende Fahrtanfrage eine Re-Optimierung unter Unkenntnis aller zukünftigen Anfragen mittels der im Optimierungsframework integrierten LMNS durchgeführt wird.

4.6.3.2.3 Experimenteller Aufbau

In den Experimenten wird ein Ride-Sharing-Dienst angenommen, welcher Fahrten innerhalb des Berliner S-Bahnringes anbietet. Für die Komposition der Flotte kommen die drei in Tabelle 42 spezifizierten Fahrzeugtypen in Frage. Die in der Tabelle aufgerufenen fixen Kosten umfassen die pro Stunde pro Fahrzeug anfallenden Abschreibungskosten sowie Fuhrparkverwaltungskosten entsprechend dem Lastauto Omnibus-Katalog (2018). Die Kosten für die Anschaffung sowie die variablen Kosten orientieren sich für diese Untersuchung an denen aktueller Elektroautos der entsprechenden Fahrzeugtypen. Für autonome Fahrzeuge wird dabei angenommen, dass die Kosten für die Elektrotechnologie in den nächsten Jahrzehnten soweit sinken, dass die Gesamtkosten trotz Automatisierung vergleichsweise konstant bleiben. Die für die konventionellen Fahrzeuge pro Stunde anfallenden Fahrerkosten sind entsprechend der Planco Consulting GmbH et al. (2015) auf 24,00 € festgesetzt.

	Kleinstwagen	Kleinwagen	Kleinbus
Sitzplätze	2	4	6
Fixe Kosten pro Stunde	2,00 €	2,30 €	2,60 €
Variable Kosten pro Kilometer	0,10 €	0,15 €	0,20 €
Fahrerkosten pro Stunde	24,00 €	24,00 €	24,00 €

Tabelle 42: Parametrisierung der Fahrzeugtypen

Für die Simulation des operativen Auftragsmanagements wurden 30 künstliche Nachfrageszenarien generiert, die sich in der Frequenz und Eigenschaften der zu erfüllenden Fahrtanfragen unterscheiden. Der Planungshorizont ist bei allen Szenarien auf eine 1 Stunde beschränkt, wobei jedoch die Frequenz der Anfragen zwischen einer, zwei und vier pro Minute variiert. Die genaue Anzahl an Fahrtanfragen ergibt sich, wie die Zeitpunkte der Anfragen, aus einem Poisson-Prozess. Die Erfüllungszeitfenster beginnen jeweils 5 Minuten nach dem Anfragezeitpunkt und enden von dem Beginn ausgehend nach der 1,5-maligen Dauer des kürzesten Weges zwischen Start- und Zielort. Die Start- und Zielorte wurden für jede Fahrtanfrage zufällig aus einer Menge von 3906 Standorten gezogen, die aus Konsumentendaten gewonnen wurden. Als Einschränkung bei der Ziehung galt, dass eine Mindestfahrzeit von 5 Minuten gegeben sein muss. Zur Überprüfung der Fahrzeiten sowie der Bestimmung der kürzesten Wege zwischen allen Standorten wurde GraphHopper eingesetzt (GraphHopper, o.J.). Die Anzahl der zu transportierenden Passagiere wurde für jede Anfrage ebenso zufällig bestimmt. Zugrunde gelegt wurde

PAVE

dabei die in Tabelle 43 dargestellte Verteilung, die sich an Taxi-Daten aus New York orientiert (NYC Taxi and Limousine Commission, 2014).

Anzahl Passagiere:	1	2	3	4	5	6
Wahrscheinlichkeit:	70 %	14 %	4 %	4 %	4 %	4 %

Tabelle 43: Wahrscheinlichkeit der Passagieranzahl je Fahrthanfrage

4.6.3.2.4 Ergebnisse

Die Diskussion der Ergebnisse fokussiert sich zunächst auf die homogenen Flotten. Anschließend wird analysiert, inwieweit sich durch die Anpassung zu heterogenen Flotten weitere Kostensenkungspotentiale aufzeigen lassen. Abschließend wird untersucht, ob sich die Erkenntnisse auch bei den Ergebnissen der dynamischen Tourenplanung eines On-Demand-Ride-Sharing-Dienstes widerspiegeln.

Homogene Flotten

In diesem Abschnitt werden anhand der drei Fahrzeugtypen die Kostenpotentiale homogener Flotten untersucht. Dabei stehen insbesondere die in Abbildung 115 dargestellten Durchschnittskosten pro Fahrthanfrage im Fokus. Die Abbildung zeigt deutlich die zu erwartend hohe Kostendifferenz zwischen konventionellen und automatisierten Ride-Sharing-Diensten. Darüber hinaus wird sichtbar, dass sich die Rangfolge bezüglich der Kosteneffizienz der Fahrzeugtypen umkehrt. Während die Durchschnittskosten pro Anfrage bei den konventionellen Flotten mit der Größe des eingesetzten Fahrzeugtyps sinken, steigen sie bei den automatisierten Flotten. Dies bestätigt für diesen Versuchsaufbau die Hypothese, dass auf Grund der sich wandelnden Kostenstruktur kleinere Fahrzeugtypen bei automatisierten Ride-Sharing-Diensten kosteneffizienter sind.

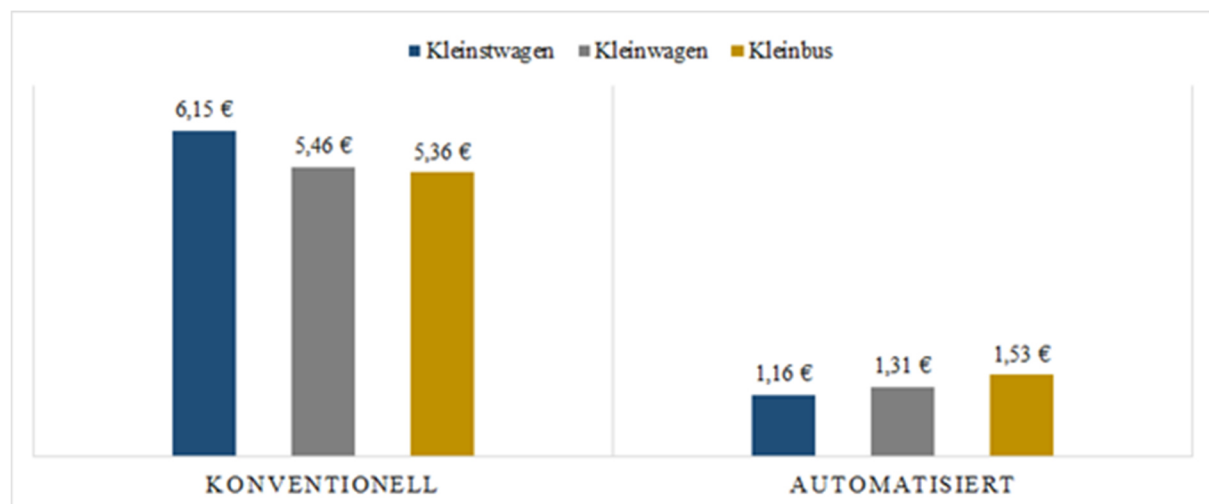


Abbildung 115: Durchschnittskosten pro Fahrthanfrage

Aus der in Abbildung 116 dargestellten Aufschlüsselung der Gesamtkosten geht zudem hervor, dass der Vorteil der Kleinwagen in den geringeren durchschnittlichen variablen Kosten liegt. Die durchschnittlichen fixen Kosten dagegen unterscheiden sich kaum zwischen den Fahrzeugtypen. Die bei den kleineren Fahrzeugtypen durchschnittlich deutlich höheren Fahrerkosten zeigen dafür, warum sich die Rangfolgen bei konventionellen und automatisierten Ride-Sharing-Diensten umkehren.

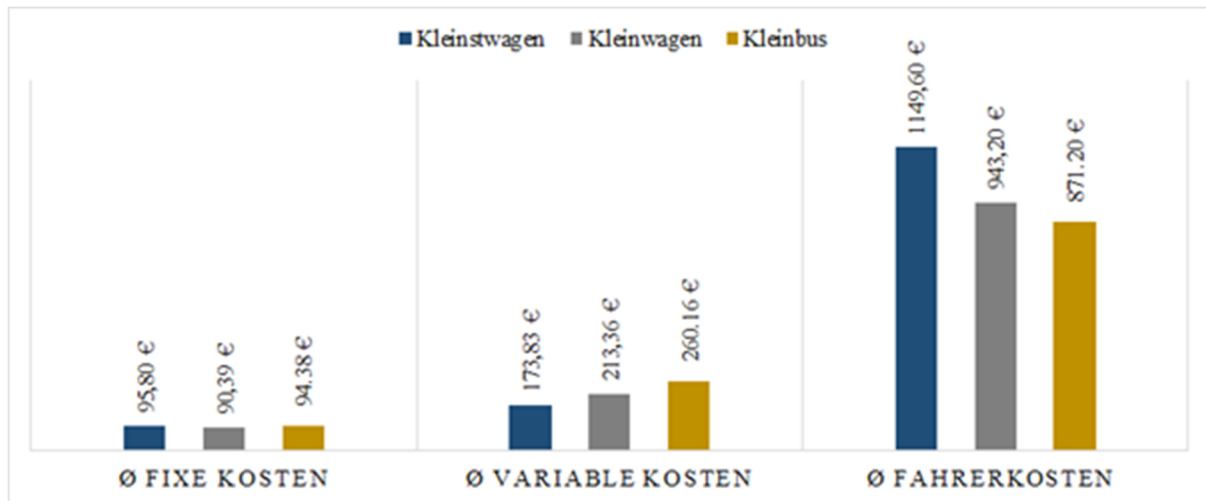


Abbildung 116: Aufschlüsselung der durchschnittlichen Gesamtkosten

In Tabelle 44 sind die für die Fahrerkosten grundlegenden durchschnittlichen Flottengrößen abgetragen. Es zeigt sich, dass durchschnittlich 32 % mehr Kleinwagen als Kleinbusse zur Erfüllung der gleichen Fahrtaufträge benötigt werden. Neben der größeren Flotten ergibt der Vergleich für Kleinwagen eine um durchschnittlich 34 % höhere Fahrleistung. Die niedrigeren variablen Kosten basieren somit nicht auf einer effizienteren Erfüllung der Aufträge, sondern auf den niedrigeren Kosten pro Kilometer. Der betriebswirtschaftlich besonders kosteneffiziente Einsatz automatisierter Kleinwagenflotten ist somit besonders belastend für das öffentliche Straßenverkehrssystem.

	Kleinwagen	Kleinwagen	Kleinbus
Ø Flottengröße	48	39	36
Ø Fahrleistung	1738 km	1422 km	1300 km
Ø Besetzungsgrad pro Fahrzeugkilometer	1,0	1,3	1,4
Ø Besetzungsgrad pro Passagierkilometer	1,5	1,8	2,0

Tabelle 44: Eigenschaften der resultierenden Ride-Sharing-Dienste

Dies spiegelt sich auch in dem durchschnittlichen Besetzungsgrad pro Fahrzeugkilometer und pro Passagierkilometer wider, welche beide mit der Fahrzeuggröße steigen. Die Analyse des durchschnittlichen Besetzungsgrads je Passagierkilometer zeigt zusätzlich, dass bei allen Fahrzeugtypen durchschnittlich maximal die Kapazität des Kleinwagens ausgeschöpft wird. Eine Veränderung der Rangfolge der Durchschnittskosten pro Fahrtauftrag ist somit bei höheren Besetzungsgraden denkbar. Eine erste Recherche anderer Untersuchungen automatisierter Ride-Sharing-Dienste ergab jedoch, mit Werten zwischen 1,13 und 2,16, ähnlich hohe Besetzungsgrade pro Passagierkilometer (Brownell und Kornhauser, 2014; Hörl, 2017; Gurusurthy und Kockelman, 2018).

Heterogene Flotte

Ausgehend von den jeweils kosteneffizientesten Fahrzeugtypen wird im Folgenden untersucht, ob sich durch die Erweiterung zu heterogenen Flotten Kostensenkungspotentiale eröffnen. Die entsprechenden Durchschnittskosten pro Fahrtanfrage sind in Abbildung 117 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass sowohl für den konventionellen als auch den automatisierten Ride-Sharing-Dienst eine Kostensenkung durch heterogene Flotten möglich ist. Im Falle des konventionellen Dienstes kann dies, wie erhofft, ausgehend vom größten Fahrzeugtyp erreicht werden. Für den automatisierten Dienst wird dies wiederum dadurch erreicht, dass die Kleinwagenflotten um größere Fahrzeuge ergänzt werden, um entsprechend große Anfragen effizient zu erfüllen.

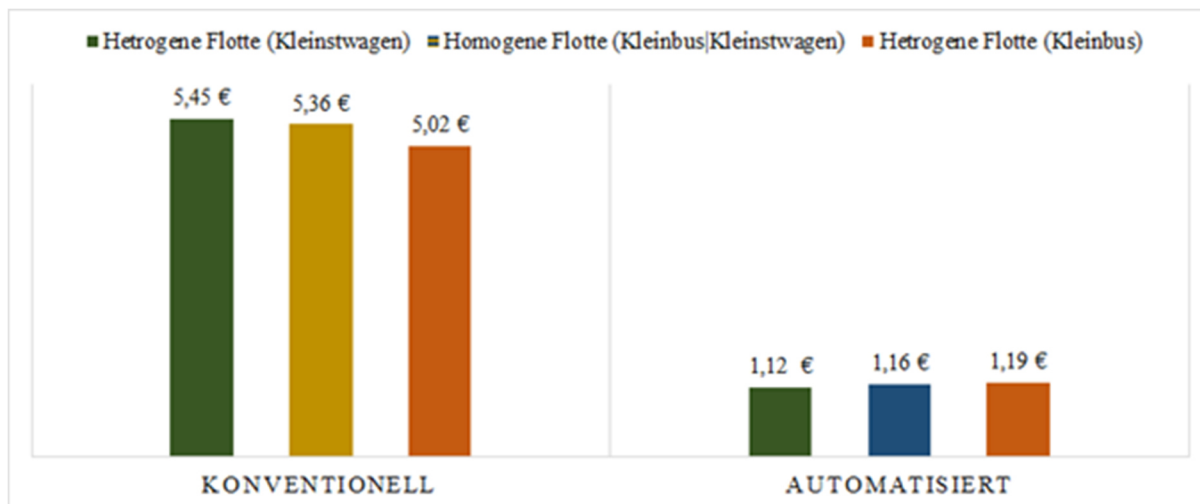


Abbildung 117: Vergleich der Durchschnittskosten pro Fahrtanfrage bei homo- und heterogener Flotte

Die durchschnittliche Zusammensetzung der heterogenen Flotten unterscheidet sich dabei deutlich zwischen den beiden Ansätzen. So wird aus Tabelle 45 deutlich, dass die vom Kleinstwagen ausgehende Flotte nur um wenige größere Fahrzeuge ergänzt wurde. Die Verteilung der durchschnittlichen Anzahl der Fahrzeuge je Typ ist dagegen beim vom Kleinbus ausgehenden Ansatz fast gleichverteilt.

	Kleinstwagen	Kleinwagen	Kleinbus
Ausgehend vom Kleinstwagen	34	1	8
Ausgehend vom Kleinbus	13	11	12

Tabelle 45: Durchschnittliche Anzahl an Fahrzeugen je Typ

Übertragbarkeit auf On-Demand-Ride-Sharing-Dienste

Zuletzt wird die Kosteneffizienz der durchschnittlich identifizierten Flotten im Rahmen der dynamischen Tourenplanung eines On-Demand Ride-Sharing-Dienstes analysiert. Der Fokus liegt dabei zunächst wieder auf den in Tabelle 46 zusammengefassten Ergebnissen der homogenen Flotten. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Rangfolgen der Fahrzeugtypen weder für den konventionellen noch für automatisierten Dienst im Vergleich zur ersten Untersuchung verändert. Die Durchschnittskosten pro Fahrtanfrage steigen jedoch beim automatisierten Dienst im Durchschnitt etwa entsprechend der Flottenvergrößerung um 18 bis 21 %. Beim konventionellen Dienst fällt die Steigerung mit 44 bis 50 % auf Grund der mit der Flottengröße steigenden Fahrerkosten noch deutlich prägnanter aus.

	Kleinstwagen	Kleinwagen	Kleinbus
Konventionell	9,21 € (+50 %)	7,97 € (+46 %)	7,73 € (+44 %)
Automatisiert	1,40 € (+21 %)	1,57 € (+19 %)	1,81 € (+18 %)

Tabelle 46: Durchschnittskosten pro Anfrage bei homogener Flotten eines On-Demand-Dienstes

In Hinblick auf die heterogenen Flotten zeigen die in Abbildung 118 dargestellten Ergebnisse, dass die Durchschnittskosten pro Fahrtanfrage jeweils die der kosteneffizientesten homogenen Flotte deutlich übersteigen. Die zuvor aufgezeigten Potentiale heterogener Flotten lassen sich somit nicht ohne weiteres auf die dynamische Tourenplanung von On-Demand Ride-Sharing-Diensten übertragen. Um diese zukünftig realisierbar zu machen, müssen entsprechend neue Algorithmen entwickelt werden, welche unterschiedliche Fahrzeugtypen bei der dynamischen Tourenplanung zielgerichteter einsetzen können, indem beispielsweise die Bedarfe zukünftiger Anfragen antizipiert werden.

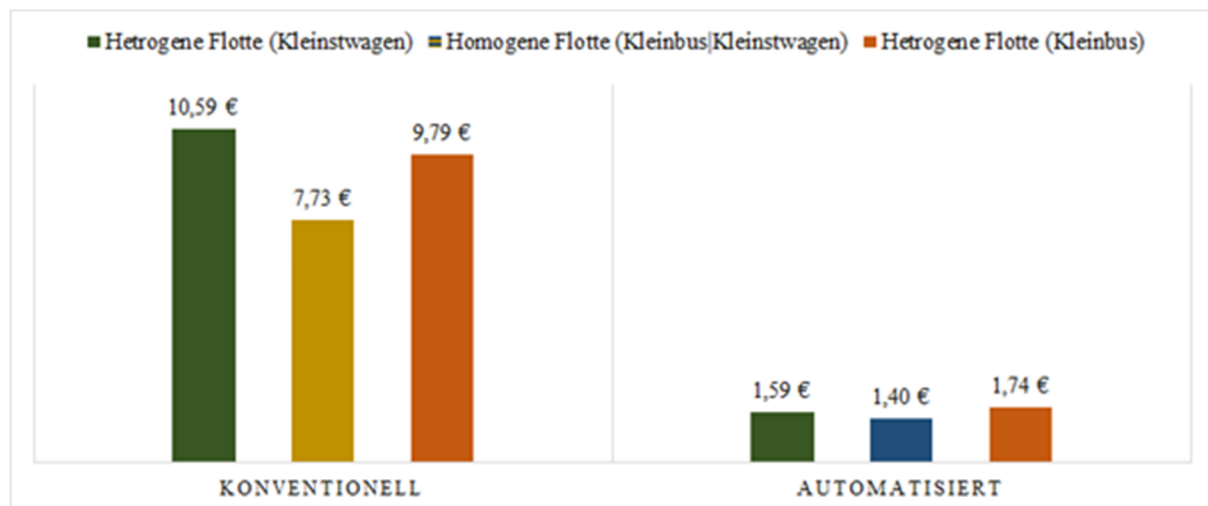


Abbildung 118: Vergleich Durchschnittskosten pro Fahrtanfrage bei homo- und heterogenen Flotten eines On-Demand-Dienstes

4.6.3.2.5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde das strategische Flottenmanagement automatisierter Ride-Sharing-Dienste untersucht. Zu diesem Zweck erfolgte die Evaluation homogener Flotten mittels einer das operative Auftragsmanagement simulierenden statischen Tourenplanung. Anschließend erfolgte die Erweiterung zu heterogenen Flotten durch die Umsetzung erster einfacher Ansätze. Zuletzt wurde die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf On-Demand Ride-Sharing-Dienste analysiert, indem das operative Auftragsmanagement nochmals mittels einer dynamischen Tourenplanung simuliert wurde.

Die Ergebnisse zeigen für Ride-Sharing-Dienste das große Kostensenkungspotenzial von Flotten autonomer Fahrzeuge. Darüber hinaus wurde insbesondere deutlich, dass die sich verändernde Kostenstrukturen signifikant auf die Rangfolge der Kosteneffizienz unterschiedlich großer Fahrzeugtypen auswirken. So ergab sich für automatisierte Ride-Sharing-Dienste, dass der kleinste Fahrzeugtyp die kosteneffizienteste Option darstellt. Diesem betriebswirtschaftlichen Vorteil von Flotten autonomer Kleinstwagen stehen jedoch mit größeren Flotten und höheren Fahrleistungen Nachteile für das öffentliche Straßenverkehrssystem gegenüber. Zusätzlich würde damit die Chance einer umfangreichen Konsolidierung von Fahrten durch automatisierte Ride-Sharing-Dienste sinken. Es

gilt also bei der Bewertung der Potentiale automatisierter Ride-Sharing-Dienste zu berücksichtigen, ob öffentliche oder betriebswirtschaftliche Interessen bei der Flottenkomposition im Vordergrund stehen.

Neben der Analyse homogener Flotten wurden erste Potentiale heterogener Flotten aufgezeigt, deren Ausschöpfung insbesondere in der dynamischen Tourenplanung jedoch eine Herausforderung für zukünftige Arbeiten darstellt. Darüber hinaus sollte untersucht werden, unter welchen Bedingungen höhere Besetzungsgrade erreicht werden können und wie sich dies auf die Kosteneffizienz unterschiedlicher Fahrzeugtypen auswirkt. Dabei wäre auch eine Erweiterung um Fahrtenfragen sinnvoll, die einen bestimmten Fahrzeugtyp erforderlich machen, wie beispielsweise im Falle von Rollstuhlfahrern oder Familien.

4.6.3.3 Bedeutung von Nachfrage- und Erfüllungssteuerung

In dem hier zusammengefassten Beitrag konzentrieren wir uns auf die Untersuchung der operativen Nachfrage- und Erfüllungssteuerung am Beispiel vom Use-Case Pooling. Für einen darüber hinaus gehenden Einblick in die Methodik und Ergebnisse sei auf das zur Veröffentlichung in einer wissenschaftlichen Fachzeitschrift angenommene Paper verwiesen (siehe Haferkamp, J et al 2021).

Nachfrage- und Erfüllungssteuerung stellen zentrale Stellschrauben beim operativen Management autonomer Fahrzeugflotten dar. Als Nachfragesteuerung bezeichnen wir alle Entscheidungen, aus denen sich ergibt, welche Fahrtenfragen von Reisenden erfüllt werden. Hierbei lässt sich generell differenzieren zwischen Diensten, die wie beispielsweise der BerlKönig als Teil des ÖPNV einer Beförderungspflicht unterliegen, sowie privatwirtschaftlichen Diensten, welche individuell über die Annahme einer Fahrtenfrage entscheiden können. Darüber hinaus lässt sich unterscheiden, in welchem Umfang in der Nachfragesteuerung eine systematische Auswahl der zu erfüllenden Fahrtenfragen erfolgt. Als Erfüllungssteuerung bezeichnen wir daher Entscheidungen, die darauf abzielen die angenommenen Fahrten möglichst effizient mittels einer gegebenen Fahrzeugflotte zu erfüllen. Hierbei gibt es auf der einen Seite Dienste, bei denen Fahrten mittel bis langfristig vor Antritt gebucht werden, wodurch Fahrtenfrage und Erfüllung getrennt sind. Bei solchen Reservierungsdiensten erfolgt die Erfüllungssteuerung auf Basis vollständiger Informationen hinsichtlich der zu erfüllenden Fahrten. Dem gegenüber erfolgt bei den aktuell besonders im Fokus stehenden On-Demand-Diensten die Nachfrage- und Erfüllungssteuerung simultan unter Unsicherheit der zukünftigen Nachfrage. In unseren Untersuchungen lag der Fokus primär auf On-Demand-Diensten, wobei aus den Ergebnissen auch Potentiale für Reservierungsdienste abgeleitet werden können.

Im Kontext des Verbundprojekts verfolgen wir mit diesem Beitrag drei Ziele: (1) einen Überblick zu geben, wie Nachfrage- und Erfüllungssteuerung in der einschlägigen Literatur zur dynamischen Tourenplanung implementiert wurde; (2) zu untersuchen, unter welchen Bedingungen welche Art von Steuerung angemessen ist und wie Ride-Sharing-Dienste von einer optimierten Nachfrage- bzw. Erfüllungssteuerung profitieren; (3) aufzuzeigen, wie unterschiedliche Designs Einfluss auf die Leistungsfähigkeit eines Dienstes haben. Zum Erreichen dieser Ziele erfolgte zunächst eine Differenzierung von Strategien für die Nachfrage- und Erfüllungssteuerung sowie eine Einordnung der in der Literatur vorgestellten Algorithmen. Anschließend wurden zum Erreichen des zweiten und dritten Ziels umfassende rechnerische Experimente durchgeführt, in denen systematisch der Ansatz für Nachfrage- und/oder Erfüllungssteuerung variiert.

Bei der Einordnung der Literatur wurde deutlich, dass die Strategien bei der Nachfrage- und Erfüllungssteuerung von sehr einfachen, kurzsichtigen bis hin zu komplexen, die zukünftige Nachfrage antizipierenden Strategien reichen. Darüber hinaus variieren in der Literatur die für das jeweilige

PAVE

Dienstleistungskonzept zugrundeliegenden Annahmen und damit die Zielfunktion sowie die Bedeutung der Nachfrage- und Erfüllungssteuerung. So liegt der Fokus bei Annahme einer Beförderungspflicht im Kontext von On-Demand-Diensten in der Regel auf der Minimierung der Wartezeit mittels einer leistungsfähigen Erfüllungssteuerung. Dahingegen wird bei Diensten ohne Beförderungspflicht mehrheitlich die Maximierung der Anzahl der erfüllten Fahrtanfragen als Ziel angegeben. Dies wird im Kontext von Ride-Sharing-Diensten primär durch einen effizienten Einsatz der Fahrzeugflotte angestrebt. Die Möglichkeit der Maximierung der erfüllten Fahrtanfragen durch einen ausgeklügelten Annahmealgorithmus findet sich dagegen eher bei verwandten Problemen aus dem Bereich der Frei-Haus-Lieferungen.

Im Rahmen der rechnerischen Experimente wurde ein privatwirtschaftlicher Ride-Sharing-Dienst angenommen, der mittels Nachfrage- und Erfüllungssteuerung die Anzahl der erfüllten Aufträge maximiert. Betrachtet wird dabei ein begrenzter Planungshorizont von wenigen Stunden. Innerhalb dieses Planungshorizonts gehen kurzfristig Fahrtanfragen ein, zu deren Erfüllung eine zentralisiert gesteuerte Flotte an Fahrzeugen bereitsteht. Der Nachfragesteuerung obliegt für jede eingehende Fahrtanfrage die Entscheidung über deren Annahme. Hierfür wird zunächst geprüft, ob eine Erfüllung unter Einhaltung gegebener Zeit- und Kapazitätsrestriktionen möglich ist. Darüber hinaus können beispielsweise zukünftige Anfragen antizipiert werden, um den erwartbaren Aufwand einer Anfrage als Grundlage für die Annahmeentscheidung zu evaluieren. Anschließend zur Annahme einer Anfrage erfolgt durch die Erfüllungssteuerung die Zuordnung zu einem Fahrzeug sowie die detaillierte Planung der fortlaufend abzuarbeitenden Touren. Hierbei besteht die Möglichkeit nur die bereits angenommenen Anfragen zu berücksichtigen oder zusätzlich für die Zukunft erwartbare Annahmen von Fahrtanfragen zu antizipieren.

Für die Untersuchungen wurden vier Entscheidungspolitiken differenziert, die sich in der Realisierung der Nachfrage- und/oder Erfüllungssteuerung unterscheiden. Der Unterschied liegt dabei insbesondere darin, ob Entscheidungen nur auf den aktuellen Informationen der stochastischen Nachfrage basieren oder vollständige Informationen über die zukünftige Nachfrage zugrunde gelegt werden. Der erste der vier untersuchten Ansätze, bezeichnet als „Basissteuerung“, greift nur auf die jeweils aktuellen Informationen zu, indem - wenn möglich - eine eingehende Fahrtanfrage zu minimal zusätzlicher Reisezeit einplant wird. Der zweite Ansatz legt den Fokus auf die Nachfragesteuerung. Hier werden die vollständigen Informationen über die zukünftige Nachfrage dazu genutzt ressourcenintensive Anfragen gezielt abzulehnen. Das Gegenstück mit Fokus auf der Erfüllungssteuerung nutzt die vollständigen Informationen, um die Annahme von Fahrtanfragen zu antizipieren, sodass Fahrzeugtours entsprechend optimiert werden können. Der letzte Ansatz stellt eine Kombination dar, sodass das Optimierungspotenzial bei Nachfrage- und Erfüllungssteuerung ausgeschöpft wird. Die Basissteuerung spiegelt somit die Leistungsfähigkeit eines On-Demand-Dienstes wieder, der keine zusätzlichen Informationen im operativen Auftragsmanagement berücksichtigt. Die anderen Ansätze bilden obere Schranken bezüglich des Potenzials von Nachfrage- und Erfüllungssteuerung ab, welches je nach Datengrundlage partiell realisiert werden kann. Zusätzlich bilden die Ergebnisse der letzten beiden Ansätze mit Fokus auf Erfüllungssteuerung auch die Leistungsfähigkeit von Reservierungsdiensten ab. Da bei solchen Diensten die Erfüllungssteuerung erst nach Abschluss der Nachfragesteuerung erfolgt, lässt sich diese immer unter vollständigen Informationen umsetzen. In diesem Fall stellt somit der Ansatz mit Fokus nur auf Erfüllungssteuerung die Basissteuerung dar, während der kombinierte Ansatz das Potenzial einer gezielten Nachfragesteuerung für Reservierungsdienste aufzeigt.

Zur Evaluierung wurden die vier Ansätze mittels der im Optimierungsframework implementierten Algorithmen abgebildet und Instanzen auf Basis von Realdaten entwickelt. Außerdem wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um den Einfluss unterschiedlicher Umweltbedingungen zu

PAVE

untersuchen. Diese betreffen die Flottengröße zur Variation des Verhältnisses von Nachfrage und Ressourcen, die Länge der Planungsperiode sowie Dauer der Fahrzeiten zur Veränderung der zeitlichen und geographischen Dichte der Nachfrage sowie die für Kunden maximal zulässige Verspätung zur Variation des Serviceniveaus. Die maximale Verspätung ergibt sich aus der Wartezeit zwischen Fahratanfrage und Durchführung sowie der Zeit, die für Umwege oder Ein- und Aussteigen anderer Kunden im Zuge von geteilten Fahrten benötigt wird.

Als beispielhaftes Ergebnis der Experimente ist in Abbildung 119 für die vier vorgestellten Ansätze die Annahmerate der Fahratanfragen bei variierender Flottengröße dargestellt. Die Symbole zeigen die durchschnittlichen Ergebnisse aus hundert in Nachfrage sich unterscheidender Simulationsdurchläufe, die verbindenden Linien verdeutlichen den Trend und die Schattierung zeigt die Varianz der Ergebnisse.

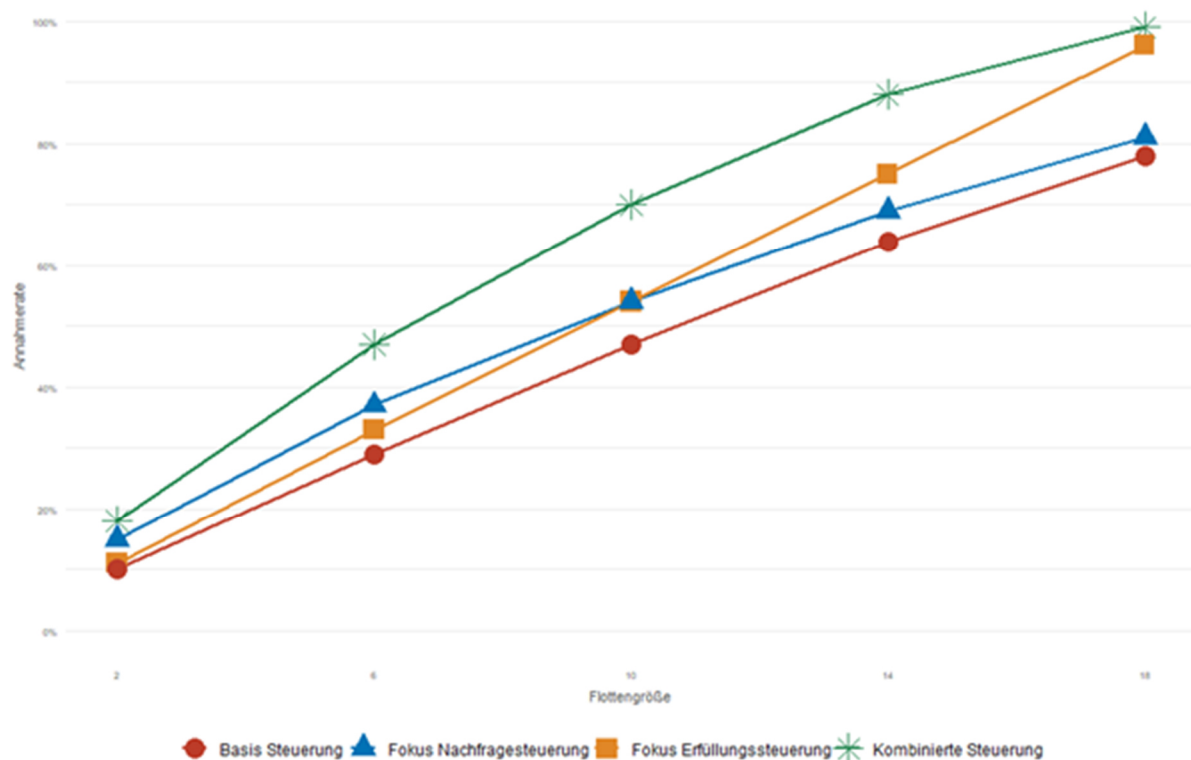


Abbildung 119: Annahmeraten bei variierenden Ressourcen-Nachfrage-Verhältnissen

Wie zu erwarten stellt die Basissteuerung hier sowie bei den darüber hinaus durchgeführten Experimenten eine untere Schranke hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der Ansätze dar. Das Gleiche gilt umgekehrt für den kombinierten Ansatz, welcher durchweg eine obere Schranke aufzeigt. Interessant sind insbesondere die gegenläufigen Trends je nach Fokus auf Nachfrage- oder Erfüllungssteuerung. Im Kontext aller Experimente wurde deutlich, dass es neben dem Verhältnis von Nachfrage und Ressourcen insbesondere von der zeitlichen Dichte der Nachfrage abhängt, ob Nachfrage- oder Erfüllungssteuerung stärker zu einem leistungsfähigen Dienst beiträgt. Dabei eröffnet die Nachfragesteuerung insbesondere bei niedrigen Annahmeraten und einer heterogenen Nachfrage Optimierungspotenzial, während die Erfüllungssteuerung im gegenteiligen Fall besonders effektiv ist. In den weiterführenden Analysen konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass sich die Potentiale auch aus unterschiedlichen Wirkungsweisen der Nachfrage- oder Erfüllungssteuerung ergeben. Während durch die effiziente Steuerung der Nachfrage primär eine Reduzierung der durchschnittlichen Fahrzeit pro Fahrt erreicht wird, bedingt die Erfüllungssteuerung ein effizienteres Bündeln der Fahrten. Diese Ergebnisse zeigen auch den Vorteil von Reservierungsdiensten, welche das Potenzial der

PAVE

Erfüllungssteuerung, unabhängig von zuverlässigen Nachfrageprognosen, ausschöpfen können. Gleichzeitig wird deutlich, dass auch solche Dienste sehr von einer auf Prognosen basierenden effizienten Nachfragesteuerung profitieren können.

Neben der Leistungsfähigkeit aus Sicht des Dienstes erfolgte eine Analyse der sich für Kunden ergebenden Konsequenzen von Nachfrage- und Erfüllungssteuerung. Die Abbildung 120 zeigt stellvertretend anhand der Flottengröße variierenden Sensitivitätsanalyse die durchschnittlichen Ergebnisse aller Fahrtanfragen als Dichteverteilung. Hierzu sei angemerkt, dass in den Simulationsläufen nur Reihenfolge sowie Anfragezeitpunkt der Fahrtanfragen variiert, die Kombinationen aus Start- und Zielort jedoch zugunsten von Analysen der Fahrten konstant bleiben. Die erste Grafik der Abbildung zeigt die Annahmewahrscheinlichkeit pro Fahrt und macht deutlich, dass dieses ohne gezielte Nachfragesteuerung für alle Fahrtanfragen um die 50% liegt. Dagegen zeigt sich bei den Ansätzen mit einer optimierten Nachfragesteuerung eine deutliche Varianz der Annahmewahrscheinlichkeit, welche deren Abhängigkeit von den konstanten Eigenschaften einer Fahrtanfrage nahelegt. Die konsequente Ablehnung bestimmter Fahrtanfragen, könnte dabei schnell zur Unzufriedenheit betroffener Kunden führen und den Dienst damit insgesamt als weniger attraktiv wirken lassen.

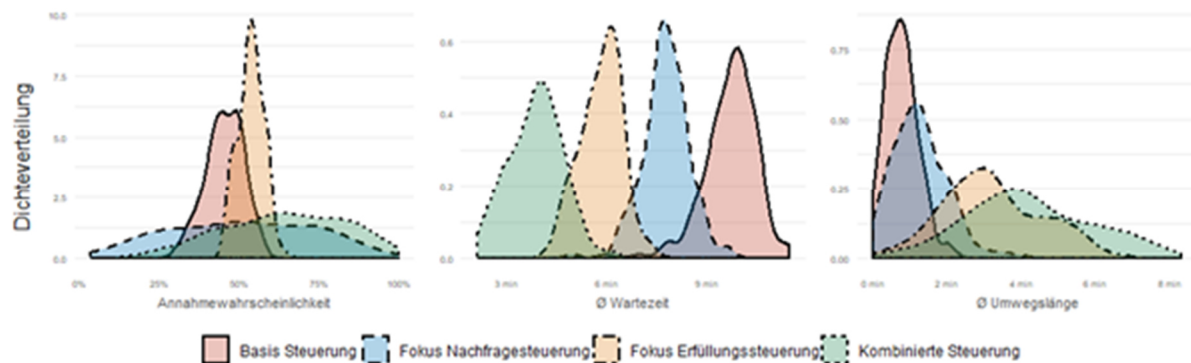


Abbildung 120: Dienstqualität nach Fahrtanfrage

Die zweite Grafik zeigt, dass die durchschnittliche Wartezeit bei allen Ansätzen nicht deutlich von der Fahrtanfrage abhängt, sich jedoch das Niveau zwischen den Ansätzen unterscheidet. Die letzte Grafik macht deutlich, dass unterschiedliche Niveaus auch bei der durchschnittlichen Dauer der Umwege beobachtbar sind, wobei die Fahrtanfragen bei den Ansätzen mit Optimierung der Erfüllungssteuerung zusätzlich eine deutlich variierende Dauer des durchschnittlichen Umweges aufzeigen. Insgesamt lässt sich somit schließen, dass die Nachfragesteuerung einerseits über die Annahmeweisung Fahrtanfragen diskriminiert und die Erfüllungssteuerung andererseits über die Dauer des Umweges. In den weiteren Analysen konnte außerdem gezeigt werden, dass die Annahmewahrscheinlichkeit bei dem Fokus auf die Nachfragesteuerung mit der geographischen Zentralität von Start- und Zielort korreliert sowie mit der Länge der Fahrtdauer. Es werden also primär kurze Anfragen aus dem Kerngebiet bedient. Die Fahrtlänge weist darüber hinaus eine starke Korrelation mit der durchschnittlichen Dauer der Umwege beim Fokus auf die Erfüllungssteuerung auf. Im Falle von längeren Fahrten müssen Kunden somit tendenziell längere Umwege in Kauf nehmen, wobei dies bei anderen Untersuchungen häufig bereits beim Dienstleistungsdesign angenommen wird.

Zusammengefasst zeigen die Ergebnisse unterschiedliche Wirkungsweisen von Nachfrage- und Erfüllungssteuerung, also der Auftragsannahme und Auftragsabwicklung. Dabei wird deutlich, dass für On-Demand Ride-Sharing Dienste insbesondere die Kombination einer komplexen Nachfrage- und Erfüllungssteuerung hohes Potenzial birgt, welches jedoch mit Nachteilen für die Kunden verbunden

PAVE

ist. Darüber hinaus hängt es von den Umweltbedingungen ab, ob die Beschränkung auf eine komplexe Nachfrage- oder Erfüllungssteuerung eine leistungsfähige Alternative darstellt. Ähnliches gilt für Reservierungsdienste, welche beispielsweise bei einem entsprechenden Nachfrageüberschuss von einer effizienten Nachfragesteuerung profitieren können. Mit Blick auf automatisierte Ride-Sharing Dienste müssen die Ergebnisse auch im Licht der sich wandelnden Kostenstrukturen bzw. der in Abschnitt 3.2. identifizierten Konsequenzen betrachtet werden. Diese zeigten unter anderem eine sinkende Bedeutung des Bündelns mittels großer Fahrzeugtypen zugunsten kleinerer, kostengünstigerer Fahrzeugtypen, was zukünftig auf eine Bedeutungsverschiebung von Erfüllung zur Nachfragesteuerung hindeutet. Damit einher geht eine Minderung der kostenseitig durch die nachfolgend durchgeführte Erfüllungssteuerung entstehenden Vorteile von Reservierungsdiensten mit Beförderungspflicht. Für automatisierte, privatwirtschaftliche Ride-Sharing-Dienste birgt somit insbesondere eine gezielte Nachfragesteuerung Potenzial zur Kostenminimierung, mit der Konsequenz, dass sich das Angebot tendenziell auf kurze Fahrten innerhalb zentraler Gebiete mit hoher Nachfragedichte beschränkt.

4.6.4 Zusammenfassung

Die Evaluation der im Projekt identifizierten Transport- und Mobilitätsdienstleistungen erfolgt in diesem Kapitel (4.6) aus betriebswirtschaftlicher Sicht mittels Methoden des Operations Research. Zu diesem Zweck wurde ein Optimierungsframework entwickelt, welches Algorithmen zur Untersuchung der Use Cases mit Fokus auf das strategische Flottenmanagement und das operative Auftragsmanagement ermöglicht. Zudem wurde eine Schnittstelle zur Verkehrssimulation MATSim implementiert, um die zum Management automatisierter Fahrzeugflotten entwickelten Lösungsansätze in einer realitätsnahen Simulationsumgebung zu evaluieren. Die durchgeführten Untersuchungen eröffnen Einblicke in die Wirkungsweise zukünftiger, innovativer Dienste und zeigen die betriebswirtschaftlichen Potentiale automatisierter Transport- und Mobilitätsdienstleistungen auf.

4.7. Ableitung von Fahrzeuganforderungen und energetische Bewertung (RBosch)

Für die optimale energetische Auslegung des Antriebsstrangs und weiterer Fahrzeugkomponenten ist es wichtig die Nutzungscharakteristiken eines Fahrzeugs zu kennen. Für die heute üblichen privaten PKWs, die überwiegend von ihren Besitzern gefahren werden, stehen solche Nutzungscharakteristiken als gemessene Datensätze zur Verfügung. Über einen 24h Zeitraum werden PKWs typischerweise nur für einen kurzen Zeitraum verwendet und legen nur geringe Wegstrecken zurück. Gleichzeitig gibt es eine große Spannbreite im Nutzungsverhalten.

Für neue Mobilitätskonzepte, wie z.B. die im Kapitel 4.4 beschriebenen autonom vernetzten Fahrdienste, kann man dagegen ein gänzlich anderes Nutzungsverhalten der Flottenfahrzeuge erwarten. Aus ökonomischen Gründen ist es wünschenswert, dass die Fahrzeuge innerhalb eines 24h Zeitraums möglichst häufig in Betrieb sind und nur wenig Stand- und Wartungszeiten anfallen. Dementsprechend sind deutlich höhere tägliche Fahrstrecken pro Fahrzeug zu erwarten. Da für die neuen Mobilitätsdienste bisher nur sehr rudimentäre Datensätze zur Nutzungscharakteristik der Fahrzeuge zur Verfügung stehen (bzw. praktisch keine für einen autonomen Flottenbetrieb), kommt der computergestützten Simulation detaillierter Nutzungscharakteristiken in der Fahrzeugauslegung große Bedeutung zu.

In der Literatur werden hierzu verschiedene Ansätze beschrieben, die auf der Technik der mikroskopischen Verkehrssimulation beruhen (siehe z.B. da Rocha et al. 2013; Hou et al. 2015). Die Autoren finden dabei eine relativ gute Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen aerodynamischen Geschwindigkeiten, aber deutliche Abweichungen beim Beschleunigungsverhalten, da unter anderem stochastische Oszillationen um die Zielgeschwindigkeit nicht realistisch abgebildet werden. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Amirjamshidi & Roorda (2015) mit einer Methode, die auf einer Mischung aus Wegetagebüchern und Verkehrssimulation besteht. Song, Yu & Zhang (2012) betonen die Notwendigkeit eines sorgfältig kalibrierten Verkehrsmodells (siehe Kap 4.5), für den Erfolg der Methode. Aber selbst bei sorgfältiger Kalibrierung kann es zu unrealistischen Geschwindigkeitsprofilen kommen, weil auch mikroskopische Verkehrsmodelle typischerweise auf makroskopische Verkehrsflussparameter wie die durchschnittliche Geschwindigkeit oder Verkehrsdichte kalibriert werden, anstatt auf instantane Geschwindigkeiten oder Beschleunigungen (da Rocha et al. 2013; Song, Yu & Zhang 2012). Daher sind simulierte Geschwindigkeitsprofile häufig nicht genau genug für die Anwendung in der Fahrzeugauslegung.

Ziel dieses Abschnitts ist es ausgehend von der Transportsimulationsumgebung MATSim (Horni, Nagel & Axhausen 2016) eine Methode zur Simulation von Fahrzeugnutzungscharakteristiken und detaillierter Fahrzeugtrajektorien zu entwickeln, die den Anforderungen der Fahrzeugauslegung gerecht wird. Insbesondere sollen dabei folgende Punkte erfüllt werden:

- Simulation der Fahrbewegungen ganzer Fahrzeugflotten in einem städtischen Ballungsraum über einen Zeitraum von 24 Stunden unter Berücksichtigung des Umgebungsverkehrs.
- Aufzeichnung des Fahrzeugstatus (Warten, Fahrt mit n Fahrgästen, Leerfahrt, Laden, ...) und der Fahrstrecken.
- Detaillierte (instantane) Geschwindigkeitsprofile der einzelnen Fahrten für die energetische Auslegung des Antriebsstrangs und weiterer Fahrzeugkomponenten

In Unterabschnitt 4.7.2 wird die Methodik dann zur Ableitung von Fahrzeugnutzungscharakteristiken für verschiedene der in Kapitel 4.1 beschriebenen Zukunftsszenarien angewandt.

4.7.1 Berechnung des Energieverbrauchs neuer Fahrzeugkonzepte und Dienste (RBosch)

Erweiterung der bestehenden Verkehrsflusssimulation um ein Modul zur detaillierten Berechnung des Energieverbrauchs neuer Fahrzeugkonzepte und Dienste.

Fahrzeugtrajektorien aus MATSim

MATSim (Horni, Nagel & Axhausen 2016) ist ein Open Source Framework zur agentenbasierten Simulation großer multi-modaler Transportnetze. Die Umlegung der Verkehrsnachfrage erfolgt durch ein co-evolutionären Algorithmus, der es den Agenten erlaubt in einem iterativen Prozess für sich optimale Verkehrsmittel, Wege und Reisezeiten zu finden. Dabei stehen sie im Wettbewerb mit anderen Agenten, mit denen sie sich die Kapazitäten der Transportinfrastruktur teilen bis ein stochastisches Nutzergleichgewicht erreicht wird. Jede Aktion, die ein Agent dabei tätigt, wird dabei aufgezeichnet. Dazu gehören auch die Zeitpunkte zu denen einzelne Agenten bestimmte Straßenabschnitte (links in der Nomenklatur von MATSim) betreten und wieder verlassen. Daher lassen sich Trajektorien, sowie zeitliche Status- und Geschwindigkeitsprofile einzelner Agenten und damit auch Fahrzeuge praktisch direkt aus MATSim extrahieren (Abbildung 121 und Abbildung 122).

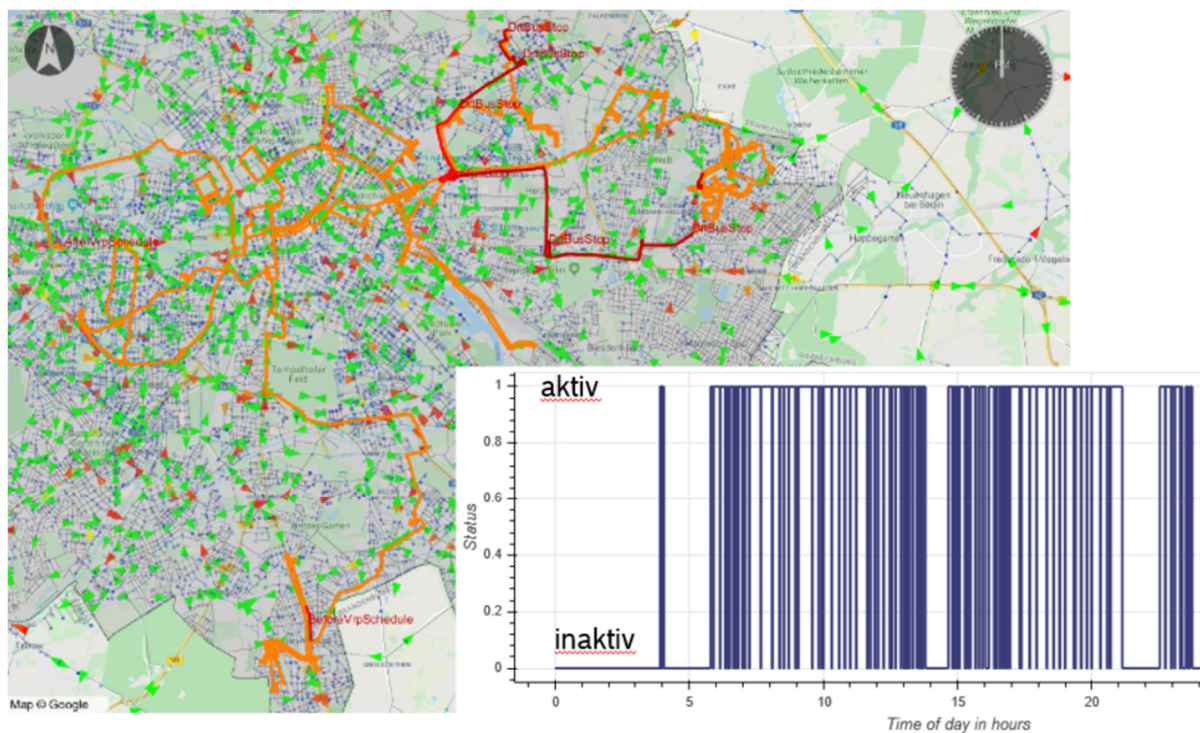


Abbildung 121: Aus der Verkehrssimulation MATSim abgeleitete Trajektorie und Statusprofil eines beispielhaften Flottenfahrzeugs für die Dauer eines Tages.

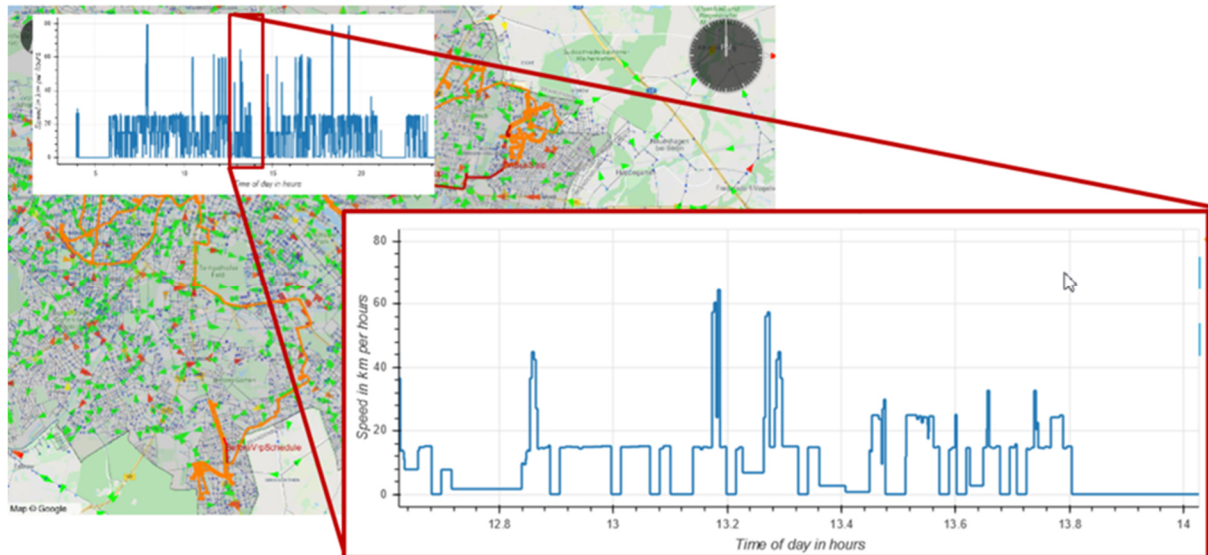


Abbildung 122: Aus MATSim gewonnenes Geschwindigkeitsprofil eines beispielhaften Flottenfahrzeugs für die Dauer eines Tages.

Die Ausschnittsvergrößerung in Abbildung 122 zeigt die durch MATSim's vereinfachte Fahrdynamik verursachte Stufenbildung. Instantane Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sind nicht direkt ableitbar.

Durch die approximative Fahrdynamik in MATSim, welche auf einem Warteschlangenmodell beruht, weisen die Geschwindigkeitsprofile allerdings nur eine beschränkte Genauigkeit auf, da nur Durchschnittsgeschwindigkeiten auf Links bestimmt werden können. Dadurch geht jede Auflösung auf dem sub-link Level verloren was zu einer ausgeprägten Stufenform der Geschwindigkeitsprofile führt (siehe Abbildung 122, ein Link ist dabei die kleinste aufgelöste Einheit im synthetischen Straßennetz von MATSim, typischerweise die Verbindung zwischen zwei Kreuzungen). Instantane Geschwindigkeiten und Beschleunigungsvorgänge, die für eine detaillierte Energiebetrachtung oder die Ableitung von Anforderungen an den Antriebsstrang und andere Komponenten des Fahrzeugs erforderlich sind, lassen sich damit nicht modellieren.

Eine grundlegende Verbesserung des Fahrdynamikmodells in MATSim würde die Anforderungen an die Rechenleistung weit über ein vertretbares Maß hinaus steigern und ist daher nicht realisierbar. Daher wurde eine Methode entwickelt, die aufbauend auf den MATSim Ergebnissen nachgelagert die Genauigkeit der Geschwindigkeitsprofile erhöht.

Anreicherung mit hochaufgelösten Fahrzyklen

Die Methode basiert auf der Anreicherung der Durchschnittsgeschwindigkeitsprofile aus MATSim mit hochaufgelösten Fahrzyklen, die eine große Bandbreite von unterschiedlichen Fahrsituationen und Straßentypen abdecken. Die Zyklen des CADC (Common Artemis Driving Cycles, <https://dieselnet.com/standards/cycles/artemis.php>) bestehen aus drei Varianten für unterschiedliche Geschwindigkeitsbereiche: urban (< 60 km/h), road (< 100 km/h) und motorway (< 150 km/h). Der von Bosch entwickelte und in der Fahrzeugauslegung verwendete DS Urban Zyklus führt durch die Stuttgarter Innenstadt und steuert weitere typische Fahrsituationen bei niedrigen Geschwindigkeiten bei. Der FKFS mixed Zyklus der vom Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (<https://www.fkfs.de/>) entwickelt wurde führt in einem Rundkurs durch die Region Stuttgart und deckt einen weiten Bereich von Geschwindigkeiten bis 150 km/h ab. Zusammengenommen umfassen die

PAVE

Fahrzyklen eine Fahrtzeit von 228 Minuten. Die normierten Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverteilungen der verwendeten Fahrzyklen sind in Abbildung 123 dargestellt.

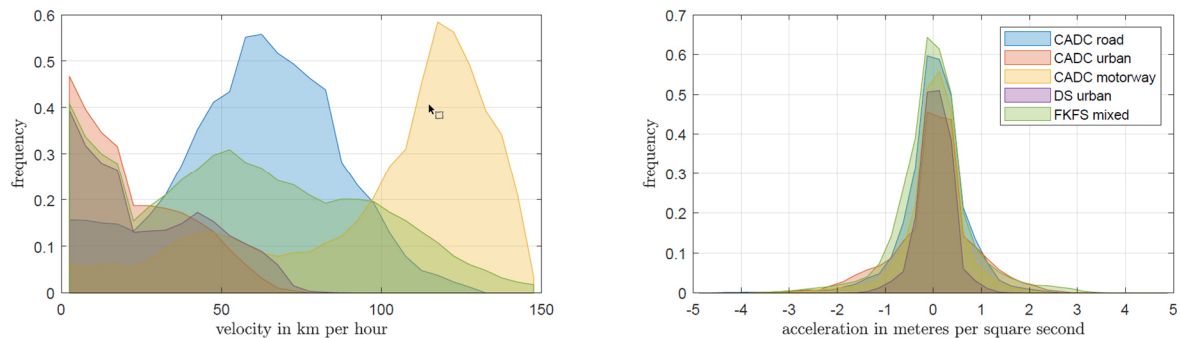


Abbildung 123: Normierte Geschwindigkeits- (links) und Beschleunigungsverteilung (rechts) der zur Anreicherung verwendeten Fahrzyklen.

Zur Anreicherung werden die folgenden Schritte durchgeführt: zuerst wird das MATSim Geschwindigkeitsprofil des gewählten Fahrzeugs um die Geschwindigkeitsbegrenzungen auf den jeweiligen Streckenabschnitten ergänzt. Dann werden sowohl das MATSim Geschwindigkeitsprofil als auch die Fahrzyklen in Segmente mit einer Dauer von einer Minute zerlegt und nach ihren jeweiligen Durchschnitts- und Maximalgeschwindigkeiten kategorisiert. In einer vorläufigen Zuordnung wird jedem MATSim Segment dasjenige 1-Minuten Segment der Fahrzyklen zugeordnet, welches die Differenz in den Durchschnittsgeschwindigkeiten minimiert. Falls die Geschwindigkeitsbegrenzung des MATSim Segments geringer ist als die des gewählten Fahrzyklussegmentes, wird das passende Fahrzyklussegment mit dem nächsten besten Fit der Durchschnittsgeschwindigkeit gewählt. Dadurch wird verhindert, dass „langsame“ Fahrzyklen auf verstaubten Autobahnen zur Anreicherung von Stadtverkehrssituationen verwendet werden. Abbildung 124 zeigt ein Beispiel für das Resultat des Anreicherungsprozesses.

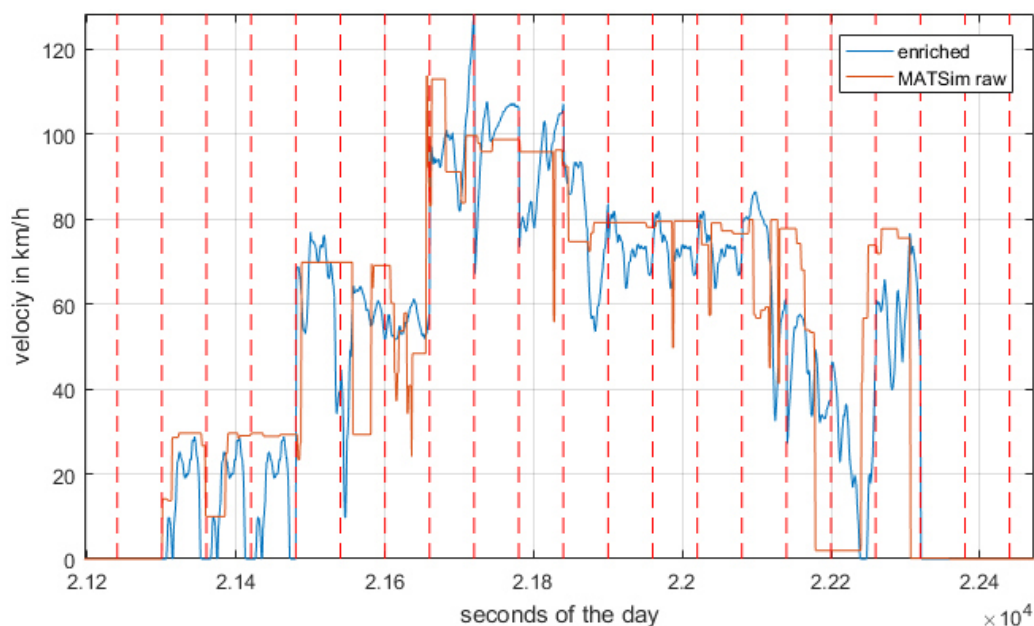


Abbildung 124: Mit hochaufgelösten Fahrzyklen angereichertes MATSim Geschwindigkeitsprofil

PAVE

Ein mit hochaufgelösten Fahrzyklen angereichertes MATSim Geschwindigkeitsprofil (blau) im Vergleich mit dem direkt aus MATSim erhaltenen Profil der Link-Durchschnittsgeschwindigkeiten (rot). Für die Anreicherung wird das MATSim Profil in einminütige Zeitabschnitte zerlegt und nach statistischen Kriterien durch passende hochaufgelöste Fahrzyklen ergänzt.

Das so angereicherte Geschwindigkeitsprofil ist bereits wesentlich detaillierter. Bei genauerer Betrachtung ergeben sich allerdings noch Artefakte beim Übergang zwischen aneinandergrenzenden Zeitsegmenten, die zu unrealistischen Beschleunigungen führen. Die Übergänge werden daher in einem iterativen Verfahren angepasst. Für weitere Details zum Verfahren siehe Triebke, Kromer & Vortisch (2020).

Vergleich mit gemessenen Fahrzeugtrajektorien

Zur Validierung wurden sowohl die Durchschnittsgeschwindigkeitsprofile aus MATSim, als auch die angereicherten Geschwindigkeitsprofile mit gemessenen Fahrdaten verglichen. Da uns gemessene Fahrdaten nur für die Region Stuttgart vorliegen, kommt hierzu ein bei Bosch aufgebautes MATSim Modell für die Region Stuttgart zum Einsatz. Das Verkehrsnetz dieses Modells wurde aus OpenStreetMap (<https://www.openstreetmap.org>) Daten extrahiert. Die Verkehrsnachfrage wurde aus einem mikroskopischen Aktivitätsmodell des Verbands Region Stuttgart übernommen das mit der Multi-Agenten Simulationsumgebung MobiTopp (Mallig, Kagerbauer & Vortisch 2013) erstellt wurde und Bosch im Rahmen einer Forschungskollaboration zur Verfügung steht. Gemessene Fahrdaten liegen für 22 Fahrzeuge vor, die auf dem FKFS Rundkurs in der Region Stuttgart getracked wurden. Für den detaillierten Vergleich beschränken wir uns auf einen Teilabschnitt des Rundkurses der sowohl Fahrsituationen mit innerstädtischem als auch solche mit Überlandcharakter umfasst. Die Lage des Teilabschnitts im Rundkurs, sowie die gemessenen räumlichen Geschwindigkeitsprofile sind in Abbildung 125 dargestellt.

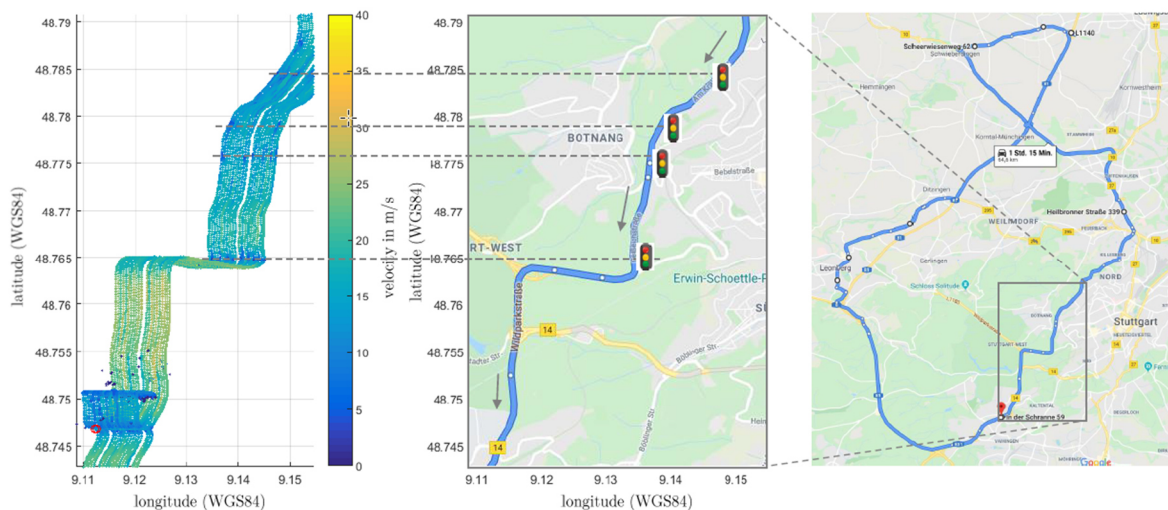


Abbildung 125: FKFS Rundkurs

Rechts: Lage des FKFS Rundkurses in der Region Stuttgart. Zur Validierung der Geschwindigkeitsprofile betrachten wir nur einen durch die graue Box markierten Teilabschnitt am Kräherwald. Mitte: Zoom auf den Teilabschnitt am Kräherwald mit Lage der Lichtsignalanlagen. Links: Messdaten für die räumlichen Geschwindigkeitsprofile von 22 Testfahrzeugen am Kräherwald (aus Darstellungsgründen wurden die einzelnen Fahrzeuge mit einem Longitudenoffset geplottet).

PAVE

In der Simulation wurden über den ganzen Tag hinweg 444 Fahrzeuge verfolgt, die den vorgegebenen Teilabschnitt passieren. Diese werden entsprechend des Verkehrszustandes mit den gemessenen Fahrzeugen abgeglichen, um dann die Fahrzeiten, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverteilungen sowie räumliche und zeitliche Fahrprofile zu vergleichen. Exemplarisch zeigt Abbildung 126 einen Vergleich des räumlichen Geschwindigkeitsverlaufs für ein ausgewähltes Fahrzeug.

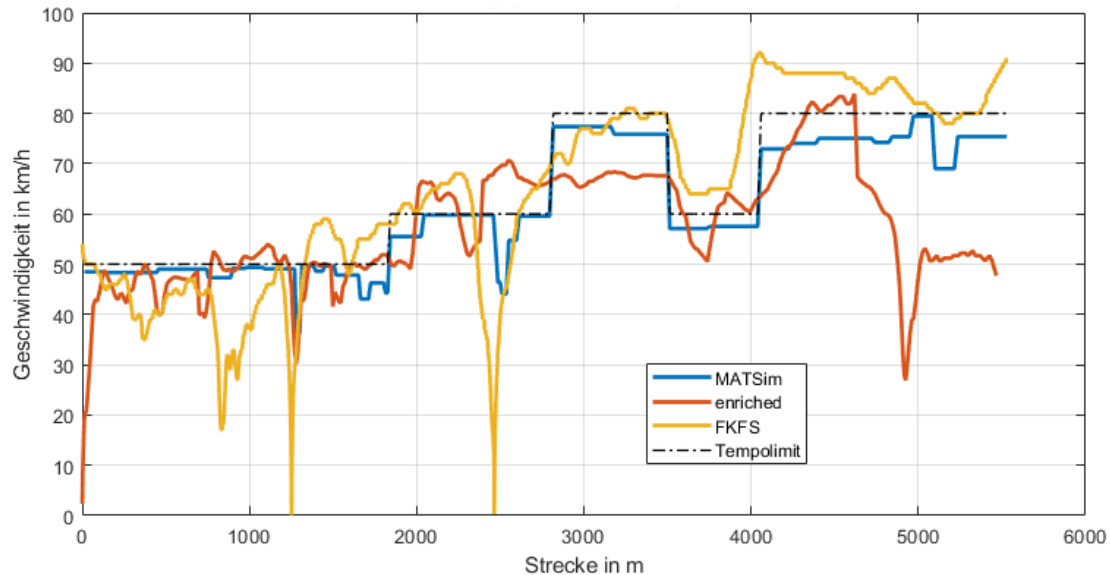


Abbildung 126: Geschwindigkeitsverlauf am Kräherwald

Geschwindigkeitsverlauf am Kräherwald für ein mit MATSim simuliertes Fahrzeug (blau), und dasselbe Fahrzeug nach Ergebnis der Anreicherungsprozedur (rot). Zum Vergleich ist ein gemessenes Geschwindigkeitsprofil (gelb) unter ähnlichen Verkehrsbedingungen, sowie der Verlauf der Tempolimits dargestellt. Die tiefen Einschnitte in den Messdaten resultieren durch Stopps und Lichtsignalanlagen, welche in der Simulation nicht modelliert werden.

Einfluss von autonomem Fahren

In autonom vernetzten Fahrzeugflotten werden Technologien zur Kommunikation zwischen Fahrzeugen (V2V) und zwischen Fahrzeug und Infrastruktur (V2I) die Fahrkontrollsysteme revolutionieren und einen gleichmäßigeren Verkehrsfluss mit weniger scharfen Brems- und Beschleunigungsmanövern sowie weniger Stop-And-Go Phasen ermöglichen. Es wird erwartet, dass sich diese gleichmäßigere Fahrdynamik auch positiv auf den Energieverbrauch und das Emissionsverhalten auswirken (z.B. Anderson et al. 2014). Um diesen Effekt in den simulierten Geschwindigkeitsprofilen abzubilden, haben wir einen Smoothing Ansatz entwickelt – ähnlich wie von Liu, Kockelman & Nichols (2018) beschrieben. Spezifisch verwenden wir zum Glätten des Geschwindigkeitsprofils ein Smoothing Spline, das für einen bestimmten Glättungsparameter p ($p \in [0,1]$) so definiert ist, dass der folgende Ausdruck minimiert wird

$$p \sum_i w_i (y_i - s(x_i))^2 + (1 - p) \int \left(\frac{d^2 s}{dx^2} \right)^2 dx$$

Hier bezeichnet y_i die Geschwindigkeit im ursprünglichen nicht geglätteten Fahrprofil zur Zeit x_i , $s(x_i)$ ist die Geschwindigkeit im geglätteten Profil und d^2s/dx^2 der Ruck des geglätteten Profils. w_i ist ein

PAVE

Gewichtsfaktor für die Datenpunkte (wir setzen $w_i = 1$). Für $p = 0$ erhält man einen least-squares Fit an die Daten, für $p = 1$ eine Interpolation mit einem kubischen Spline.

Die beiden Glättungsterme sollen zwei verschiedene Effekte berücksichtigen. Zum einen wird die Kommunikation zwischen autonomen Fahrzeugen zur Verringerung scharfer Brems- und Beschleunigungsmanöver und damit glatteren Fahrprofilen führen. Zum anderen müssen die autonomen Fahrzeuge (insbesondere in der Anfangsphase) auch auf konventionelle Verkehrsteilnehmer achten, falls die Straßen nicht komplett frei sind. D.h. aus Gründen des Verkehrsflusses können (geglättete) autonome Fahrprofile nicht stark von (nicht geglätteten) konventionellen Fahrprofilen abweichen, während sie zugleich keine scharfen Spitzen mehr zeigen. Makroskopisch sollte sich das Fahrverhalten also nur geringfügig unterscheiden (wenn langfristig der gesamte Verkehr autonom vernetzt abgewickelt wird, werden sich die Fahrprofile stärker ändern).

Abbildung 123 zeigt für ein ausgewähltes Simulationsfahrzeug den Glättungsprozess für das durch die Anreicherung gewonnene Geschwindigkeitsprofil und verschiedene Glättungsparameter p . Der Anteil des autonom vernetzten Verkehrs am Gesamtverkehrsaufkommen wird dabei mit kleinerem p als größer angenommen, so dass die zugehörigen Geschwindigkeitsprofile glatter ausfallen. Für $p < 0.01$ finden wir eine zu starke Glättung. $p = 1$ zeigt den Grenzfall einer Spline Interpolation. Interessant sind die beiden Lösungen für $p = 0.85$ und 0.085 , welche zu einer breiten Beschleunigungsverteilung im Bereich zwischen -2 und 2 m/s^2 führen, der ideal ist, um das Auftreten von Reisekrankheitseffekten bei den Passagieren zu vermeiden. Die Lösung mit $p = 0.85$, ergibt sich durch folgende Faustformel $1/(1+h^3/6)$, wobei h der mittlere Abstand der Datenpunkte ist.

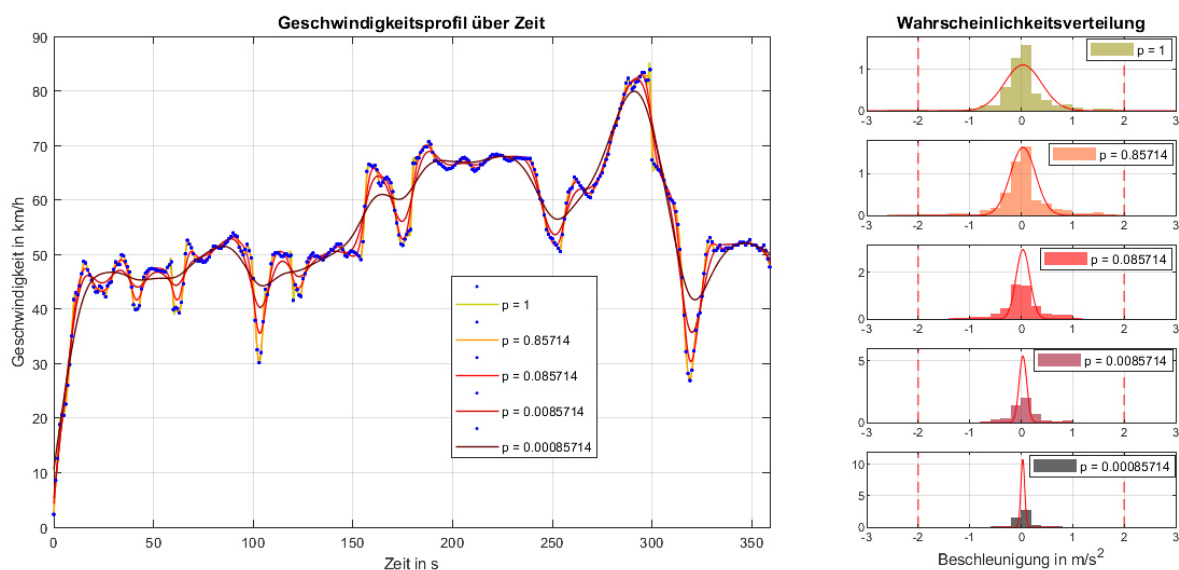


Abbildung 127: Glättung eines simulierten Geschwindigkeitsprofils und Beschleunigungsverteilung

Links: Glättung eines simulierten Geschwindigkeitsprofils (blaue Punkte) mit einem Smoothing Spline für unterschiedliche Werte des Glättungsparameters p . Rechts: Beschleunigungsverteilung der geglätteten Geschwindigkeitsprofile.

Kopplung an eine mikroskopische Verkehrssimulation

In einem weitergehenden Schritt wurde im Rahmen eines Dissertationsprojekts zusätzlich die Kopplung an die mikroskopische Verkehrssimulationsumgebung SUMO (Simulation of Urban Mobility, Lopez et al. 2015) untersucht, um rein simulationsbasierte Geschwindigkeitsprofile zu erhalten. Dazu müssen die Verkehrsnetze von MATSim und SUMO, sowie die Verkehrsnachfrage synchronisiert werden. Außerdem muss ein geeignetes Verkehrsdynamikmodell in SUMO hinterlegt werden, das in der Lage ist die Eigenschaften autonomer Fahrzeuge abzubilden. Details zur Kopplung und erste Ergebnisse sind in Triebke, Kromer & Vortisch (2020) beschrieben. Für die grundlegenden Anforderungen der Fahrzeugauslegung hat sich die oben vorgestellte Anreicherungsmethode als ausreichend herausgestellt, auf die wir uns im Folgenden konzentrieren werden.

Fahrzeugsimulation mit GT Suite

Zur Betrachtung der Systeme auf Fahrzeugebene sowie des Energieverbrauchs verwenden wir die Multi-Physics Simulationsumgebung GT Suite von Gamma Technologies (<https://www.gtisoft.com/gt-suite/gt-suite-overview/>). Als Input für die GT Simulation dienen die angereicherten Geschwindigkeitsprofile, bzw. zur Modellierung des Einflusses des autonom vernetzten Fahrens die geglättete Variante. In GT Suite wird dann eine Fahrzeugkonfiguration festgelegt. Anschließend fährt GT Suite das vorgegebene Fahrprofil mit einem synthetischen Fahrzeug der ausgewählten Konfiguration ab und modelliert dabei die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Komponenten bzw. Subsystemen des Fahrzeugs, z.B. dem Antriebsstrang (Powertrain), dem Bordnetz (Powernet), sowie thermischen oder hydraulischen Komponenten.

Hier verwenden wir eine Fahrzeugkonfiguration mit einer Gesamtmasse m von 1545 kg (inkl. Batterie und Antriebsstrang) und einer frontalen Querschnittsfläche $A_f = 2,2 \text{ m}^2$, bei einer Motorleistung $P_{\text{eng}} = 200 \text{ kW}$ und einer Batteriekapazität von 60 kWh. Für den Luftwiderstandsbeiwert setzen wir $c_w = 0,27$. Für den Rollwiderstand der Reifen $c_R = 0,011$ und für die Straßenreibung $c_{\text{fritc}} = 1$. Ergebnisse für die damit resultierenden Fahrzeuggeschwindigkeiten, Fahrzeugbeschleunigungen sowie den Ladezustand des Akkus sind für unser angereichertes Testfahrprofil in Abbildung 128 dargestellt. Zum Vergleich zeigt Abbildung 129 die Ergebnisse für das zugehörige geglättete Fahrprofil. Man sieht deutlich, dass die Zahl der Beschleunigungsvorgänge und auch deren Amplitude mit dem geglätteten Fahrprofil reduziert wird: mit dem nicht geglätteten Profil erreicht die Beschleunigung Werte bis zu 5 ms^{-2} , geglättet reduziert sich dies auf $2,5 \text{ ms}^{-2}$.

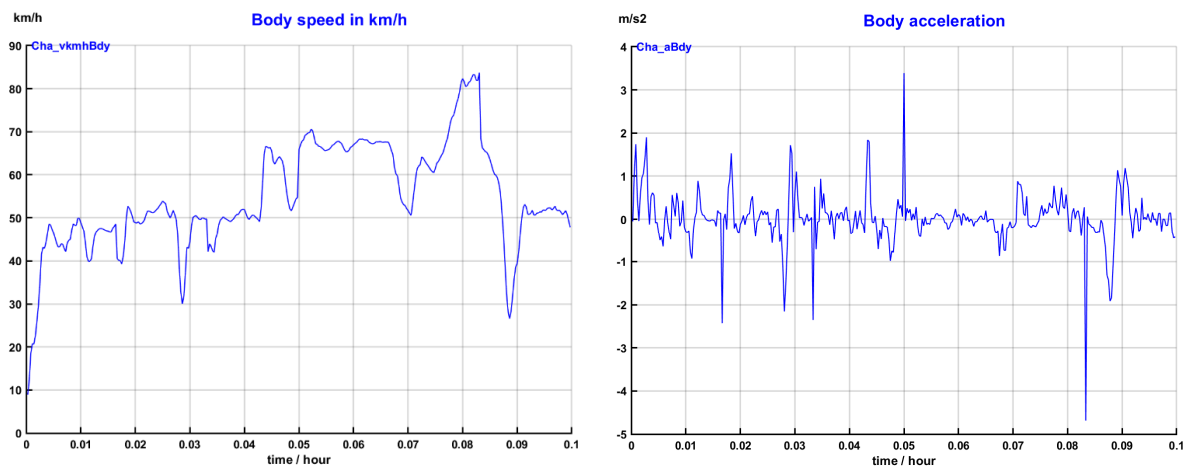


Abbildung 128: Ausgewählte Ergebnisse der Fahrzeugsimulation für ein angereichertes Geschwindigkeitsprofil

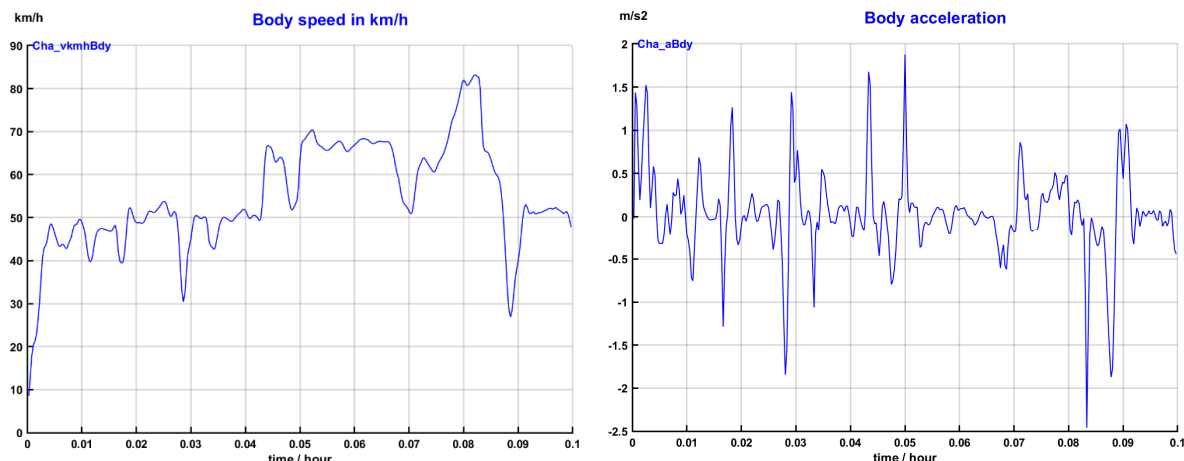


Abbildung 129: Ausgew. Ergebnisse der Fahrzeugsimulation für ein geglättetes Geschwindigkeitsprofil

4.7.2 Szenariobasierte Fahrzeuganforderungen

Szenarien

Im Hinblick auf die Auslegung zukünftiger Flottenfahrzeuge für On-Demand Transportdienste sind insbesondere die Fahrzeugtrajektorien von Bedeutung. Wie bereits im letzten Abschnitt diskutiert, lassen sich solche Trajektorien aus der agentenbasierten Transportsimulationsumgebung MATSim für die Flottenfahrzeuge extrahieren. Hierzu haben wir in MATSim, aufbauend auf dem Release 5.3 des Open Berlin Szenarios (Ziemke, Kaddoura & Nagel 2019, <https://github.com/matsim-scenarios/matsim-berlin/tree/5.3.x>), zwei Zukunftsszenarien definiert in denen das Berliner Verkehrssystem mit einer großen Flotte autonomer Taxis ergänzt wird, um einen stadtweiten dynamischen Transportservice anzubieten.

In Szenario P5-10af implementieren wir einen Transportservice, in dem bis zu 5 Fahraufträge in einem Taxi gebündelt werden (ride pooling). Szenario I-10af modelliert einen individuellen Transportservice, in dem die Taxis zu einem gegebenen Zeitpunkt exklusiv den Fahrauftrag eines Kunden bedienen. In beiden Fällen wird der dynamische Transportservice von Haustür zu Haustür angeboten. Wegen der unterschiedlichen Service Qualität sind beide Szenarien durch ein unterschiedliches Preisniveau gekennzeichnet (Tabelle 47). Außerdem nehmen wir an, dass die Kosten für private PKW sich durch regulatorische Maßnahmen gegenüber dem im Open Berlin Szenario hinterlegten Preisniveau verteuern werden. Wir bilden dies in vereinfachter Form durch erhöhte tägliche PKW Kosten ab.

	Base (Open Berlin 5.3)	P5-10af	I-10af
DRT minimumFare (EUR)	-	1,0	2,0
DRT distanceFare (EUR/km)	-	0,18	0,30
PKW tägliche Kosten (EUR)	5,3	10,6	10,6
PKW Distanzkosten (EUR/km)	0,2	0,2	0,2

Tabelle 47: Fahrpreise für dynamischen Transportservice und Kosten für konventionellen PKW in unseren Modellen und Release 5.3 des Open Berlin Szenarios. Die Kosten für den dynamischen Transportservice berechnen sich dabei als $\max(\text{minimumFare}, \text{distance} * \text{distanceFare})$.

PAVE

Für beide Szenarien wurde zur Modellierung der Taxiflotte in MATSim ein neuer Modus DRT (demand responsive transport) zum Open Berlin Modell hinzugefügt (für die DRT Umwegfaktoren setzen wir $a=1.5$, $b=1200s$ und für das Limit der erwarteten Einstiegszeit $1200s$; vgl. Bischoff, Maciejewski & Nagel 2017). Dann wurden mit MATSim 500 mobsim Iterationen durchgeführt, um ein neues Nutzergleichgewicht mit dem DRT Modus zu ermitteln. Dabei probieren während der ersten 400 Iterationen jeweils 5% der Agenten neue Routen, Abfahrtszeiten oder Transportmodi aus (plan innovation). Alle Agenten mit mindestens einer Fahrt innerhalb des DRT Bedienegebiets (=Berliner Stadtgebiet) können dabei den neuen DRT Modus auswählen. In den letzten 100 Iterationen dürfen die Agenten nur noch aus bereits bekannten Plänen auswählen (keine plan innovation). Um die Rechenzeit in einem praktikablen Rahmen zu halten, simulieren wir nur 1% der Bevölkerung für unsere Szenarien und skalieren die Ergebnisse anschließend auf die Gesamtbevölkerung. Die Flottenfahrzeuge sind anfänglich zufällig über die Stadt verteilt. Freie Taxis warten an ihrer letzten Position, d.h. es findet kein Rebalancing freier Fahrzeuge statt. Außerdem nehmen wir an, dass die Zahl der Flottenfahrzeuge nicht limitiert ist. Durch diese Vereinfachung werden etwaige Kapazitätsengpässe vernachlässigt. Es ist zu erwarten, dass die Kombination aus nicht limitierter Flottengröße und der Verzicht auf ein Rebalancing der Flottenfahrzeuge im Vergleich zu einem profit-optimierten Flottensetup zu einer deutlichen Unterschätzung der Leerfahrten führen wird.

Mit diesen Einstellungen ergibt die Simulation für das Pooling Szenario P5-10af 1.050.200 Fahraufträge für die Flottenfahrzeuge im Verlauf eines Tages. Diese werden von 76.400 Flottenfahrzeugen bedient wovon maximal 24.000 zeitgleich aktiv sind. Für Szenario I-10af mit einem individuellen Transportservice ergeben sich 2.089.500 Fahrten, die von 142.500 Fahrzeugen bedient werden. Der individuelle Transportservice ist für die Nutzer trotz der höheren Fahrgebühren wesentlich attraktiver, da die Fahrt- und Wartezeiten mit dem individuellen Transportservice signifikant kürzer ausfallen, da keine Umwege für das Pooling anfallen. Tabelle 48 gibt eine Zusammenstellung weiterer Performance Indikatoren für die Flottennutzung.

	P5-10af	I-10af
Anzahl der Fahrten	1.050.200	2.089.500
Anzahl Fahrzeuge / 24h	76.400	142.500
Maximal gleichzeitig aktive Fahrzeuge	24.500	70.000
Durchschnittliche Wartezeit (s)	444.8	353.2
Durchschnittliche Fahrleistung / Taxi / Tag (km)	92.3	130.7
Durchschnittliche Leerfahrten / Taxi / Tag (km)	7.4	12.2
Durchschnittliche Personenkilometer / Taxi / Tag (pkm)	111.4	118.5
Revenue Faktor	1.21	0.91

Tabelle 48: Ausgewählte Performance Indikatoren für die Flottennutzung

Die Anzahl der aktiven Flottenfahrzeuge über den Verlauf des Tages sowie deren Auslastung mit Fahrgästen ist in oben dargestellt. Trotz des Poolings von Fahraufträgen im Szenario P5-10af sind die Flottenfahrzeuge größtenteils nur mit einem Fahrauftrag ausgelastet (links). Zu einem gewissen Grad werden zwei bis drei Fahraufträge gebündelt. Ein höherer Bündelungsgrad ist im gewählten Szenario kaum zu beobachten. Zugleich gibt es praktisch zu jedem Zeitpunkt leerfahrende Flottenfahrzeuge, die gerade auf dem Weg zu einem neuen Kunden sind.

PAVE

Mitte zeigt die zwischen der Fahrfrage durch einen Fahrgast und seiner Abholung durch ein Flottenfahrzeug vergehende Wartezeit. Während sich die durchschnittliche Wartezeit im Tagesverlauf nur wenig ändert, ergeben sich für die maximale Wartezeit starke Schwankungen, z.B. durch lokale Staus in der Umgebung des Kunden. unten stellt die Verteilung der täglichen Laufleistung aller Flottenfahrzeuge dar. Sie zeigt sowohl für den pooling als auch für den individuellen Transportservice eine breite Verteilung mit Peaks bei ca. 90 bzw. 130km. Leerfahrten zeigen einen ausgeprägten Peak zwischen 0 und 40km. Durch Poolingeffekte ergeben sich für Szenario P5-10af mehr Personenkilometer als Fahrzeugkilometer, was zu einem positiven Revenue Faktor (Personenkilometer geteilt durch Laufleistung) führt. Die tägliche Gesamtfahrleistung der DRT und PKW Fahrzeuge beträgt 82.800.000km für Szenario P5-10af und 92.800.000km für Szenario I-10af. Gegenüber dem Basisfall Open Berlin (Gesamtfahrleistung der PKW 91.700.000km) ergibt sich somit eine Reduktion um ca.10% (P5-10af) bzw. eine leichte Steigerung (I-10af).

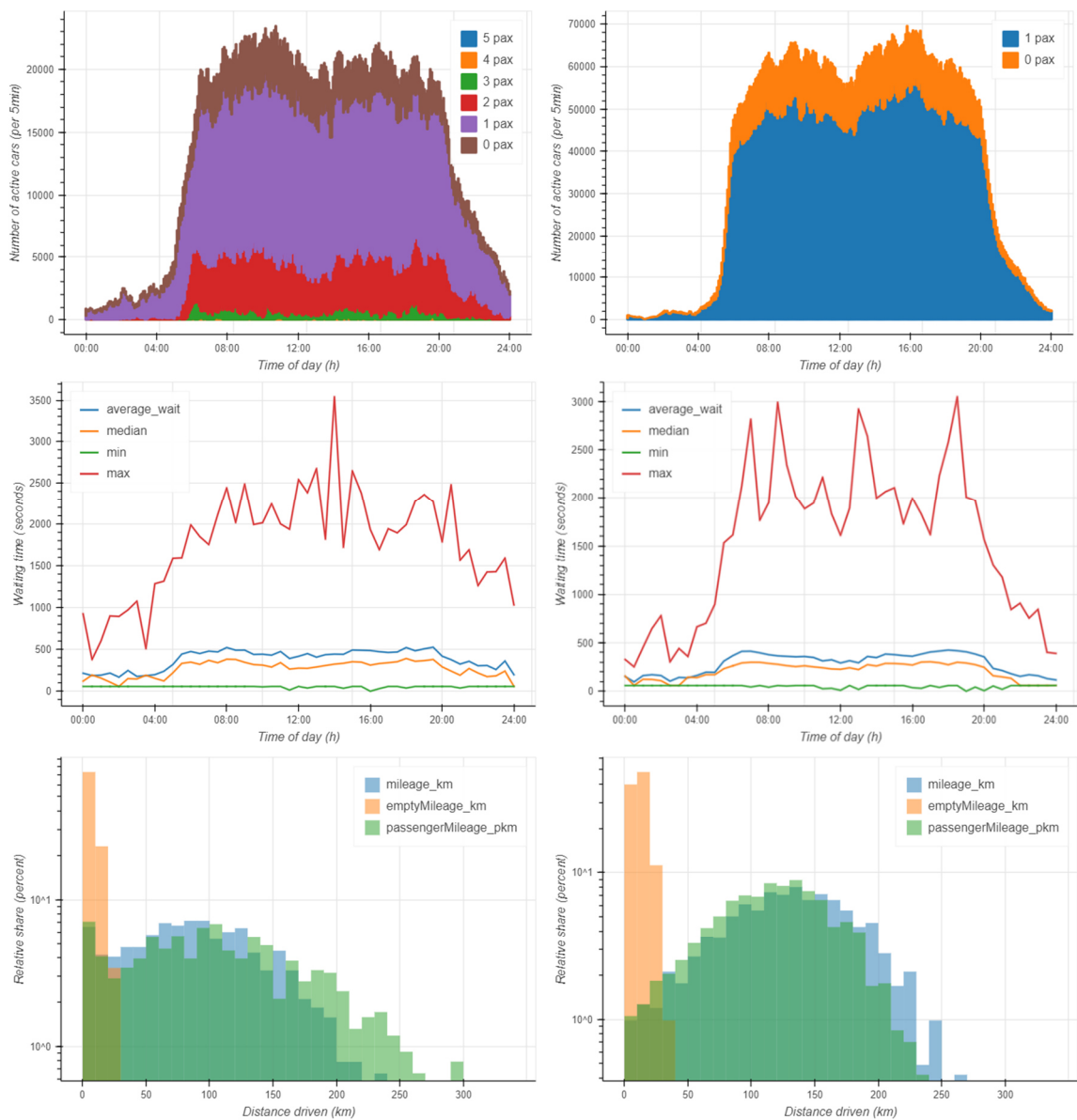


Abbildung 130: Ausgewählte Performance Indikatoren der dynamischen Transportdienste in den Zukunftsszenarien P5-10af (links) und I-10af (rechts).

PAVE

Die erste Zeile zeigt die Fahrgastbelegung der Flottenfahrzeuge im Tagesverlauf, wobei die Einhüllende des Plots die Zahl der gleichzeitig aktiven Flottenfahrzeuge darstellt. In der zweiten Zeile sind die minimale, durchschnittliche, median und maximale Wartezeit im Tagesverlauf dargestellt. Die dritte Zeile zeigt die Verteilung der gefahrenen Strecke über alle Flottenfahrzeuge. Dargestellt sind sowohl die Fahrleistung (mileage), die Leerkilometer (emptyMileage), als auch die mit der Auslastung gewichteten Personenkilometer (passengerMileage).

Abbildung 131 zeigt die Verteilung der täglich innerhalb des Berliner Stadtgebiets anfallenden Reisedistanzen auf die verschiedenen Verkehrsträger in unseren beiden Zukunftsszenarien im Vergleich zum Basisfall Open Berlin. Durch die erhöhten PKW Kosten in den Zukunftsszenarien reduziert sich der PKW Anteil von 22,6% (Open Berlin) auf 11,0% für das Pooling Szenario P5-10af und 8,7% für Szenario I-10af mit einem individuellen Taxi Service. Zugleich übernimmt der neue DRT Modus in beiden Szenarien einen signifikanten Anteil der zurückgelegten Reisedistanz (11,5 für P5-10af bzw. 27,4% für I-10af). Die Nutzung der umweltfreundlichen bicycle und public transport (pt) Modi geht vor allem im I-10af Szenario deutlich zurück, da der individuelle Taxiservice deutlich kürzere Reisezeiten ermöglicht.

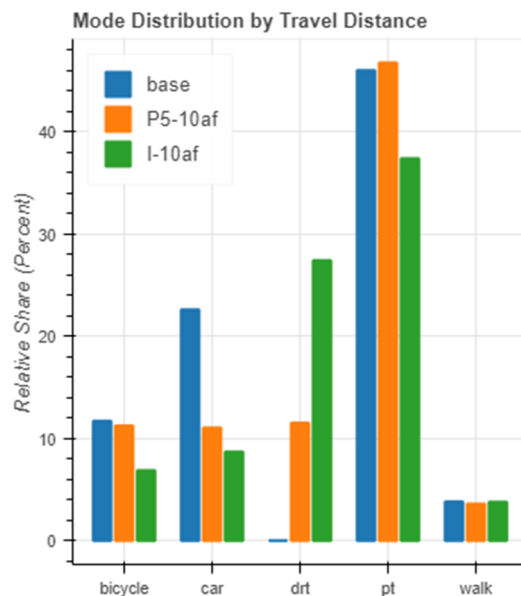


Abbildung 131: Verteilung der täglich innerhalb des Berliner Stadtgebiets anfallenden Reisedistanzen auf die verschiedenen Verkehrsträger: Fahrrad (bicycle), PKW (car), dynamischer Taxiservice (DRT), ÖPNV (pt) und Fußgänger (walk). Im PKW als Mitfahrer zurückgelegte Distanzen (ride) sind nicht dargestellt.

Auswahl repräsentativer Fahrzeuge

Im Hinblick auf die Auslegung zukünftiger Flottenfahrzeuge für On-Demand Transportdienste sind insbesondere die Fahrzeugtrajektorien von Bedeutung. Allerdings ist es bei Flottengrößen von mehreren hundert bzw. tausenden Flottenfahrzeugen nicht praktikabel alle Fahrzeugtrajektorien einzeln zu betrachten. Stattdessen bedarf es einer Möglichkeit Fahrzeuge mit repräsentativen Fahreigenschaften zu identifizieren. Dazu aggregieren wir charakteristische Fahrzeuggrößen, wie z.B. die Fahrleistung, die Betriebszeit, die Anzahl der bedienten Fahranfragen, die Höchstgeschwindigkeit, oder die Durchschnittsgeschwindigkeit für jedes Flottenfahrzeug über einen ganzen Betriebstag (24h Periode). Die so aggregierten Daten sind für unsere beiden Szenarien in Abbildung 132 (P5-10af) und Abbildung

PAVE

133 (I-10af) dargestellt. Man erkennt eine deutliche Korrelation zwischen Fahrleistung, Betriebszeit und Anzahl der bedienten Fahranfragen.

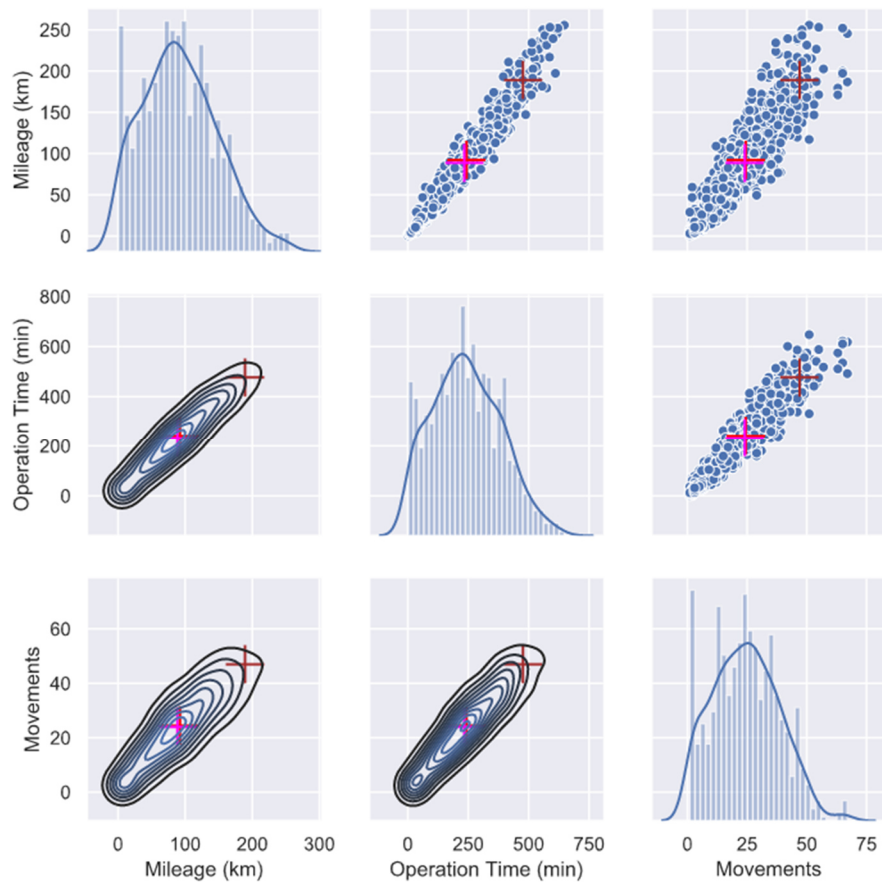


Abbildung 132: Paarweise Korrelation verschiedener charakteristischer Fahrzeugparameter

Abbildung 132 zeigt die Paarweise Korrelation verschiedener charakteristischer Fahrzeuggrößen [tägliche Fahrleistung (mileage), tägliche Betriebszeit (operation time), und Anzahl der täglich bedienten Fahranfragen (movements)] für das Pooling Szenario P5-10af. Oberhalb der Diagonale sind dabei die Werte für jedes Fahrzeug einzeln als Scatterplot dargestellt, unterhalb der Diagonalen wurde eine Darstellung durch zweidimensionale (Gaußsche) Kerndichteschätzer gewählt. Die Diagonalelemente zeigen Histogramme und eindimensionale Kerndichteschätzer der jeweiligen Größen. Die Kreuze markieren, mittels des in Gleichung 2 beschriebenen Verfahrens bestimmte, repräsentative Fahrzeuge für eine durchschnittliche (rot), median (violett) und P95 (braun) Nutzung.

PAVE

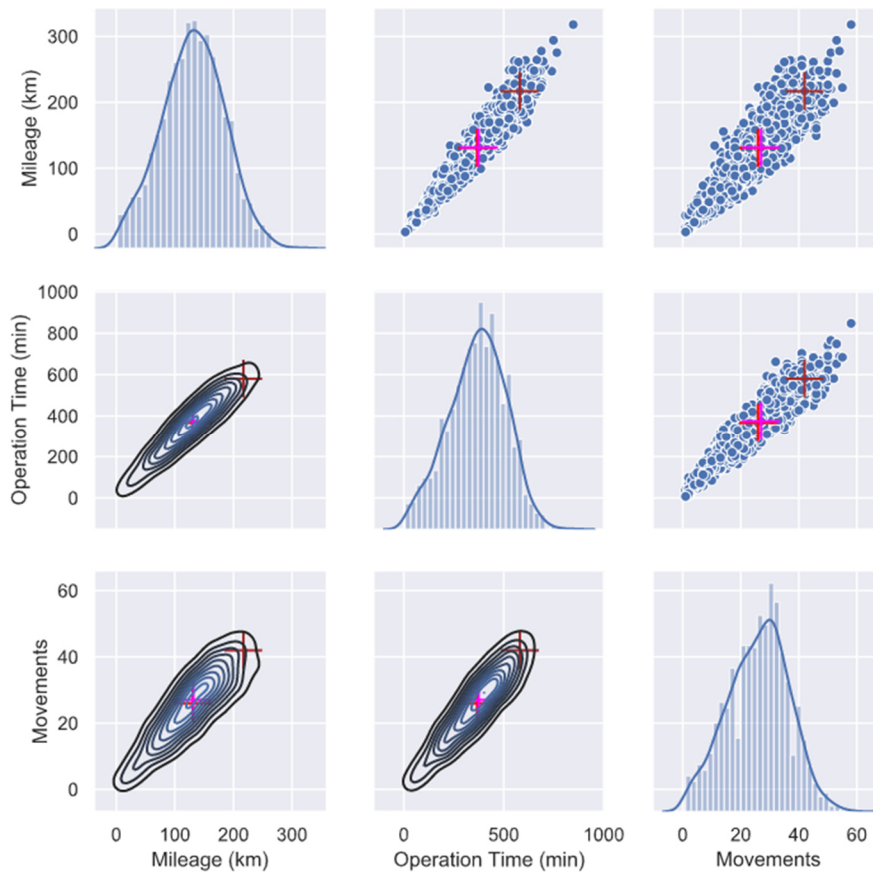


Abbildung 133: Wie Abbildung 132, aber mit Daten für Szenario I-10af.

Für jede der charakteristischen Fahrzeuggrößen können wir über alle Flottenfahrzeuge mit statistischen Methoden Ensemblemittelwerte bilden, z.B. für das arithmetische Mittel, den Median oder das 95% Perzentil (P95). Tabelle 49 gibt einen Überblick über Ensemblemittelwerte ausgewählter Fahrzeuggrößen. Für unsere Modelle P5-10af und I-10af liegen die Durchschnitts- und Medianwerte relativ nahe beieinander, was sich gut mit der homogenen Form der zugrundeliegenden Verteilungen deckt (Abbildung 132 und Abbildung 133). Im Vergleich zum Pooling Szenario, zeigt Szenario I-10af mit dem individuellen Transportservice eine deutlich höhere tägliche Fahrleistung (+40%) und Betriebszeit (+50%).

	P5-10af			I-10af		
	Durchschnitt	Median	P95	Durchschnitt	Median	P95
Tägliche Fahrleistung (km)	92,3	88,5	189,2	130,7	131,4	216,9
Tägliche Betriebszeit (min)	242,2	233,5	476,0	365,9	374,3	580,0
Bediente Fahanfragen	24,4	24,0	47,0	26,0	27,0	42,0

Tabelle 49: Ensemblemittelwerte ausgewählter charakteristischer Fahrzeuggrößen der Flottenfahrzeuge

Zur Auswahl repräsentativer Fahrzeuge für die Fahrzeugauslegung kombinieren wir nun geeignete Ensemblemittelwerte $\bar{\xi}_j$ (wobei j z.B. Betriebsdauer, Fahrleistung oder Zahl der Fahrten). Dazu

PAVE

berechnen wir für jedes Flottenfahrzeug i den euklidischen Abstand d_i seiner charakteristischen Fahrzeuggrößen $\xi_{i,j}$ zu einem Set J von Ensemblemittelwerten

$$d_i = \sqrt{\sum_{j \in J} (\xi_{i,j} - \bar{\xi}_j)^2} \quad \text{Gl. 1}$$

Anschließend minimieren wir diesen Abstand d_i , um das repräsentative Fahrzeug zu bestimmen. Da die verschiedenen Fahrzeuggrößen sehr unterschiedliche Wertebereiche und Einheiten aufweisen, kann obige Gleichung zu Abständen führen, die von einzelnen Größen j dominiert werden. Um dieses Problem zu vermeiden, normalisieren wir die Abstandsformel wie folgt

$$\bar{d}_i = \sqrt{\sum_{j \in J} \frac{1}{M_j} (\xi_{i,j} - \bar{\xi}_j)^2} \quad \text{Gl. 1}$$

wobei $M_j = \max (\xi_{i,j} - \bar{\xi}_j)$.

Wählt man als Set J die Fahrzeuggrößen tägliche Fahrleistung, tägliche Betriebsdauer und tägliche Anzahl der Fahrten, ergeben sich mit dieser Methode die in Abbildung 132 und Abbildung 133 mit Kreuzen markierten repräsentativen Fahrzeuge für eine durchschnittliche (rot), median (violett) und P95 (braun) Nutzung. Für die Betrachtungen zur Fahrzeugauslegung im Folgenden konzentrieren wir uns auf die so ermittelten für das 95%-Perzentil repräsentativen Fahrzeuge. Deren charakteristische Fahrzeuggrößen für die beiden Szenarien P5-10af und I-10af sind in Tabelle 50 zusammengestellt.

	Tägliche Fahrleistung (km)	Tägliche Betriebszeit (min)	Tägliche Fahraufträge	Durchschnittsgeschwindigkeit (km/h)
P5-10af	185,8	485,3	48	30,0
I-10af	213,3	570,9	41	22,4

Tabelle 50: Charakteristische Größen der für P95 repräsentativen Flottenfahrzeuge bezüglich $J = \{\text{tägliche Fahrleistung, tägliche Betriebsdauer und tägliche Anzahl der Fahrten}\}$.

Die Szenarien mit (P5-10af) und ohne ride-pooling (I-10af) unterscheiden sich in der Fahrzeugnutzung nicht signifikant: ohne Pooling liegt die tägliche Fahrleistung und Betriebszeit um ca. 15% höher, weil die Fahrzeuge in diesem Fall (typischerweise) einen höheren Grad an Leerfahrten aufweisen.

Simulative Ableitung von Anforderungen zur Fahrzeugauslegung

Wegen der geringen Unterschiede in den charakteristischen Fahrzeuggrößen, konzentrieren wir uns bei den Betrachtungen zur simulativen Fahrzeugauslegung und den dazu nötigen Schritten zur Durchführung der Fahrzeugsimulation auf das P95 Fahrzeug des Pooling Szenarios. Eingangsgrößen zur Fahrzeugsimulation sind wie oben beschrieben die MATSim Status- und Geschwindigkeitsprofile, wobei letztere mit Hilfe des in Kapitel 4.7.1 beschriebenen Verfahrens mit hochaufgelösten Fahrzyklen angereichert werden müssen. Die entsprechenden Profile für einen ganzen Betriebstag sind in Abbildung 134 dargestellt. Ausgewählte Ergebnisse aus der Fahrzeugsimulation mit GT Suite zeigt Abbildung 135. Dabei wurde die in Kapitel 4.7.1 beschriebene Fahrzeugkonfiguration verwendet.

PAVE

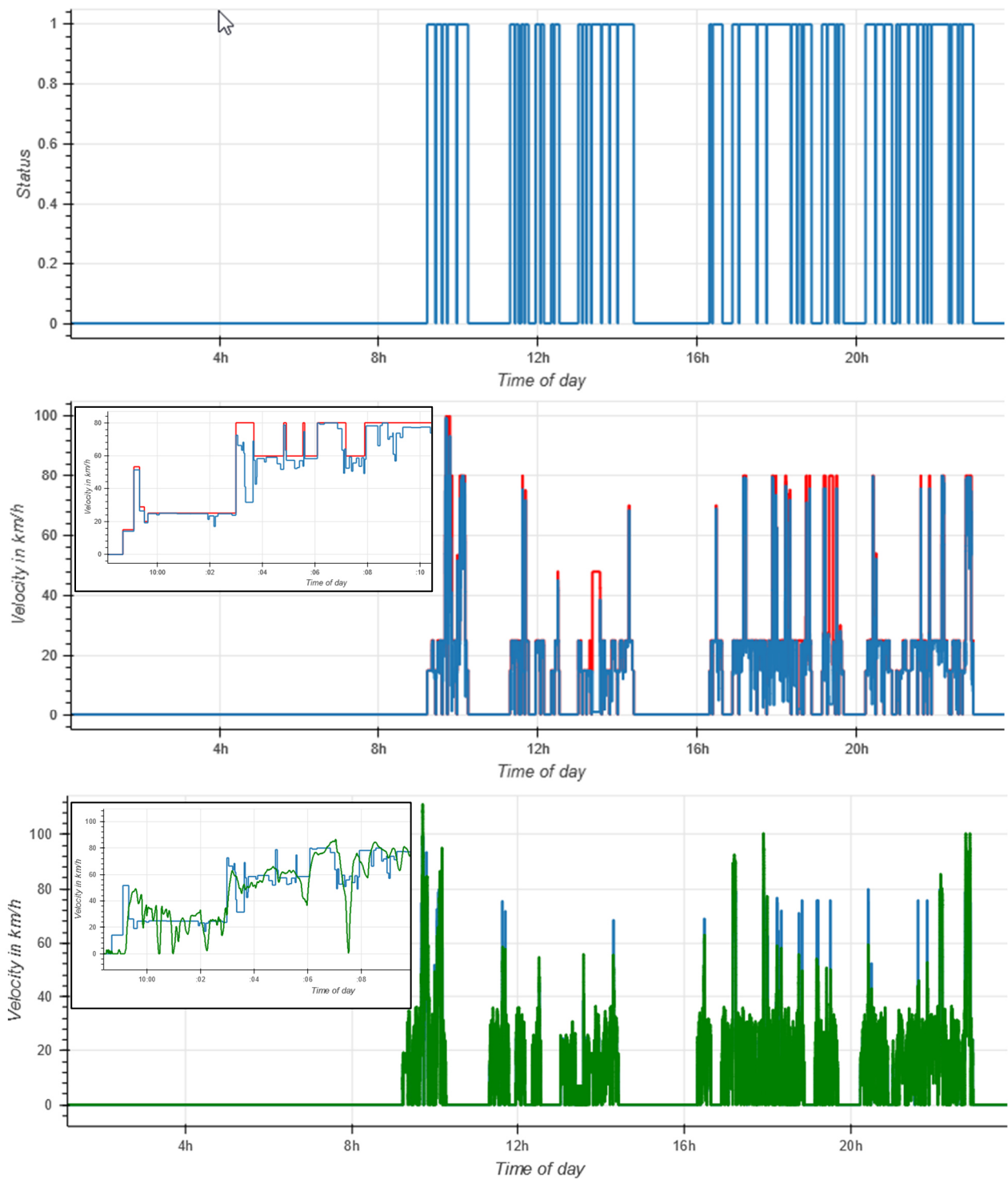


Abbildung 134: MATSim Status- (oben) und Geschwindigkeitsprofil (Mitte), sowie das angereicherte Geschwindigkeitsprofil (unten) des P5 Flottenfahrzeugs für Modell P5-10af.

Die blaue Linie im Geschwindigkeitsprofil zeigt die MATSim Durchschnittsgeschwindigkeit, die rote Linie die zulässige Höchstgeschwindigkeit und die grüne Linie das angereicherte Geschwindigkeitsprofil. Die Zoom-ins zeigen beispielhaft Details der Geschwindigkeitsprofile.

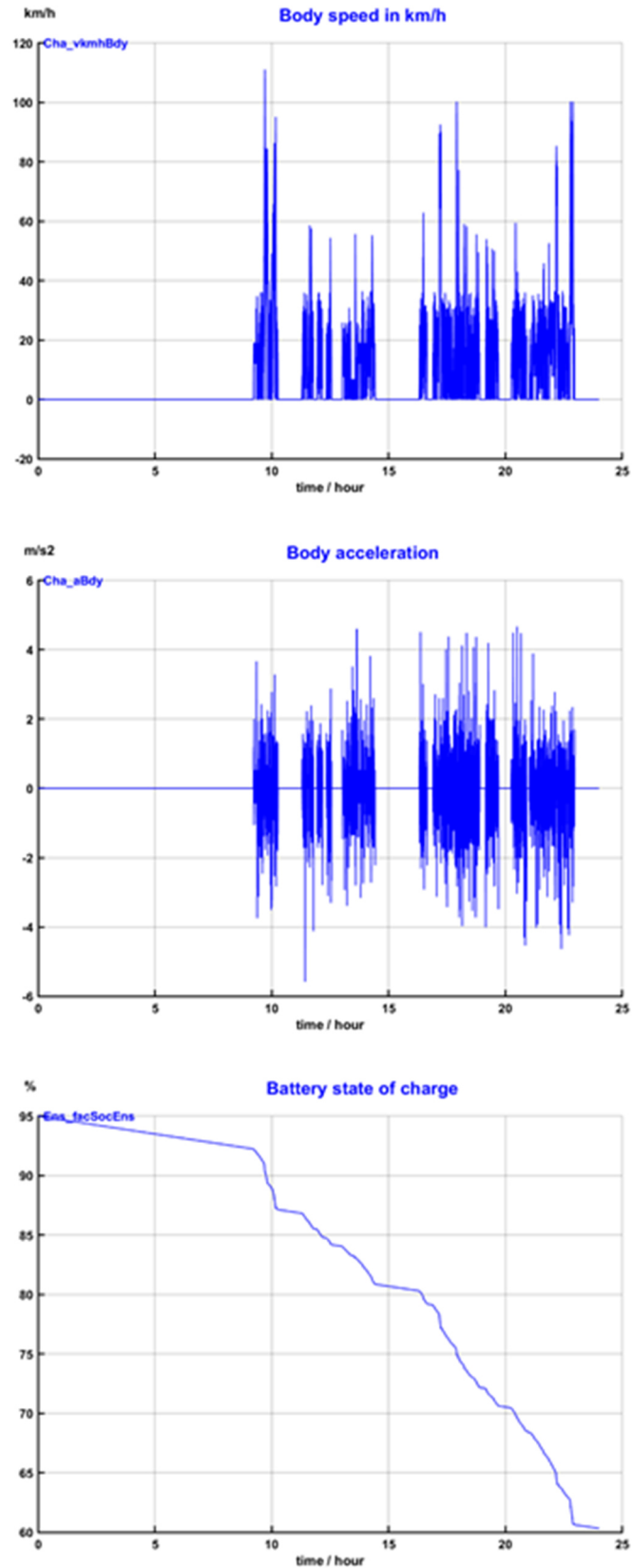


Abbildung 135: Ausgewählte Ergebnisse der Fahrzeugsimulation mit GT Suite für das P95 Fahrzeug.
Oben: Geschwindigkeitsverlauf, Mitte: Beschleunigungsverlauf, Unten: Ladezustand der Batterie.

PAVE

Die Ergebnisse aus der Fahrzeugsimulation haben einen ausreichend hohen Detailgrad, um sie zur Auslegung von Fahrzeugkomponenten, wie z.B. dem Antriebsstrang, dem Powernetz, des thermischen Systems oder der Fahrzeugbatterie zu verwenden. Für das P95 Fahrzeug aus unserem Pooling Szenario finden wir einen über den Betriebstag gemittelten Energieverbrauch von 12,96 kWh/100km. Da die tägliche Fahrleistung in unserem Pooling Szenario im Schnitt unter 200km liegt, erscheinen bei durchschnittlichen Batteriegrößen Betriebsstrategien mit einer Batterieladung pro Tag plausibel. Für die in unserer Fahrzeugsimulation verwendete Fahrzeugkonfiguration mit Motorleistung $P_{\text{eng}} = 200 \text{ kW}$ und Batteriekapazität 60 kWh, erreicht die Batterie am Ende des Betriebstags z.B. einen Ladezustand von circa 60% (Abbildung 135). Dabei muss allerdings beachtet werden, dass in unserem Poolingszenario kein Rebalancing leerer Flottenfahrzeuge erfolgt. Ein solches Rebalancing ist in der Praxis wünschenswert, um die Verteilung leerer Fahrzeuge der erwarteten Nachfrage künftiger Fahraufträge anzupassen und so kürzere Wartezeiten für die Kunden zu ermöglichen. Dadurch ergeben sich zusätzliche Leerfahrten der Flottenfahrzeuge und somit eine erhöhte tägliche Fahrleistung. Details hängen von den verwendeten Methoden zum Rebalancing und der Nachfragemodellierung ab, aber Fahrleistungen bis zum doppelten des Wertes ohne Rebalancing sind durchaus vorstellbar. Selbst damit sollte eine Betriebsstrategie mit einer Batterieladung pro Tag bei aktuellen Batteriegrößen aber realisierbar sein, wenn die Nachfrage nach on-demand Transportservices nicht signifikant höher ist als in unserem Szenario.

Einfluss des autonom vernetzten Fahrens

Wie im vorigen Abschnitt beschrieben wird erwartet, dass der Einsatz von Technologien zur Kommunikation zwischen Fahrzeugen (V2V) und zwischen Fahrzeug und Infrastruktur (V2I) in autonom vernetzten Fahrzeugflotten zu einem gleichmäßigeren Verkehrsfluss und damit weniger ausgeprägten Brems- und Beschleunigungsmanövern führt. Um diesen Einfluss abzuschätzen, verwenden wir den oben vorgestellten Ansatz und glätten die angereicherten Geschwindigkeitsprofile der repräsentativen Flottenfahrzeuge mittels eines Smoothing Splines. Mit den so prozessierten Profilen lassen sich aus der Fahrzeugsimulation veränderte Anforderungen an autonome Fahrzeuge ableiten.

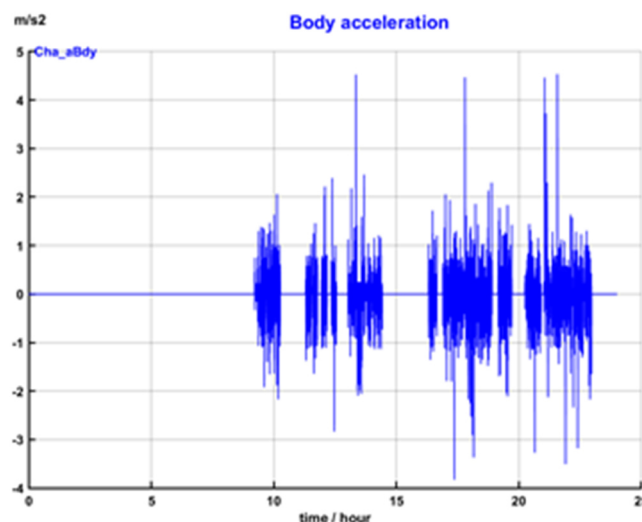


Abbildung 136: Fahrzeugsimulation mit GT Suite: Beschleunigungsverlauf des P95 Fahrzeugs nach Anwendung eines Smoothing Splines zur Glättung des Geschwindigkeitsprofils.

Abbildung 136 zeigt exemplarisch den aus der Fahrzeugsimulation ermittelten Beschleunigungsverlauf des P95 Fahrzeugs nach Glättung des Geschwindigkeitsprofils. Man sieht deutlich wie die Glättung zu geringeren und selteneren Beschleunigungsänderungen führt (zum Vergleich siehe den nicht geglätteten

PAVE

Fall in Abbildung 135). Dies führt auch zu Einsparungen beim Energieverbrauch: für das P95 Fahrzeug des Pooling Szenarios ergibt sich für den über einen ganzen Betriebstag gemittelten Energieverbrauch ein Wert von 12,58 kWh/100km. Das bedeutet im Schnitt eine Einsparung von 3% im Vergleich zum nicht vernetzten Fall.

Zusammenfassung

Abbildung 137 zeigt die einzelnen Arbeitsschritte unserer Methode zur szenariobasierten Fahrzeugauslegung zusammengefasst in einer grafischen Übersicht.

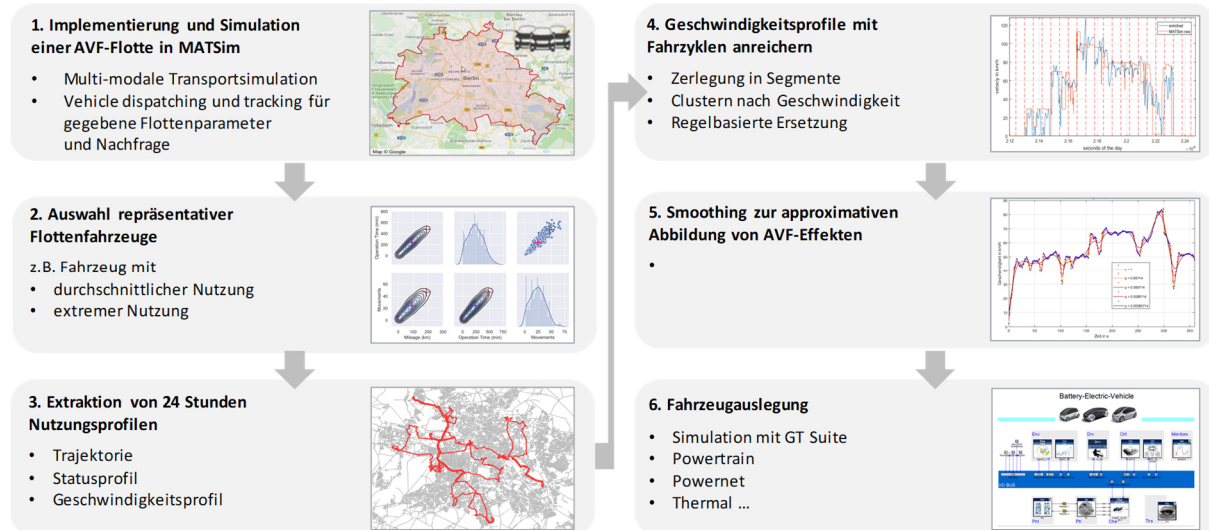


Abbildung 137: Grafische Übersicht unserer Methode zur szenariobasierten Fahrzeugauslegung.

4.7.3 Sensitivitätsanalyse

Im vorigen Abschnitt haben wir eine Methode zur Bestimmung charakteristischer Fahrzeuggrößen und Fahrprofile für zukünftige Mobilitätsszenarien entwickelt und diese auf zwei Szenarien für on-demand Transportdienste mit und ohne ride pooling angewandt. In diesem Abschnitt untersuchen wir die Sensitivität der charakteristischen Fahrzeuggrößen auf Änderungen in den Eingangsparametern dieser Szenarien, insbesondere für verschiedene Preismodelle der on-demand Transportservices.

Für den **Poolingfall** haben wir dazu zwei weitere Szenarien mit einem geringeren beziehungsweise einem höheren Preispunkt definiert und mit MATSim in ein neues Nutzergleichgewicht entwickelt. Eine detaillierte Auflistung der veränderten Fahrpreise im Vergleich zum ursprünglichen Szenario P5-10af zeigt Tabelle 51. Die sonstigen Szenarioparameter bleiben relativ zu P5-10af unverändert. Für alle drei Poolingszenarien haben wir die Bewegungen der Flottenfahrzeuge analysiert, wie in Kapitel 4.7.2 beschrieben repräsentative Flottenfahrzeuge identifiziert und deren charakteristische Fahrzeuggrößen bestimmt. Eine Auswahl charakteristischer Fahrzeuggrößen sind exemplarisch für das P95 Fahrzeug in Tabelle 51 aufgelistet.

Wie zu erwarten nimmt die Nachfrage nach on-demand Transportdiensten bei sinkenden Preisen zu. Dementsprechend ändern sich auch die charakteristischen Fahrzeuggrößen. Insbesondere steigt die tägliche Fahrleistung und Betriebszeit der Flottenfahrzeuge. Für Szenario P5-10bf finden wir z.B. eine um ca. 30% höhere Fahrleistung des P95 Fahrzeugs, die zum großen Teil von längeren Einzelfahrten verursacht wird, während die Anzahl der täglichen Fahrten pro Fahrzeug beinahe gleichbleibt. Dies rührt daher, dass der distanzbasierte Anteil am Fahrpreis beinahe halbiert wurde, wohingegen der

PAVE

Minimalpreis gegenüber P5-10af unverändert ist. Umgekehrt schlägt sich ein höherer Fahrpreis, der in Szenario P5-10cf durch einen festen Basispreis realisiert wurde, um insbesondere kurze Fahrten zu verteuern, direkt in einer geringeren Nachfrage nach on-demand Transportservices nieder und die Fahrzeugbelastung sinkt, im betrachteten Fall um ca. 10%. Im Detail spielen neben den Fahrpreisen auch weitere Faktoren, wie z.B. die Größe der Fahrzeugflotte, eine Rolle bei der Nachfrage nach on-demand Transportservices und beeinflussen damit die charakteristischen Fahrzeuggrößen. Genaue Vorhersagen zur Fahrzeugnutzung und zu Fahrprofilen zur Fahrzeugauslegung sind daher immer Szenario abhängig.

Modell	P5-10af	P5-10bf	P5-10cf
DRT minimumFare (EUR)	1,0	1,0	0,0
DRT baseFare (EUR)	0,0	0,0	1,0
DRT distanceFare (EUR/km)	0,18	0,10	0,18
PKW tägliche Kosten (EUR)	10,6	10,6	10,6
PKW Distanzkosten (EUR/km)	0,2	0,2	0,2
P95 tägliche Fahrleistung (km)	185,8	240,2	171,7
P95 tägliche Betriebszeit (min)	485,3	604,5	412,3
P95 tägliche Fahrten	48	49	38
P95 durchschnittliche Fahrtlänge (km)	3,9	4,9	4,5
P95 Durchschnittsgeschwindigkeit (km/h)	30,0	23,8	25,0

Tabelle 51: Szenarien für einen ridepooling on-demand Transportservice mit unterschiedlichen Fahrkosten.

Aufgelistet sind die Tarife für den on-demand Transport Service (DRT, die Fahrkosten berechnen sich als $\max(\text{minimumFare}, \text{baseFare} + \text{distance} * \text{distanceFare})$), die Kosten für einen normalen PKW, sowie die charakteristischen Fahrzeuggrößen des für das 95%-Perzentil repräsentativen Flottenfahrzeugs (P95).

Auch für den Fall eines **individuellen on-demand Transportservices** haben wir den Einfluss unterschiedlicher Fahrpreise auf die Fahrzeugnutzung anhand drei verschiedener Szenarien untersucht. In Szenario I-10bf haben wir den distanzbasierten Fahrpreis relativ zu Referenzszenario I-10af um ca. ein Drittel erhöht, die sonstigen Parameter aber unverändert gelassen. In Szenario I-10cf wurde außerdem der Minimalpreis durch einen Basispreis ersetzt, um kurze Fahrten zu verteuern. Eine detaillierte Aufstellung der relevanten Szenarioparameter ist in Tabelle 52 zusammengestellt. Für alle drei Szenarien haben wir die Fahrzeugbewegungen aus der Transportsimulation extrahiert, repräsentative Flottenfahrzeuge und deren charakteristische Fahrzeuggrößen bestimmt, sowie Geschwindigkeitsprofile für die Fahrzeugsimulation generiert. Eine Auswahl charakteristischer Fahrzeuggrößen sind exemplarisch für das P95 Fahrzeug in Tabelle 52 aufgelistet.

Wie zu erwarten, nimmt die Nachfrage nach on-demand Transportservices mit steigenden Fahrkosten ab, so dass gegenüber dem Referenzszenario (I10-af) die tägliche Fahrleistung des P95 Flottenfahrzeugs für das Szenario mit höheren distanzbasierten Fahrkosten (I-10bf) um fast 20% abfällt. Wird zusätzlich die Grundgebühr von EUR 2,00 statt in Form eines Minimalpreises als ein Basispreis erhoben, so reduziert sich die tägliche Fahrleistung des P95 Fahrzeugs um weitere 10 Prozent. Zugleich findet durch

PAVE

den Wechsel zu einem Basispreismodell (statt eines Minimalpreises) eine deutliche Verschiebung zu längeren Einzelfahrten statt.

	I-10af	I-10bf	I-10cf
DRT minimumFare (EUR)	2,0	2,0	0,0
DRT baseFare (EUR)	0,0	0,0	2,0
DRT distanceFare (EUR/km)	0,30	0,39	0,39
PKW tägliche Kosten (EUR)	10,6	10,6	10,6
PKW Distanzkosten (EUR/km)	0,2	0,2	0,2
P95 tägliche Fahrleistung (km)	213,3	174,4	158,1
P95 tägliche Betriebszeit (min)	570,9	408,0	337,9
P95 tägliche Fahrten	41	36	27
P95 durchschnittliche Fahrtlänge (km)	5,2	4,8	5,9
P95 Durchschnittsgeschwindigkeit (km/h)	22,4	25,6	28,1

Tabelle 52: Szenarien für einen individuellen on-demand Transportservice mit unterschiedlichen Fahrkosten.

Aufgelistet sind die Tarife für den on-demand Transport Service (DRT, die Fahrkosten berechnen sich als $\max(\text{minimumFare}, \text{baseFare} + \text{distance} * \text{distanceFare})$), die Kosten für einen normalen PKW, sowie die charakteristischen Fahrzeuggrößen des für das 95%-Perzentil repräsentativen Flottenfahrzeugs (P95).

5. Ergebniszusammenfassung

Im folgenden Kapitel werden die Zusammenfassungen der Kapitel noch einmal wiedergegeben (teilweise gekürzt oder ergänzt). Tiefergehende Informationen finden sie in den einzelnen Kapiteln.

aus Kap. 3 Zusammenfassung von Stand von Wissenschaft und Technik

Im Kapitel 3 wurde der Stand von Wissenschaft und Technik erfasst und strukturiert. Ausgehend von der AVF-Technologie wurden die Entwicklungsstufen der Automatisierung dargestellt und die Herausforderungen im Personen- und Güterverkehr bis zum autonomen Fahren zusammengestellt. AVF beeinflusst das gesamte Umfeld der Mobilität von Personen und Gütern und wird von ihm beeinflusst. Dies betrifft die Technologie selbst, ihre Leistungen und Kosten und die Bereiche Gesellschaft, Akzeptanz, Haftung. AVF hat Auswirkungen auf Mobilität, Transport und Logistik, Stadt und Raumplanung, Infrastruktur und Umwelt, Industrie und Arbeitswelt. In einem tabellarischen Vergleich am Ende von Kap.3 wird ein Überblick über die Vor- und Nachteile von AVF gegeben.

5.1 Zusammenfassung Kap. 4.1 Szenarien

aus 4.1. Zusammenfassung

Die Szenarien wurden mit einem in sieben Schritte strukturierten Szenarioprozess entwickelt, wobei der Untersuchungsbereich abgegrenzt wurde: räumlich: Berlin, verkehrlich: Personen-, Wirtschafts-, Öffentlicher-, & Güterverkehr und technologisch/organisatorisch: automatisches / autonomes Fahren. Als Zeithorizont wurde 2035+ gesetzt mit einem Zwischenschritt 2028.

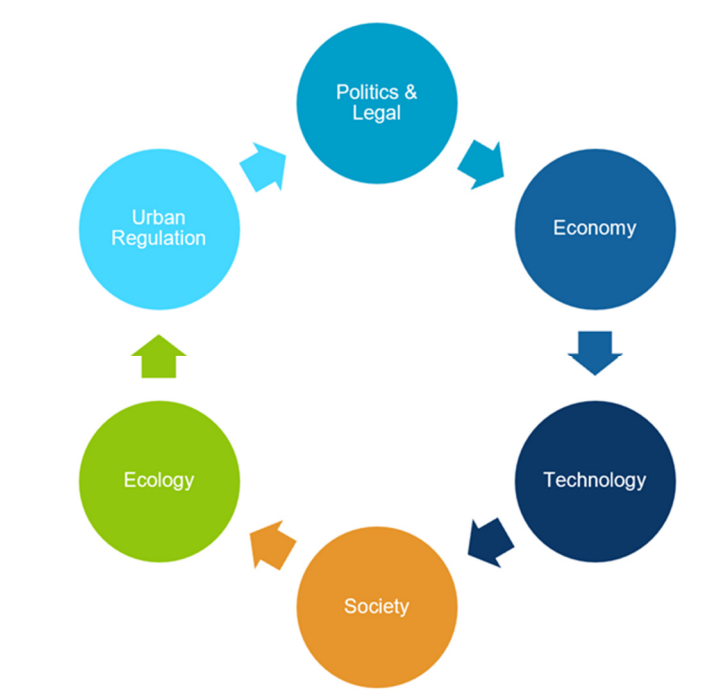


Abbildung 15: Dimensionen der Umfeldanalyse (siehe auch Kapitel 4.1.1)

Für diesen Untersuchungsraum wurde das Umfeld mit sechs Dimensionen beschrieben, für die relevanten Faktoren in Workshops bestimmt wurden.

PAVE

Im Szenarioprozess erfolgt jetzt die Faktorenbewertung und die Ermittlung der Schlüsselfaktoren/ Deskriptoren. Die alternativen Deskriptorenausprägungen sind die Grundlage für die Ableitung konsistenter, voneinander abgrenzenden Szenarien.

Von den fünf gefundenen Szenarien wurden vier für die weitere Bearbeitung ausgewählt. Zu den einzelnen Szenarien wurden UseCases entwickelt, die in Steckbriefen beschrieben wurden.

Szenario 2 das schöne individuelle Szenario

Das 2 Szenario beschreibt eine Zukunft in der AVF stark individualisiert und auf die jeweiligen Bedürfnisse des Kunden abgestimmt sind. Diese reichen vom AVF im ÖPNV der auf kostengünstige Nutzung ausgerichtet ist bis hin zu Premium Services mit exklusiven Leistungen auf Basis von AVF. Das Szenario ist damit sehr breit aufgestellt und stellt hohe Anforderungen an die Flexibilität bzw. Angebotsvielfalt der AVF Angebote.

Szenario 3 das Güterverkehrsszenario

Das Szenario 3 fokussiert auf die Anforderungen des Güterverkehrs. Es definiert UseCases aus dem Güterverkehr die vom spezialisierten kostengünstigen AVF Fahrzeug über spezielle Lösungen im Sammel- und Lieferverkehr bis hin zu regulatorischen Lösungen für Zustellgebiete zur Bündelung von Verkehren auf Basis von AVF. Das 3 Szenario hat klar die Kosten im Sinne von kostensparenden Lösungen mit Hilfe von AVF im Blick. Vor allem die Reduktion von Personal durch AVF wird thematisiert.

Szenario 4 das schöne kollektive Szenario

Szenario 4 stellt vor allem auf kollektive Verkehre mithilfe von AVF ab. Anders als in Szenario 2 werden hier vor allem Lösungen mithilfe von AVF im und um den ÖPNV vorgeschlagen. Dies reicht vom Ersatz des Linienverkehrs durch AVF Angebote über, schon im Einsatz befindliche, RideSharing Dienste bis hin zu Lieferdiensten. Auch regulative Maßnahmen wie zeitliche oder räumliche Gebietssperrungen sind angedacht um den Einsatz bzw. die Einführung von AVF zu unterstützen.

Szenario 5 AVFIV (Automatisierte vernetzte Fahrzeuge – individual Verkehr)

Szenario 5 betrachtet den Einsatz von innovativen Organisationsformen rund um AVF. So könnten private Mobilitätsbörsen das Aushandeln/Organisieren von geteilten Nutzungen zwischen AVF Besitzern, Betreibern und Nutzern möglich machen. AVF könnten auch zeitliche und räumliche Engpässe im Verkehrssystem reduzieren oder beseitigen. Dies sowohl auf der Fahrzeugebene durch z.B. Bündelung von Verkehren als auch auf der Infrastrukturebene z.B. durch Slotmanagement auf hochfrequentierten Straßen-/ Schienenabschnitten. Im Verlauf des Projekts werden aus den im Szenarioprozess entwickelten USCases relevante UseCases weiter ausgearbeitet und im Rahmen von empirischen Untersuchungen und Modellrechnungen genauer untersucht.

5.2 Zusammenfassung Kap. 4.2.1 Individuelle Mobilität - Mobilitätstypen & Akzeptanz

Hinsichtlich der Einstellungen gegenüber dem Auto, dem autonomen Fahren und alternativer Antriebe bestehen deutliche Unterschiede zwischen einzelnen identifizierten Clustern, den Mobilitätstypen (siehe Abbildung 56).

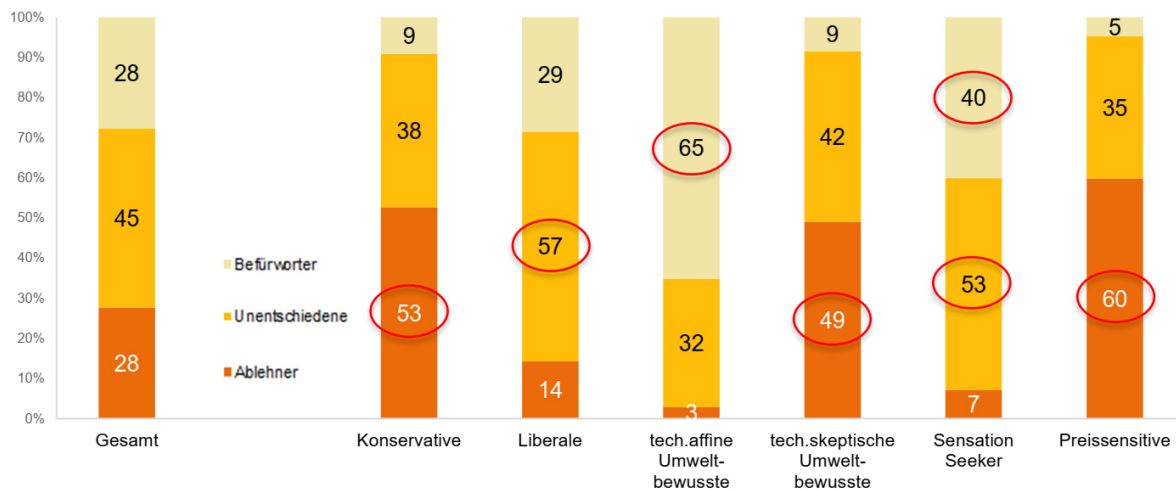


Abbildung 56: Affinität zum autonomen Fahren nach Mobilitätstypen

Die Einstellung gegenüber dem Umweltschutz kombiniert mit der Offenheit gegenüber Neuem und neuen Technologien scheinen als Motor für das autonome Fahren und neue Antriebstechnologien zu wirken.

Liberal eingestellte Personen stehen dem positiv gegenüber, sofern sie nicht in ihren Gewohnheiten eingeschränkt werden.

Preissensitive und konservativ eingestellte Personen, unabhängig davon, welchen Stellenwert der Umweltschutz hat, reagieren der neuen Mobilität gegenüber skeptisch.

Aufgeschlossen gegenüber den Themen autonomes Fahren, alternative Antriebe und auch Verzicht auf das Auto zeigen sich zudem hauptsächlich Männer, die jüngere und mittlere Altersgruppe, Personen im Innenstadtbereich sowie Personen mit einem höheren sozioökonomischen Status.

Fast die Hälfte der Befragten hat sich derzeit noch keine feste Meinung zum autonomen Fahren gebildet. Für autonom fahrende Taxis und Sammeltaxis gäbe es bereits jetzt ein nicht unerhebliches Nutzungspotenzial. Vor allem das Ausprobieren dieser Technologie sowie die Möglichkeiten für den Umwelt- und Klimaschutz scheinen dabei im Vordergrund zu stehen.

Schlusswort

In der weiteren Entwicklung des autonomen Fahrens können explorative Forschungsansätze zur Typologisierung und Prädikation von zukünftigem menschlichem Verhalten weiter ausgebaut werden. In dieser Untersuchung hat sich bestätigt, dass reines Abfragen von Themen nicht immer die wahren Einstellungen und Grundhaltungen von Menschen hervorbringen. Die geäußerten Haltungen sind nur selten fest verankert! Das persönliche Erleben und Kennenlernen, sowie die dabei hervorgerufenen positiven Emotionen können dabei unterstützen, vorhandene Denkweisen zu verändern und Menschen für etwas Neues – in diesem Fall neue autonome Mobilitätsangebote - zu begeistern.

Wir empfehlen in zukünftigen Forschungsprojekten die Integration von Persönlichkeitsmerkmalen in die Verkehrssimulation MATSim weiter zu voranzutreiben. Dadurch kann die realitätsnahe Abbildung menschlichen Verhaltens durch Agenten weiter verfeinert werden.

5.3 Zusammenfassung Kap. 4.2.2 Wirtschaftsverkehr/ Personenwirtschaftsverkehr

Gewerbliche Verkehre, insbesondere Güterverkehre werden in der wissenschaftlichen Diskussion nur selten betrachtet. Grund dafür sind fehlende oder unvollständige Daten. Aus diesem Grund wurde für die vorliegende Untersuchung die Methode des qualitativen Interviews angewandt. Zum bedarfsgesteuerten Personenverkehr (DRT) wurden 8 Interviews mit Mobilitätsexperten geführt, zum automatisierten Güterverkehr 23 Interviews mit Spediteuren und Kurier- und Expressdiensten, Verbänden und der Stadtverwaltung. Die Ergebnisse aus diesen Güterverkehrs-Interviews wurden außerdem in einer Fokusgruppe mit 7 Teilnehmern aus der Transportwirtschaft und der kommunalen Planung diskutiert und nach Praktikabilität bewertet.

Eine Empfehlung aus den Experteninterviews lautete, dort mit dem autonomen Personenverkehr zu beginnen, wo die Umsetzung am einfachsten ist. Private oder halböffentliche Gelände bieten sich für erste autonome People Mover auf Uni-Campussen, Messe- oder Firmengeländen an oder auf neu zu erschließenden Wohngebieten (z.B. Urban Tech Republic auf dem Gelände des TXL), wo autonome Shuttles als Teil des ÖPNV den Anschluss an die nächste S-Bahnstation gewährleisten können und so den Verzicht auf das eigene Auto erleichtern. Zudem kann dort die notwendige intelligente Infrastruktur von vornherein eingeplant werden.

Wichtige Potenziale durch Automatisierung im gewerblichen Personenverkehr

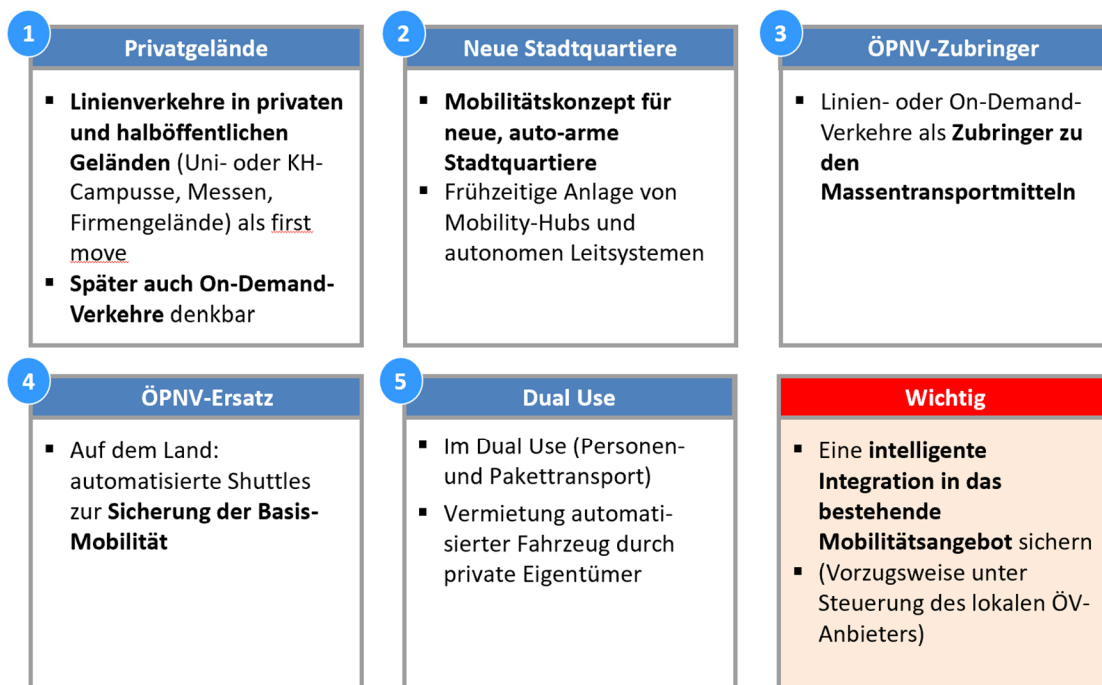


Abbildung 73: Wichtige Potentiale durch Automatisierung im gewerblichen Personenverkehr

Generell eröffnet autonomes Fahren für die drängenden Probleme des gewerblichen Güterverkehrs wie die kontinuierlich steigende Transportnachfrage, Kostendruck und Fahrermangel große Chancen.

PAVE

Durch Wegfall des Fahrers können bis zu 70% der Personalkosten eingespart werden. Nicht nur die Art der Fahrzeuge, ihre Steuerung durch den Menschen oder autonome Systeme und neue Antriebsformen, sondern auch die Organisationsstrukturen, die komplette Prozesskette entlang des klassischen Logistikmodells mit Vorlauf, Hauptlauf, Nachlauf werden sich verändern. Einzelne Prozessschritte, wie Ladungsübergabe beim Empfänger oder Umladungen können durch Automatisierung übersprungen werden.

In der zunehmend standardisierten Welt ist zudem offen, wer Eigner und Betreiber große automatisierter Flotten sein wird. Experten sind überzeugt, dass autonom fahrende Nutzfahrzeuge nicht mehr dem Logistikunternehmen gehören werden, sondern dass diese die Fahrzeuge beispielsweise vom OEM oder von einer Autovermietung leasen werden, nach einem ähnlichen Modell wie man es aus dem Containerverkehr kennt. Dies wiederum würde es auch kleineren, kapitalschwachen Unternehmen erlauben, die aus dem Wegfall der Fahrerkosten resultierenden Kostenvorteile des autonomen Fahrens zu nutzen.

In unseren Interviews und der Experten-Fokusgruppe konnten wir Potentiale für autonome Lieferfahrzeuge insbesondere in mehr oder weniger abgeschlossenen Gebieten wie Großbaustellen, Betriebshöfen, Messen oder auch neuen Wohngebieten ableiten.

Wichtige Potentiale durch Automatisierung in der städtischen Logistik

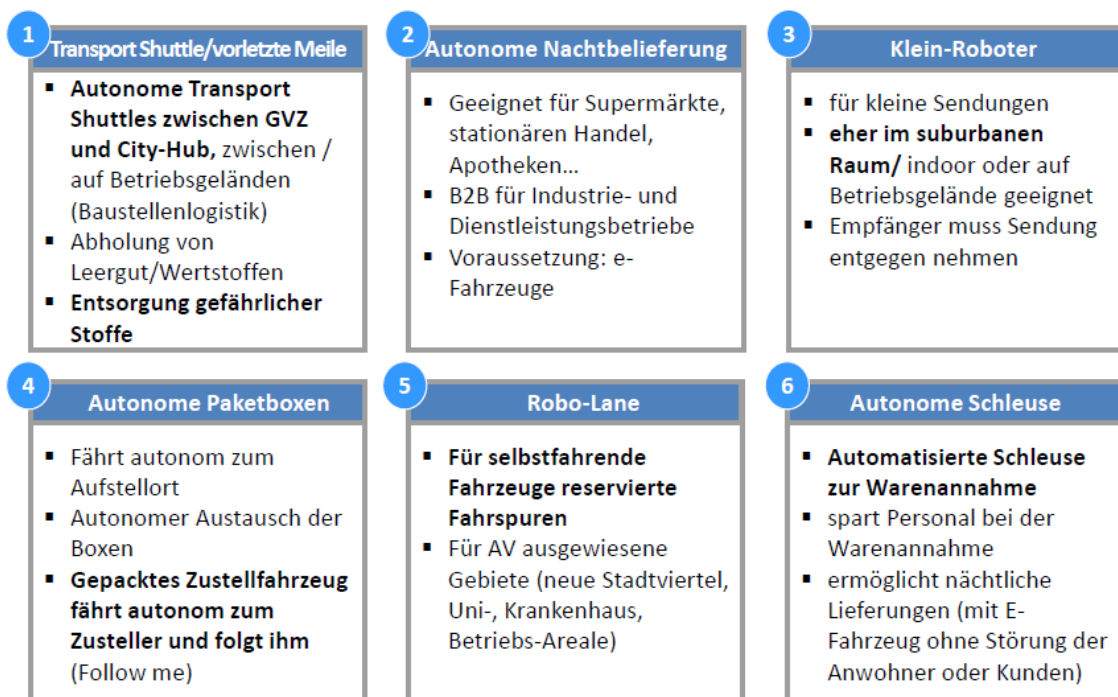


Abbildung 74: Wichtige Potentiale durch Automatisierung in der städtischen Logistik

Im dicht besiedelten urbanen Raum halten die Experten automatisiertes Fahren vor dem Zeithorizont 2035 nur in ausgewählten Fällen für machbar und sinnvoll. Das Potenzial sehen sie nicht so sehr für die immer wieder zitierte „letzten Meile“, sondern vor allem für die „vorletzte Meile“, wo autonome Shuttle-Transporte von den Logistik-Hubs am Stadtrand in den verkehrsarmen Nachtstunden Entlastung bieten könnten. Mit einem solchen Modell könnten Apotheken, Supermärkte oder im Stadtgebiet liegende Micro-Hubs beliefert werden. Eine ebenfalls automatisierte Übergabe mittels automatisierter Schleusen spart Personal bei der Warenannahme und auch die Paketdienstleister könnten die immer

PAVE

knapper werdende Ressource „Zusteller“ effektiver einsetzen. Die „letzte Meile“ mit der Übergabe an den Privatkunden hingegen wurde aufgrund der Erwartungshaltung der deutschen Kunden (Lieferung an die Wohnungstür) von den Experten eher als kritisch für die Automatisierung betrachtet.

Eine solche mehrstufige Logistiklösung würde durch Automatisierung der Be- und Entladung auf Basis standardisierter Ladungsträger weiter an Effektivität gewinnen. Und sie könnte umso nutzbringender umgesetzt werden, wenn sie in die Hände einer eigens zu gründenden städtischen Logistikgesellschaft gelegt würde.

Empfehlung: Frühzeitiger Ausbau der Infrastruktur und eine kluge Rahmensetzung durch die Städte



Abbildung 75: Empfehlungen

Sowohl für den Personen- als auch den Gütertransport gilt somit: Damit das autonome Fahren einen Beitrag zur Entlastung der Verkehrssituation und für mehr Sicherheit im städtischen Straßenverkehr leisten kann, sollten die Städte der Entwicklung aktiv und offen gegenüberstehen und frühzeitig die Weichen stellen, damit alle das vorhandene Potenzial nutzen können.

5.4 Zusammenfassung Kap. 4.3. AVF-Potentiale in der urbanen Mobilität

Aus Kap. 4.3.1 Use Cases

Als Grundlage für die weiteren Arbeiten werden ausgewählte Use Cases beschrieben und diskutiert.

- Motorisierter automatisierter Individualverkehr
- Robotaxi
- Ridesharing
- Dual use
- Privat AVF Fahrzeuge

PAVE

- Robotaxi/Ridesharing
- ÖPNV

Für den Untersuchungsraum Berlin werden ausgewählte Kenngrößen angegeben aus denen das unterschiedliche Mobilitätsverhalten in der inneren (Hundekopf) und äußeren Stadt erkennbar sind. Die diskutierten Use Cases haben in der inneren und äußeren Stadt unterschiedliche Ausprägungen.

Aus Kap. 4.3.2. Mobilitätsangebote im urbanen Personenverkehrsmarkt

In diesem Kapitel werden Grundlagen, Daten und Zusammenhänge zu weiteren Potentialabschätzungen zusammengestellt. Die Quantifizierung der Potentiale zukünftiger AVF-Mobilitätsangebote und ihre Nachfrage basiert auf den heute verfügbaren Daten zu Mobilität und Verkehr, Befragungen und Szenarien möglicher Zukünfte.

Die neuen Technologien Digitalisierung, E-Mobility, AVF erhöhen den Wettbewerb und die Vielfalt des Mobilitätsangebotes. Der MIV wird attraktiver, der ÖPNV attraktiver und kostengünstiger. Fahrerlose Taxen und Shuttles ergänzen als Robotaxi und Ridesharing das Angebot und liegen in Fahrtzeiten und Fahrtkosten zwischen MIV und ÖPNV. Zusätzlich entstehen unterhalb des ÖPNV neue Mobilitätsangebote mit dem Elektrofahrrad und e-Scooter. Zur Darstellung der Mobilitätsangebote eignet sich das Zeit-Kosten-Diagramm.

Die heutigen urbanen Mobilitätsangebote MIV, ÖPNV, Fahrrad, (zu Fuß) haben stark unterschiedliche Grenzkosten, wenn man sie im Zeit-Kosten-Diagramm einträgt. Die sich ergebende Grenzkostenkurve zeigt, ob ein neues Angebot vorteilhaft ist. Liegt es unterhalb der heutigen Grenzkosten, hat es gegenüber den heutigen Angeboten einen höheren Nutzen, liegt es darüber, ist das neue Angebot nicht vorteilhaft. Das Ende der Grenzkostenkurve der urbanen Mobilitätsangebote ist heute durch den MIV gegeben. Eine Angebotserweiterung zu höheren Grenzkosten - mit geringen Marktanteilen - ist das Ziel der Flug- oder Lufttaxi

Die Abschätzung der Mobilitäts-Nachfrage und ihre verkehrliche Wirkung basiert auf der PAVE-Online-Befragung von 1004 Probanden in Berlin (Kapitel 4.2.1). Abgefragt wurde die vermutete Nutzungshäufigkeit der AVF-Angebote. Die Clusterung der Nachfrage ergab 6 Mobilitätstypen, von denen drei über 90% der täglichen AVF-Dienstenutzer repräsentieren. Etwa ein Drittel der in PAVE Befragten würde AVF-Dienste nutzen, die voraussichtliche tägliche Nutzungen der AVF-Dienste liegt insgesamt unter 10%. Für Berlin gesamt teilen sich die Nutzungen etwa zu gleichen Anteilen auf Robotaxi und Sammeltaxi auf.

In dieser Abschätzung gewinnen Robotaxi und Sammeltaxi von allen Mobilitätsanbietern Anteile. Die Verluste des Umweltverbundes führen zu mehr Straßenverkehr, hier in einer Größenordnung von etwa 4% (Besetzungsgrad Robotaxi =2).

Das Nachfrageverhalten in der inneren Stadt unterscheidet sich von dem der äußeren Stadt erheblich. Schon heute ist die Fahrzeugverfügbarkeit im Haushalt in der Innenstadt fast 40% niedriger als in der äußeren Stadt. Die Bereitschaft der Autofahrer zukünftig auf ein Auto zu verzichten, ist mit 20% etwa doppelt so hoch wie in der äußeren Stadt. Die gleiche Wirkung hat eine Citymaut, die 22% der Innenstädter zur Abgabe des Autos bringen könnte (9,5% in der äußeren Stadt). Ebenso ist die voraussichtliche Nutzung von AVF-Diensten in der Innenstadt mit 12,5% größer als in der äußeren Stadt mit knapp 8%.

Das AVF- Potential scheint in der inneren Stadt einfacher zu erschließen zu sein als in der äußeren Stadt. In der äußeren Stadt ist die Neigung gering, das eigene Auto abzuschaffen oder AVF-Mobilitätsdienste

PAVE

zu nutzen, obwohl in der Befragung der Servicelevel und Fahrtpreis nicht nach Stadtgebiet angepasst wurde (etwa entsprechend Zone ABC im ÖPNV).

Die Einführung einer Citymaut von 12€ für die innere Stadt („Hundekopf“) würde etwa 30% der Autofahrer abhalten in die innere Stadt einzufahren. Das Verkehrsaufkommen in der inneren Stadt verringert um etwa 26%. Die jährlichen Einnahmen aus der Maut belaufen sich in dieser Abschätzung auf maximal 860 Mio€/a.

Durch die Citymaut verliert der MIV in Berlin 3%-Punkte im Modalsplit. Die Verlagerung auf die AVF-Dienste lässt keine verkehrliche Entlastung des Straßenverkehrs erwarten.

Die oben erarbeiteten Daten und Zusammenhänge liefern Grundlagen für die weiteren quantitativen Untersuchungen. Die ermittelten Strukturen der Mobilitätsnachfrage sind eine Basis für die Abschätzung einer zukünftigen Nachfrage, die sich auf soziodemografische Entwicklungen stützt.

Aus 4.3.3 AVF-Potentiale in der urbanen Mobilität, Marktmodelle

Die MATSim Simulationen erlauben es, ein aussagekräftiges Bild der Nachfrage, des Absatzes und der Kosten der AVF-Dienste in dem gegebenen urbanen Mobilitätsmarkt Berlin abzuleiten. Es ergeben sich Preis-Absatz-Funktionen und „klassische“ Erlös- und Kostenfunktionen. Mit diesem Marktmodell können die Gewinnzone (Gewinnschwelle, Gewinngrenze), der maximale Gewinn oder auch die bei einem erwünschten Absatz entstehenden Verluste, hier der Subventionsbedarf, abgeschätzt werden.

Die Abhängigkeit der Nachfrage und der Kosten von Servicelevel und Preis kann nachgewiesen werden. Ein Service mit Wartezeiten deutlich unter 7min sind nach den vorliegenden MATSim-Simulationsergebnissen und den zu Grunde liegenden Rahmenbedingungen wirtschaftlich nicht darstellbar. Der hohe Servicelevel mit kurzen Wartezeiten und adressgenauen Halten führt zu geringem Besetzungsgrad, längeren Umwegfahrten und Leerfahrten. Dadurch und durch die Gewinne von Kunden des Umweltverbundes erhöht sich die Strassen-Verkehrsleistung gegenüber dem 0-Fall. Die in der Gewinnzone liegenden Auslegungspunkte ergeben Pooling-Preise, die zwischen den variablen und Pkw-gesamt-Kosten pro Kilometer liegen.

5.5 Zusammenfassung Kap. 4.5 Modellrechnung aus verkehrlicher Sicht

Aus 4.5.4 Zusammenfassung Modellrechnungen

Dieses Kapitel beschreibt eine simulative Wirkungsanalyse von automatisierten On-Demand-Shuttles im Untersuchungsraum Berlin. Es beinhaltet Ausführungen zum methodischen Vorgehen, Beschreibungen der simulierten Szenarien und Darstellungen von Ergebnissen. Das Hauptmerk der Auswertung liegt auf den verkehrlichen und ökologischen Wirkungen der automatisierten OnDemand-Shuttles, sowie auf ausgewählten Beobachtungen und daraus entstehenden Handlungsempfehlungen (für die Politik und handelnde Akteure).

Das Kernstück der Methodik stellt die Open-Source-Software Multi-Agent-Transport-Simulation, kurz MATSim, dar. Im Rahmen des Projektes wurden die MATSim-Module erweitert und verfeinert, Schnittstellen zur Verprobung und Optimierung von verschiedenen operativen Ansätzen des Projektpartners OvGU geschaffen:

- Während der Projektlaufzeit von PAVE wurde das DRT-Modul um Funktionen zur Abbildung von diversen Algorithmen für die strategische Re-Positionierung von leeren Fahrzeugen in Abhängigkeit dynamischer Parameter (Rebalancing) erweitert.

PAVE

- Die strategische Repositionierung von Fahrzeugen auch in Gebieten außerhalb der höchsten Nachfragekonzentration. Das ist insbesondere wichtig im ländlichen Raum und kann zu akzeptablen Wartezeiten beitragen, führt jedoch zum Preis einer höheren Laufleistung der Fahrzeuge.
- Entwicklung einer Methode zur Abschätzung der nötigen Flottengröße zur Bedienung einer Nachfrage unter der Vorgabe von einer Zielwartezeit.
- Simulationsverfahren von Dual-Use-Fahrzeugen, die sowohl im Personen- als auch dem Güterwirtschaftsverkehr eingesetzt werden können.
- Routing zur Abbildung von intermodalen Wegen mit privat Pkw und On-Demand-Shuttle-Diensten.
- Verfeinerung des Open-Berlin-Szenarios mit Ergebnissen der PAVE-Befragung wie dem Verhalten der Mobilitätstypen und Ausstattung der Agenten mit Einkommensattributen.
- Methode zur Berücksichtigung der Nachfragedichte zur Skalierung der Flottengrößen und Fahrleistungen für On-Demand-Flotten.

Mit dem so modifizierten MATSim-Modell wurden umfangreiche Simulationsexperimente für Robotaxi- und Pooling-Dienste und die innere und gesamte Stadt durchgeführt (zum Teil veröffentlicht unter der Domain vsp.berlin/pave). Eine Simulation liefert für gegebene Parameter alle wesentlichen Kenngrößen eines On-Demand-Dienstes. Die Abhängigkeit der Nachfrage und der Kosten kann durch Parametervariationen des Preises und des Servicelevels – hier die Wartezeit - abgeschätzt werden. Der Gewinn pro Fahrzeug ist bei gleichen Nutzerpreisen für das Bedienegebiet Innenstadt immer höher im Vergleich zum Bedienegebiet der ganzen Stadt. Gewinnorientierte Anbieter würden sich in den Bereich der höchsten Effizienz bzw. Gewinnrate zurückziehen. Das Ziel einer guten Versorgung auch abgelegener Gebiete kann nur durch Regulierungen sichergestellt werden.

Die Zielvorgabe von 95% der Wartezeiten unter 7 Minuten ist schwer erreichbar und ein wesentlicher Grund für eine Pooling-Rate mit Werten von circa 1,4 bis 1,5 Passagierkilometern pro Lastkilometer, die niedriger ausfällt als erwartet. Beide Bedienformen, Robotaxi und Pooling, führen zu einer Steigerung des Verkehrsaufkommens. Dies ist hauptsächlich durch den hohen Anteil der Wechsler vom Umweltverbund, die die Wechsler vom Pkw überkompensieren, sowie durch die zusätzlichen Leerfahrten zu begründen. Die Flotten der On-Demand-Shuttles erneuern sich wegen der hohen Fahrleistungen schneller als privat Pkw. Sie besitzen deshalb die neuste umweltfreundliche Technologie und mindern damit die Emissionen des Verkehrs. So führt die Einführung von elektrischen On-Demand-Shuttles generell zu einer Minderung des direkten CO₂-Ausstoßes des Verkehrs.

Da verkehrsreduzierende Effekte durch AVF-Mobilitätsdienste nicht erreicht werden, wurde die Wirkung regulatorischer Maßnahmen abgeschätzt. Ziemke untersuchte, welche Auswirkungen eine Distanzmaut hat, wenn sich die variablen Kosten des Pkw von 0,20 €/km verdoppeln bzw. verdreifachen (Ziemke et. Al 2019). Exemplarisch zum obigen Beispiel wird von einem Distanzpreis von 0,20 €/km für beide Services und einem Einstiegspreis von 1 € für den PoolingService und einem Einstiegspreis von 2 € für den Robotaxi-Service ausgegangen. Hierbei zeigt sich, dass eine Verdopplung der variablen Nutzerkosten von 0,20 €/km auf 0,40 €/km den Anteil der Wege mit dem privaten PKW circa halbiert. Eine weitere Erhöhung um 0,20 €/km auf 0,60 €/km zieht eine weitere Halbierung mit sich. Der größte Teil der ehemaligen PKW-Wege werden mit dem Pooling-Service zurückgelegt. Eine Einführung der Maut erhöht jedoch den Anteil derjenigen PKW Wege, die mit dem Umweltverbund (bicycle, walk, pt) substituiert werden. Diese Effekte führen in Summe zu einer starken Reduktion der Fahrleistung auf der Straße. Ohne Maut würde die Einführung beider Bedienformen die Fahrleistung im Vergleich zum Basisszenario um circa 7,8% (nach oben diskutierten Begründungen) steigern. Die zusätzliche Einführung einer Distanzmaut in Höhe der variablen PKW-Kosten, also 0,20 €/km, senkt in der

PAVE

Simulation die Fahrleistung um 27,7 % im Vergleich zum Basisfall. Im Falle einer PKW-Distanzmaut von 0,40 €/km senkt sich die Fahrleistung um 46,6 % gegenüber dem Basisfall. Die jährlichen Einnahmen aus der Distanzmaut ergeben in grober Abschätzung etwa 2,2 Mio€/a, sowohl bei einer Maut von 0,20 €/km als auch bei 0,40 €/km.

Das Verbot privater PKWs in der Innenstadt bei gleichzeitigem Einführen eines Substitutionsangebotes in Form eines Pooling Services, der nur im Stadtinneren operiert, verringert das Fahrzeugaufkommen in ganz Berlin um circa 9% gegenüber dem Ist-Zustand. Im Vergleich zum Szenario ohne PKW-Verbot und demselben Pooling-Angebot verringert sich das Fahrzeugaufkommen um circa 12%.

5.6 Zusammenfassung Kap. 4.6 Evaluation von Transport- und Mobilitätsdienstleistungen

Die Evaluation der im Projekt identifizierten Transport- und Mobilitätsdienstleistungen erfolgt in diesem Kapitel aus betriebswirtschaftlicher Sicht mittels Methoden des Operations Research. Zu diesem Zweck wurde ein Optimierungsframework entwickelt, welches Algorithmen zur Untersuchung der Use Cases mit Fokus auf das strategische Flottenmanagement und das operative Auftragsmanagement ermöglicht. Zudem wurde eine Schnittstelle zur Verkehrssimulation MATSim implementiert, um die zum Management automatisierter Fahrzeugflotten entwickelten Lösungsansätze in einer realitätsnahen Simulationsumgebung zu evaluieren. Die durchgeführten Untersuchungen eröffnen Einblicke in die Wirkungsweise zukünftiger, innovativer Dienste und zeigen die betriebswirtschaftlichen Potentiale automatisierter Transport- und Mobilitätsdienstleistungen auf.

Aus 4.6.2.3 Zusammenfassung Transportdienstleistungen

Im Gütertransport der Zukunft können fahrerlose autonome Lieferfahrzeuge Haustür-Lieferungen übernehmen. Dabei handelt es sich um eine mögliche Art der Zustellung auf der letzten Meile, d.h. die Kunden erhalten ihr Paket komfortabel direkt an der Haustür innerhalb eines vorab definierten Zeitfensters. Das automatisierte oder auch manuelle Beladen von autonomen Transportern ist konzeptionell recht einfach umzusetzen. Eine Herausforderung hingegen stellt die Übergabe der Pakete an den Kunden dar. Ein weiterer Ansatz zur autonomen Belieferung stellen kleinere Lieferroboter dar, welche bereits heute eingesetzt werden. Diese Lieferroboter sind in kleineren Außenstellen stationiert, sogenannten Hubs, welche nur wenige Kilometer, entsprechend der Reichweite der Roboter, vom Kunden entfernt sind. Von dort aus beliefern sie jeden Kunden einzeln und direkt.

Zur Beurteilung der Anwendbarkeit und zur Abschätzung des Potenzials der automatisierten Belieferungskonzepte wurden drei realitätsnahe Szenarien konzipiert, welche variierende Auftrags- und Serviceumgebungen repräsentieren. Alle Szenarien orientieren sich am Großraum Berlin und basieren auf realen Belieferungsdaten eines großen deutschen Paketdienstleisters. Für jedes der drei Szenarien wurde Herkömmliche Belieferung, Autonome Lieferfahrzeuge, Autonome Lieferroboter verglichen.

Zur Bestimmung der minimalen Flottengröße wurden aktuell gängige Lösungsverfahren aus der Literatur herangezogen. Aufgrund der Art und Komplexität der betrachteten Probleme sind diese nur schwer in realistischer Zeit lösbar. Es wurde daher vorwiegend mit heuristischen Verfahren und weniger exakten Modellen gearbeitet um Lösungen möglichst am Optimum zu finden. Prinzipiell unterscheiden sich die Herangehensweisen von der herkömmlichen bzw. autonomen Auslieferung zu der mit den autonomen Lieferrobotern deutlich.

Die durchgeführten Untersuchungen zu den automatisierten Belieferungskonzepten zur Haustür Lieferung auf der letzten Meile zeigen ein außerordentliches Potenzial zur Kosteneinsparung. Verglichen mit der konventionellen Lieferung ist die bereits umsetzbare Belieferung mit autonomen

PAVE

Lieferrobotern über 60 % günstiger. Sobald vollständig autonome Fahrzeuge auf den Straßen unterwegs sind, werden Kosteneinsparungen von bis zu 88 % denkbar.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Herkömmliche Belieferung	922 € (100 %)	1105 € (100 %)	1440 € (100 %)
Autonome Lieferfahrzeuge	108 € (11,71 %)	128 € (11,58 %)	232 € (16,11 %)
Autonome Lieferroboter	273 € (29,61 %)	401 € (36,29 %)	559 € (38,82 %)

Tabelle 40: Kostentechnischer Vergleich untersuchter Konzepte im privaten Gütertransport

Eine Automatisierung des Gütertransports ist insbesondere auf der letzten Meile mit hohen technischen und finanziellen Herausforderungen verbunden. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen ein deutliches Potenzial, dass sich Investitionen in innovative Technologien langfristig rentieren würden, insbesondere in dicht besiedelten Gebieten.

Eine zukünftige Automatisierung von On-Demand-Shuttle Diensten begünstigt darüber hinaus den Betrieb von Kleinstwagenflotten, die gegenüber den heute üblichen Flotten aus Kleinbussen eine stärkere Belastung des öffentlichen Verkehrssystems darstellen würden. Neue wirtschaftliche Anreize für das effiziente Bündeln von Fahrten könnten jedoch zukünftig den Einsatz größerer Fahrzeugtypen begünstigen und die Entwicklung von im öffentlichen Interesse agierenden Diensten fördern. von der OVGU Sollen automatisierte On-Demand-Shuttles außerdem zur Erfüllung politischer Ziele.

Aus 4.6.3 Zusammenfassung Mobilitätsdienstleistungen

Aus 4.6.3.1. Design zuverlässiger Mobilitätsdienstleistungen

Die Beförderung von Personen ist in städtischen Gebieten wie Berlin häufig von Unsicherheiten geprägt. Aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens und der limitierten Infrastruktur kommt es insbesondere zu den Hauptverkehrszeiten oder an speziellen Bündelungspunkten wie Flughäfen oder Bahnstationen immer wieder zu unvorhersehbaren Verzögerungen im Verkehrsablauf. Mobilitätsdienstleister, in unserem Falle repräsentiert durch das RoboTaxi, müssen diese Störungen vorhersehen und berücksichtigen, um den Kunden einen möglichst zuverlässigen Service bieten zu können.

In dieser Arbeit wurden die Auswirkungen von einfachen und komplexeren Puffern, für die Planung von zuverlässigen Personenbeförderungen ermöglicht durch autonome Flotten, demonstriert. Basierend auf der Integration von Optimierung und Simulation konnte gezeigt werden, dass sinnvoll geplante Puffer einen guten Mittelweg aus Premium-Service für Fahrgäste und Betriebskosten schaffen können. Diese Erkenntnisse lassen sich auf den Use-Case der RoboTaxis übertragen und es kann davon ausgegangen werden, dass sich die gewonnenen Lösungsansätze besser mit autonom und integriert fahrenden Fahrzeugen implementieren lassen als mit herkömmlichen Fahrern. Daher entstehen durch den Einsatz von RoboTaxis neue Möglichkeiten kundenspezifische Serviceoptionen anzubieten, welche die Akzeptanz der Kunden und bei gewissen Premiumkunden die Bereitschaft höhere Preise zu zahlen, fördern wird.

Aus 4.6.3.2. Zusammenfassung Strategisches Flottenmanagement für automatisierte Ride-Sharing-Dienste

PAVE

In diesem Beitrag wurde das strategische Flottenmanagement automatisierter Ride-Sharing-Dienste untersucht. Zu diesem Zweck erfolgte die Evaluation homogener Flotten mittels einer das operative Auftragsmanagement simulierenden statischen Tourenplanung. Anschließend erfolgte die Erweiterung zu heterogenen Flotten durch die Umsetzung erster einfacher Ansätze. Zuletzt wurde die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf On-Demand Ride-Sharing-Dienste analysiert, indem das operative Auftragsmanagement nochmals mittels einer dynamischen Tourenplanung simuliert wurde. Die Ergebnisse zeigen für Ride-Sharing-Dienste das große Kostensenkungspotenzial von Flotten autonomer Fahrzeuge. Darüber hinaus wurde insbesondere deutlich, dass die sich verändernde Kostenstrukturen signifikant auf die Rangfolge der Kosteneffizienz unterschiedlich großer Fahrzeugtypen auswirken. So ergab sich für automatisierte Ride-Sharing-Dienste, dass der kleinste Fahrzeugtyp die kosteneffizienteste Option darstellt, da die dominierenden Personalkosten entfallen. Diesem betriebswirtschaftlichen Vorteil von Flotten autonomer Kleinwagen stehen jedoch mit größeren Flotten und höheren Fahrleistungen Nachteile für das öffentliche Straßenverkehrssystem gegenüber. Zusätzlich würde damit die Chance einer umfangreichen Konsolidierung von Fahrten durch automatisierte Ride-Sharing-Dienste sinken. Es gilt also bei der Bewertung der Potentiale automatisierter Ride-Sharing-Dienste zu berücksichtigen, ob öffentliche oder betriebswirtschaftliche Interessen bei der Flottenkomposition im Vordergrund stehen. Neben der Analyse homogener Flotten wurden erste Potentiale heterogener Flotten aufgezeigt, deren Ausschöpfung insbesondere in der dynamischen Tourenplanung jedoch eine Herausforderung für zukünftige Arbeiten darstellt. Darüber hinaus sollte untersucht werden, unter welchen Bedingungen höhere Besetzungsgrade erreicht werden können und wie sich dies auf die Kosteneffizienz unterschiedlicher Fahrzeugtypen auswirkt. Dabei wäre auch eine Erweiterung um Fahrtenfragen sinnvoll, die einen bestimmten Fahrzeugtyp erforderlich machen, wie beispielsweise im Falle von Rollstuhlfahrern oder Familien.

Aus 4.6.3.3. Zusammenfassung Bedeutung von Nachfrage- und Erfüllungssteuerung

Zusammengefasst zeigen die Ergebnisse unterschiedliche Wirkungsweisen von Nachfrage- und Erfüllungssteuerung, also der Auftragsannahme und Auftragsabwicklung. Dabei wird deutlich, dass für On-Demand Ride-Sharing Dienste insbesondere die Kombination einer komplexen Nachfrage- und Erfüllungssteuerung hohes Potenzial birgt, welches jedoch mit Nachteilen für die Kunden verbunden ist. Darüber hinaus hängt es von den Umweltbedingungen ab, ob die Beschränkung auf eine komplexe Nachfrage- oder Erfüllungssteuerung eine leistungsfähige Alternative darstellt. Ähnliches gilt für Reservierungsdienste, welche beispielsweise bei einem entsprechenden Nachfrageüberschuss von einer effizienten Nachfragesteuerung profitieren können. Mit Blick auf automatisierte Ride-Sharing Dienste müssen die Ergebnisse auch im Licht der sich wandelnden Kostenstrukturen bzw. der in Abschnitt 3.2. identifizierten Konsequenzen betrachtet werden. Diese zeigten unter anderem eine sinkende Bedeutung des Bündelns mittels großer Fahrzeugtypen zugunsten kleinerer, kostengünstigerer Fahrzeugtypen, was zukünftig auf eine Bedeutungsverschiebung von Erfüllungs zur Nachfragesteuerung hindeutet. Damit einher geht eine Minderung der kostenseitig durch die nachfolgend durchgeführte Erfüllungssteuerung entstehenden Vorteile von Reservierungsdiensten mit Beförderungspflicht. Für automatisierte, privatwirtschaftliche Ride-Sharing-Dienste birgt somit insbesondere eine gezielte Nachfragesteuerung Potenzial zur Kostenminimierung, mit der Konsequenz, dass sich das Angebot tendenziell auf kurze Fahrten innerhalb zentraler Gebiete mit hoher Nachfragedichte beschränkt.

5.7 Zusammenfassung Kap. 4.7 Fahrzeuganforderungen und Energetische Bewertung

Für die neuen Mobilitätsdienste stehen bisher nur sehr rudimentäre Datensätze zur Nutzungscharakteristik der Fahrzeuge zur Verfügung (bzw. praktisch keine für einen autonomen Flottenbetrieb), deshalb kommt der computergestützten Simulation detaillierter Nutzungscharakteristiken in der Fahrzeugauslegung große Bedeutung zu.

PAVE

Grundlage ist die Transportsimulationsumgebung MATSim, die folgende Ergebnisse liefert:

Simulation der Fahrbewegungen ganzer Fahrzeugflotten in einem städtischen Ballungsraum über einen Zeitraum von 24 Stunden unter Berücksichtigung des Umgebungsverkehrs.

Aufzeichnung des Fahrzeugstatus (Warten, Fahrt mit n Fahrgästen, Leerfahrt, Laden, ...) und der Fahrtstrecken.

Detaillierte (instantane) Geschwindigkeitsprofile der einzelnen Fahrten für die energetische Auslegung des Antriebsstrangs und weiterer Fahrzeugkomponenten

Hierzu haben wir im Open Berlin Szenarios (Ziemke, Kaddoura & Nagel 2019, <https://github.com/matsimscenarios/matsim-berlin/tree/5.3.x>) zwei Zukunftsszenarien definiert, in denen das Berliner Verkehrssystem mit einer großen Flotte autonomer Taxis ergänzt wird, um einen stadtweiten dynamischen Transportservice anzubieten. In Szenario P5-10af implementieren wir einen Transportservice, in dem bis zu 5 Fahraufträge in einem Taxi gebündelt werden (ride pooling). Szenario I-10af modelliert einen individuellen Transportservice, in dem die Taxis zu einem gegebenen Zeitpunkt exklusiv den Fahrauftrag eines Kunden bedienen (Robotaxi). Die Simulationen liefern die Anzahl und Einsatzprofile der aktiven Flottenfahrzeuge, Robotaxi bzw. Pooling, über den Verlauf des Tages sowie deren Auslastung mit Fahrgästen.

Trotz des Poolings von Fahraufträgen im Szenario P5-10af sind die Flottenfahrzeuge größtenteils nur mit einem Fahrauftrag ausgelastet (links). Zu einem gewissen Grad werden zwei bis drei Fahraufträge gebündelt. Ein höherer Bündelungsgrad ist im gewählten Szenario kaum zu beobachten.

Für die Fahrzeugauslegung ist es erforderlich, aus den Robotaxi- und Pooling-Flotten Fahrzeuge mit repräsentativen Fahreigenschaften zu identifizieren. Dazu aggregieren wir charakteristische Fahrzeuggrößen, wie z.B. die Fahrleistung, die Betriebszeit, die Anzahl der bedienten Fahranfragen, die Höchstgeschwindigkeit, oder die Durchschnittsgeschwindigkeit für jedes Flottenfahrzeug über einen ganzen Betriebstag

Für jede der charakteristischen Fahrzeuggrößen können wir über alle Flottenfahrzeuge mit statistischen Methoden Ensemblemittelwerte bilden, z.B. für das arithmetische Mittel, den Median oder das 95% Perzentil (P95) und damit repräsentative Fahrzeugnutzungen auswählen. Die Szenarien mit (P5-10af) und ohne ride-pooling (I-10af) unterscheiden sich in der Fahrzeugnutzung nicht signifikant: ohne Pooling liegt die tägliche Fahrleistung und Betriebszeit um ca. 15% höher, weil die Fahrzeuge in diesem Fall (typischerweise) einen höheren Grad an Leerfahrten aufweisen.

Eingangsgrößen zur Fahrzeugsimulation sind die aus den MATSim-Simulationen vorliegenden Status- und Geschwindigkeitsprofile, wobei letztere mit hochaufgelösten Fahrzyklen (CADC, DS urban, FKFS) angereichert werden müssen.

Zur Betrachtung der Systeme auf Fahrzeugebene sowie des Energieverbrauchs verwenden wir die Multi-Physics Simulationsumgebung GT Suite von Gamma Technologies. Als Input für die GT Simulation dienen die angereicherten Geschwindigkeitsprofile, bzw. zur Modellierung des Einflusses des autonom vernetzten Fahrens die geglättete Variante. In GT Suite wird dann eine Fahrzeugkonfiguration festgelegt. Anschließend fährt GT Suite das vorgegebene Fahrprofil mit einem synthetischen Fahrzeug der ausgewählten Konfiguration ab und modelliert dabei die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Komponenten bzw. Subsystemen des Fahrzeugs, z.B. dem Antriebsstrang (Powertrain), dem Bordnetz (Powernet), sowie thermischen oder hydraulischen Komponenten.

PAVE

Die Ergebnisse aus der Fahrzeugsimulation haben einen ausreichend hohen Detailgrad, um sie zur Auslegung von Fahrzeugkomponenten, wie z.B. dem Antriebsstrang, dem Powernetz, des thermischen Systems oder der Fahrzeugbatterie zu verwenden. Für das P95 Fahrzeug aus unserem Pooling Szenario finden wir einen über den Betriebstag gemittelten Energieverbrauch von 12,96 kWh/100km. Da die tägliche Fahrleistung in unserem Pooling Szenario im Schnitt unter 200km liegt, erscheinen bei durchschnittlichen Batteriegrößen Betriebsstrategien mit einer Batterieladung pro Tag plausibel. Für die in unserer Fahrzeugsimulation verwendete Fahrzeugkonfiguration mit Motorleistung $P_{eng} = 200 \text{ kW}$ und Batteriekapazität 60 kWh, erreicht die Batterie am Ende des Betriebstags z.B. einen Ladezustand von circa 60% (Abbildung 131). Dabei muss allerdings beachtet werden, dass in unserem Poolingszenario kein Rebalancing leerer Flottenfahrzeuge erfolgt. Ein solches Rebalancing ist in der Praxis wünschenswert, um die Verteilung leerer Fahrzeuge der erwarteten Nachfrage künftiger Fahraufträge anzupassen und so kürzere Wartezeiten für die Kunden zu ermöglichen. Dadurch ergeben sich zusätzliche Leerfahrten der Flottenfahrzeuge und somit eine erhöhte tägliche Fahrleistung. Details hängen von den verwendeten Methoden zum Rebalancing und der Nachfragemodellierung ab, aber Fahrleistungen bis zum doppelten des Wertes ohne Rebalancing sind durchaus vorstellbar. Selbst damit sollte eine Betriebsstrategie mit einer Batterieladung pro Tag bei aktuellen Batteriegrößen aber realisierbar sein, wenn die Nachfrage nach on-demand Transportservices nicht signifikant höher ist als in unserem Szenario.

Der Einsatz von AVF-Technologien in autonom vernetzten Fahrzeugflotten führt zu einem gleichmäßigeren Verkehrsfluss und damit weniger ausgeprägten Brems- und Beschleunigungsmanövern. Um diesen Einfluss abzuschätzen, glätten wir die angereicherten Geschwindigkeitsprofile der repräsentativen Flottenfahrzeuge mittels eines Smoothing Splines. Mit den so prozessierten Profilen lassen sich aus der Fahrzeugsimulation veränderte Anforderungen an autonome Fahrzeuge ableiten.

Die Glättung ergibt geringere und seltenere Beschleunigungsänderungen mit Einsparungen beim Energieverbrauch: für das P95 Fahrzeug des Pooling Szenarios ergibt sich für den über einen ganzen Betriebstag gemittelten Energieverbrauch ein Wert von 12,58 kWh/100km. Das bedeutet im Schnitt eine Einsparung von 3% im Vergleich zum nicht vernetzten Fall.

5.8 Fazit, AVF-Potentiale Personenmobilität, Quantitativ (Kap 4.3-4.7)

Das Potential der AVF-Mobilitätsdienste wird in diesem Vorhaben als ein zusätzliches Angebot behandelt, das im Wettbewerb zu den bestehenden Mobilitätsangeboten zu Fuß, Fahrrad, ÖPNV und Pkw einschließlich Mitfahrer steht. Die AVF-Technologie erhöht die Vielfalt und Qualität der Mobilitätsangebote und kann so eine Steigerung der Nachfrage induzieren. Hier gehen wir aber von einer konstanten Nachfrage aus, die Angebote der bisherigen Verkehrsträger bleiben in ihren Leistungen und Kosten bestehen. Die Abschätzung der AVF-Mobilitäts-Nachfrage und ihre verkehrliche Wirkung basiert auf der PAVE-Online-Befragung. Etwa ein Drittel der in PAVE Befragten würde AVF-Dienste nutzen, die voraussichtliche tägliche Nutzungen der AVF-Dienste liegt insgesamt unter 10%, die Nutzungen teilt sich etwa zu gleichen Anteilen auf Robotaxi und Sammeltaxi auf. In dieser Abschätzung gewinnen Robotaxi und Sammeltaxi von allen Mobilitätsanbietern Anteile. Die Verluste des Umweltverbundes führen zu mehr Straßenverkehr, hier in einer Größenordnung von etwa 4%. Die Simulation mit MATSim Open Berlin Szenario ergeben bei Kostendeckung für Ridesharing 12% und für Robotaxi 7% Anteile an allen Wegen. Das ist etwa doppelt so viel wie die oben geäußerte erwartete Nutzung. Der Mehrverkehr würde 11% beim Ridesharing und 6% beim Robotaxi betragen. Auf einem unregulierten Mobilitätsmarkt würden die zusätzlichen AVF-Mobilitätsangebote also nicht zu der erwünschten Verringerung des Straßenverkehrs beitragen können. Ob die Nutzung der Ondemand-Dienste die Abschaffung des eigenen Autos zur Folge hat, ist fraglich. Auch ohne AVF-Dienste ist die

PAVE

Bereitschaft der in PAVE befragten Autofahrer zukünftig auf ein Auto zu verzichten, in der inneren Stadt mit 20% etwa doppelt so hoch wie in der äußeren Stadt. Die gleiche Wirkung hat eine Citymaut, die 22% der Innenstädter zur Abgabe des Autos bringen könnte (9,5% in der äußeren Stadt). Ebenso ist die voraussichtliche Nutzung von AVF-Diensten in der Innenstadt mit 12,5% größer als in der äußeren Stadt mit knapp 8%.

Eine Verringerung des Verkehrs scheint nur mit regulatorischen Maßnahmen möglich, die den ruhenden und fließenden Verkehr treffen. Die unterschiedliche Wirkung einiger Maßnahmen wurde abgeschätzt:

Die Einführung einer Citymaut von 12€ für die innere Stadt („Hundekopf“) würde etwa 30% der befragten Autofahrer abhalten, in die innere Stadt einzufahren (ohne AVF-Angebote). Das Verkehrsaufkommen in der inneren Stadt verringert um etwa 26%, dabei wird angenommen, dass der Binnenverkehr der Innenstädter unverändert bleibt. Durch die Citymaut verliert der MIV in Berlin 3%-Punkte im Modalsplit.

In MATSim wurde das Verbot privater PKWs in der Innenstadt bei gleichzeitigem Einführen eines Substitutionsangebotes in Form eines Pooling Services, der nur im Stadttinneren operiert, simuliert. Damit verringert sich das Fahrzeugaufkommen in ganz Berlin um circa 9% gegenüber dem Ist-Zustand.

Ebenfalls in MATSim wurde eine Distanzmaut in Form einer Verdoppelung und Verdreifachung der variablen Fahrzeugkosten (Basis 0,20€/km, bemaute 0,40 und 0,60€/km) bei gleichzeitiger Verfügbarkeit von Robotaxi und Ridesharing untersucht. Die Einführung einer Distanzmaut in Höhe der variablen PKW-Kosten, also 0,20 €/km, senkt in der Simulation die Fahrleistung um 27,7 % im Vergleich zum Basisfall. Im Falle einer PKW-Distanzmaut von 0,40 €/km senkt sich die Fahrleistung um 46,6 % gegenüber dem Basisfall.

In PAVE wurden Instrumente zur Modellierung und Simulation der Mobilitätsangebote und der Nachfrage modifiziert und entwickelt, mit denen die Potentiale der neuen Angebote Robotaxi und Ridesharing im bestehenden Markt abgeschätzt werden können.

Die Effizienz und Akzeptanz der AVF-Mobilitätsdienste wird geprägt durch den gebotenen Servicelevel. Die Zuverlässigkeit/Planbarkeit der automatisierten On-demand-Dienste kann durch die Einführung von einfachen und komplexeren Puffern verbessert werden. Basierend auf der Integration von Optimierung und Simulation konnte gezeigt werden, dass sinnvoll geplante Puffer einen guten Mittelweg aus Premium-Service für Fahrgäste und Betriebskosten schaffen können. Daher entstehen durch den Einsatz von RoboTaxis neue Möglichkeiten kundenspezifische Serviceoptionen anzubieten, welche die Akzeptanz der Kunden und bei gewissen Premiumkunden die Bereitschaft höhere Preise zu zahlen, fördern wird.

Die strategische Optimierung der Ridesharing-Flotte ergab, dass der kleinste Fahrzeugtyp die kosteneffizienteste Option darstellt. Diesem betriebswirtschaftlichen Vorteil der autonomen Kleinstwagen mit größeren Flotten und höheren Fahrleistungen stehen die Nachteile einer höheren Verkehrsbelastung gegenüber. Die Nachfrage- und Erfüllungssteuerung stellen zentrale Stellschrauben beim operativen Management autonomer Fahrzeugflotten dar. In der Nachfragesteuerung wird über die Auftragsannahme entschieden, die vom Flottenstatus und von der zu antizipierenden zukünftigen Nachfrage abhängig ist. Die Untersuchung zeigt, dass für privatwirtschaftliche AVF-Ride-Sharing-Dienste insbesondere eine gezielte Nachfragesteuerung Potenzial zur Kostenminimierung bietet. Dabei ist das Angebot tendenziell auf kurze Fahrten innerhalb zentraler Gebiete mit hoher Nachfragedichte beschränkt.

PAVE

Neben der Analyse homogener Flotten wurden erste Potentiale heterogener Flotten aufgezeigt, deren Ausschöpfung insbesondere in der dynamischen Tourenplanung jedoch eine Herausforderung für zukünftige Arbeiten darstellt. Eine herausfordernde Aufgabe ist ebenfalls die Modellierung eines integrierten Verkehrssystems, mit dem die Architektur und Abläufe von automatisierten fahrplanbasierten und On Demand-Dienste so optimiert werden, so dass die individuellen Reisezeiten minimiert werden. Bei den jetzigen Arbeiten zeigte sich, dass Rechnerkapazitäten und Leistungen bereits in der Planungsphase an ihre Grenzen kommen. Für einen Echtzeitbetrieb mit dynamischen Optimierungen sind deshalb neue hochleistungsfähige Rechner und Software erforderlich.

Der automatisierte Verkehr wird also nicht per se zu geringerem Verkehr führen. Es wird von den politisch gesetzten Regularien abhängen, den Verkehr verträglich zu gestalten und die Mobilität zu sichern. Dazu können auch die technischen Möglichkeiten der AVF-Systeme zur Verkehrsbeeinflussung genutzt werden.

6. Handlungsempfehlungen

Handlungsempfehlungen aus Kap 4.2.1 Individuelle Mobilität - Mobilitätstypen & Akzeptanz

Die Ergebnisse der Interviews, Fokusgruppen und der abschließenden Befragung haben gezeigt, dass die Probanden sehr unterschiedliche Vorkenntnisse, Grundeinstellungen und Vorurteile bezüglich des autonomen Fahrens besitzen. Um die Akzeptanz von autonomen Fahrzeugen langfristig zu fördern, können differenzierte Strategien, die auf die Bedürfnisse von einzelnen Gruppen gezielt eingehen, einen wichtigen Beitrag hierzu leisten. In diesem Kapitel werden Handlungsempfehlungen beschrieben, die aus den Ergebnissen der PAVE Untersuchung abgeleitet wurden:

- Sicherheit & Vertrauen schaffen
- Zielgruppengerechtes Marketing
- Mensch-Maschine-Kommunikation
- Klare Gesetzeslage
- Integration in den öffentlichen Nahverkehr

Handlungsempfehlungen aus 4.2.2 Wirtschaftsverkehr/ Personenwirtschaftsverkehr

Die Handlungsempfehlungen für Automatisierung im gewerblichen Personenverkehr und in der städtischen Logistik sind Ergebnis der Interviews mit Mobilitätsexperten, Spediteuren und Kurier- und Expressdiensten, Verbänden und der Stadtverwaltung:

- Städtische Ziele und Visionen berücksichtigen
- Autonome Verkehrssysteme als Beitrag zur Verkehrswende
- Potential für Autonome Shuttles und Rufbusse nutzen: Integration in den ÖPNV
- Gesetzliche Grundlagen schaffen
- Kommunikation und Begeisterung
- Potential automatisierte Mitarbeitermobilität
- Potential Immobilienentwicklung
- Befähigung der Gemeinden
- Potential Fahrerarbeitsplatz
- Potential Vorletzte Meile
- Sonderspuren für automatisiertes und autonomes Fahren

Handlungsempfehlungen aus 4.5 Modellrechnung aus verkehrlicher Sicht

- Konzepte zur Sicherung einer angemessenen Mobilität in ländlichen Regionen: Subventionierung, Flächenlizenzen,...
- Maßnahmen und Konzepte zur effizienten Bündelung von Fahrten
- Formulierung operationalisierbarer politischer Ziele zur Bestimmung und Bewertung regulatorischer Maßnahmen zur Sicherung einer nachhaltigen Mobilität und Verringerung des Verkehrs

Förderung weiterer wissenschaftlicher Arbeiten

- Weiterentwicklung der Ansätze zur Modellierung eines Verkehrssystems, dass DRT und fahrplanbasierte Dienste optimal integriert. Berücksichtigung des realen Betriebes in Echtzeit.
- Untersuchung verschiedener Maut- und Pricing Systeme
- Vernetzung aller mobilitätsrelevanter Disziplinen bei Entwurf und Umsetzung neuer Mobilitätsangebote
- Verfügbarkeit oder Zugang zu hochleistungsfähigen Rechnern

7. Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Projektstruktur</i>	3
<i>Abbildung 2: Sensoren für Fahrassistenzsysteme (VDA, 2015)</i>	6
<i>Abbildung 3: Kostenreduzierungen in der Logistik entlang der Supply-Chain (PwC, 2018)</i>	9
<i>Abbildung 4: Straße der Zukunft (The Architect's Newspaper, 2018)</i>	15
<i>Abbildung 5: Das soll 5G leisten (Eigene Darstellung nach (Fraunhofer-Gesellschaft, 2019)</i>	17
<i>Abbildung 6: Innenraum des Mercedes-Benz F 015 Konzeptfahrzeugs (AV) (Daimler, 2015)</i>	21
<i>Abbildung 7: Überblick zu den fahrerlosen Fahrzeugen in der Logistik (DHL Trend Research, 2014)</i>	25
<i>Abbildung 8: Lagerhausabläufe der Zukunft (DHL Trend Research, 2014)</i>	26
<i>Abbildung 9: Outdoor Logistics Operations (DHL Trend Research, 2014)</i>	27
<i>Abbildung 10: AVs in Line Haul Transportation (DHL Trend Research, 2014)</i>	28
<i>Abbildung 11: Typische komplexe Umgebung in der letzten-Meile Zustellung (DHL Trend Research, 2014)</i>	29
<i>Abbildung 12: Trichtermodell (Eigene Darstellung, nach (Gaßner & Kosow, 2008))</i>	36
<i>Abbildung 13: Phasen der Szenario-Techniken (Eigene Darstellung nach (Gaßner & Kosow, 2008))</i>	37
<i>Abbildung 14: Graphische Darstellung der Gliederung der Szenario-Methodik (H.-C. Winter)</i>	38
<i>Abbildung 15: Dimensionen der Umfeldanalyse</i>	40
<i>Abbildung 16: Graphische Auswertung der Bewertungs UI</i>	45
<i>Abbildung 17: UseCase 2.1 AVF im ÖPNV</i>	62
<i>Abbildung 18: UseCase 2.2 RoboTaxi Standard</i>	62
<i>Abbildung 19: UseCase 2.3 RoboTaxi Premium</i>	62
<i>Abbildung 20: UseCase 3.1 RoboVan</i>	63
<i>Abbildung 21: UseCase 3.2 Mobile Packstationen</i>	63
<i>Abbildung 22: UseCase 3.3 Automatisierte Sammler</i>	63
<i>Abbildung 23: UseCase 3.4 Lizenzierte Zustellgebiete</i>	64
<i>Abbildung 24: UseCase 4.1 - RoboTaxi RideSharing</i>	64
<i>Abbildung 25: UseCase 4.2 - AVF im ÖPNV: Linienverkehr</i>	64
<i>Abbildung 26: UseCase 4.3 - Innenstadt ohne privaten PKW</i>	65
<i>Abbildung 27: UseCase 4.4 - Dynamischer Delivery Agent</i>	65
<i>Abbildung 28: UseCase 4.5 - Multi-Use Fahrzeuge</i>	65
<i>Abbildung 29: UseCase 5.1 - RoboTaxi et al</i>	66
<i>Abbildung 30: UseCase 5.2 - private Mobilitätsbörse</i>	66
<i>Abbildung 31: UseCase 5.3 - Schnittstellen & MiniHub</i>	66
<i>Abbildung 32: UseCase 5.4 – Slotmanagement</i>	67
<i>Abbildung 33: UseCase 5.5 - Gesamtsystem / Integration</i>	67
<i>Abbildung 34: UseCase 5.6 – UNIROB</i>	67
<i>Abbildung 35: Vorgehensweise zur Ermittlung der Mobilitätstypen</i>	72
<i>Abbildung 36: Übersicht der hypothetischen Typen nach den Interviews & FPI Auswertung</i>	79
<i>Abbildung 37: Fokusgruppenveranstaltung, BVG SeeMeile Shuttle, Testfahrzeuge</i>	81
<i>Abbildung 38: Beispiel - Agenda einer Fokusgruppenveranstaltung</i>	82
<i>Abbildung 39: Übersicht der sechs hypothetischen Typen nach den Fokusgruppen</i>	88
<i>Abbildung 40: Statistik der Probanden (Angaben in %, Basis alle 1.004 Befragten)</i>	91
<i>Abbildung 41: Verteilung der Mobilitätstypen (Angaben in %, Basis alle 1.004 Befragten)</i>	91
<i>Abbildung 42: Auswertung der Modalgruppen analog MiD 2017</i>	92
<i>Abbildung 43: Steckbrief Mobilitätstyp "Sensation Seeker"</i>	93
<i>Abbildung 44: Steckbrief Mobilitätstyp "Sensation Seeker"</i>	94
<i>Abbildung 45: Steckbrief Mobilitätstyp "Technikaffine Umweltbewusste"</i>	95
<i>Abbildung 46: Steckbrief Mobilitätstyp "Technikaffine Umweltbewusste"</i>	96
<i>Abbildung 47: Steckbrief Mobilitätstyp "Technikskeptische Umweltbewusste"</i>	97
<i>Abbildung 48: Steckbrief Mobilitätstyp "Technikskeptische Umweltbewusste"</i>	98

Abbildung 49: Steckbrief Mobilitätstyp "Preissensitive"	99
Abbildung 50: Steckbrief Mobilitätstyp "Preissensitive"	100
Abbildung 51: Steckbrief Mobilitätstyp "Konservative"	101
Abbildung 52: Steckbrief Mobilitätstyp "Konservative"	102
Abbildung 53: Steckbrief Mobilitätstyp "Liberale"	103
Abbildung 54: Steckbrief Mobilitätstyp "Liberale"	104
Abbildung 55: Affinität zum autonomen Fahren in der Gesamtstichprobe	105
Abbildung 56: Affinität zum autonomen Fahren nach Mobilitätstypen	106
Abbildung 57: Autobesitz nach Mobilitätstyp	106
Abbildung 58: Vorstellung den eigenen PKW in der Zukunft abzugeben nach Mobilitätstypen	107
Abbildung 59: Gründe für die Bereitschaft das eigene Auto abzugeben	107
Abbildung 60: Hauptverkehrsmittel, die im Alltag „gern genutzt werden“	108
Abbildung 61: Zustimmung zu ausgewählten Mobilitätsaussagen	109
Abbildung 62: Bereitschaft der Pkw-Fahrer,	110
Abbildung 63: Zustimmung zu den Aussagesätzen zum autonomen Fahren 1/2	110
Abbildung 64: Zustimmung zu den Aussagesätzen zum autonomen Fahren 2/2	111
Abbildung 65: Selbsteinschätzung der Nutzung von zukünftigen autonomen Taxis	112
Abbildung 66: Selbsteinschätzung der Nutzung von zukünftigen autonomen Sammeltaxis	112
Abbildung 67: Abgrenzung DRT auf individueller Basis und als Sammelverkehr	120
Abbildung 68: Kostenstrukturvergleich mit (Autom.) und ohne (Konv.) Fahrzeugautomation	123
Abbildung 69: Vergleich der Fahrleistungen bei geteilten und ungeteilten Fahrten aus ITF-Studien	135
Abbildung 70: Heutige Pain Points (Fokusgruppen Workshop „Zukünftige Geschäftsmodelle“)	152
Abbildung 71: Bewertung der Use Cases Fokusgruppen Workshop „Zukünftige Geschäftsmodelle“	154
Abbildung 72: On Demand Ride Pooling	157
Abbildung 73: Wichtige Potentiale durch Automatisierung im gewerblichen Personenverkehr	158
Abbildung 74: Wichtige Potentiale durch Automatisierung in der städtischen Logistik	159
Abbildung 75: Empfehlungen	160
Abbildung 76: Modalsplit MIV, ÖPNV, Fahrrad nach Fahrlänge; äußere Stadt, SrV 2013	169
Abbildung 77: Modalsplit MIV, ÖPNV, Fahrrad nach Fahrlänge; innere Stadt, SrV 2013	169
Abbildung 78: Mobilitätsangebote, Übersicht innere Stadt 2018, Preis-Zeit Diagramm	172
Abbildung 79: Mobilitätsangebote MIV, ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß innere Stadt, Preis-Zeit Diagramm	173
Abbildung 80: Mobilitätsangebote MIV, ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß innere Stadt, Preis-Zeit Diagramm	174
Abbildung 81: Mobilitätsangebote MIV, ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß innere Stadt, Preis-Zeit Diagramm	174
Abbildung 82: Mobilitätsangebote MIV, ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß äußer Stadt, Preis-Zeit Diagramm	175
Abbildung 83: Mobilitätsangebote MIV, ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß äussere Stadt, Preis-Zeit Diagramm	176
Abbildung 84: Mobilitätsangebote MIV, ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß äussere Stadt, Preis-Zeit Diagramm	177
Abbildung 85: Mobilitätsangebote MIV, AUTOMATISIERTER ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß	178
Abbildung 86: Nutzungshäufigkeit Pkw, innere und äußere Stadt	183
Abbildung 87: Citymaut, Verhaltensänderungen innere und äußere Stadt	184
Abbildung 88: Citymaut, Änderung der täglichen Nutzung, innere und äußere Stadt	184
Abbildung 89: Ridesharing, Nachfragefunktion [MATSim Daten]	188
Abbildung 90: Ridesharing, durchschnittliche Fahrlänge und Fahrtpreis [MATSim Daten]	188
Abbildung 91: Ridesharing, Erlös- und Kostenfunktion [MATSim Daten]	189
Abbildung 92: Ridesharing, Preis-Absatz-Funktion [MATSim Daten]	190
Abbildung 93: Robotaxi, Erlös- und Kostenfunktion [MATSim Daten]	191
Abbildung 94: AVF-Dienste, Veränderung der Verkehrsleistung [MATSim Daten]	191
Abbildung 95: Ridesharing Modalsplit, mit Ridesharing wird der Pkw das dominierende Verkehrsmittel	192
Abbildung 96: Darstellung intervallskalierter quantitativer Szenarien	194
Abbildung 97: QUANTOR® Modell der Tabelle 28	195
Abbildung 98: QUANTOR® Gesamtmodell für Szenarien	197
Abbildung 99: Beispiel für ein Robotaxi. (Quelle: PAVE)	203
Abbildung 100: Beispiel für Pooling Fahrzeuge. (Quelle: PAVE)	204

PAVE

Abbildung 101: Beispiel für ein Dual Use Konzept. (Quelle: PAVE)	204
Abbildung 102: Simulationsflussdiagramm (Quelle: Horni et. al 2016)	207
Abbildung 103: Mittlere Wartezeit je Zone ohne (base) und mit Rebalancing (EVD1).	208
Abbildung 104: Modal Split für Berlin aus der Simulation beider Bedienformen im Wettbewerb.	213
Abbildung 105: Veränderung des Verkehrsaufkommens	214
Abbildung 106: Veränderung des direkten CO ₂ -Ausstoßes durch Fahrzeuge	215
Abbildung 107: Effekte einer PKW-Distanzmaut auf den Modal Split in Berlin.	216
Abbildung 108: Modal Split und Modal Shift im PKW-Verbotsszenario.	217
Abbildung 109: Räumliche Wirkung des PKW-Verbots in der Innenstadt.	218
Abbildung 110: Das urban-zentrierte Szenario	226
Abbildung 111: Das suburban-zentrierte Szenario	227
Abbildung 112: Das urban gestreute Szenario	227
Abbildung 113: Gegenüberstellung der Gesamtkosten pro Paket	230
Abbildung 114: Relative Gesamtkosten pro Paket zur nicht autonomen Belieferung	230
Abbildung 115: Durchschnittskosten pro Fahrtanfrage	236
Abbildung 116: Aufschlüsselung der durchschnittlichen Gesamtkosten	237
Abbildung 117: Vergleich der Durchschnittskosten pro Fahrtanfrage bei homo- und heterogener Flotte	238
Abbildung 118: Vergleich Durchschnittskosten pro Fahrtanfrage bei homo- und heterogenen Flotten	239
Abbildung 119: Annahmeraten bei variierenden Ressourcen-Nachfrage-Verhältnissen	242
Abbildung 120: Dienstqualität nach Fahrtanfrage	243
Abbildung 121: Aus der Verkehrssimulation MATSim abgeleitete Trajektorie und Statusprofil	246
Abbildung 122: Aus MATSim gewonnenes Geschwindigkeitsprofil eines beispielhaften	247
Abbildung 123: Normierte Geschwindigkeits- (links) und Beschleunigungsverteilung (rechts)	248
Abbildung 124: Mit hochaufgelösten Fahrzyklen angereichertes MATSim Geschwindigkeitsprofile	248
Abbildung 125: FKFS Rundkurs	249
Abbildung 126: Geschwindigkeitsverlauf am Kräherwald	250
Abbildung 127: Glättung eines simulierten Geschwindigkeitsprofils und Beschleunigungsverteilung	251
Abbildung 128: Ausgewählte Ergebnisse der Fahrzeugsimulation	252
Abbildung 129: Ausgew. Ergebnisse der Fahrzeugsimulation für ein geglättetes Geschwindigkeitsprofil	253
Abbildung 130: Ausgewählte Performance Indikatoren der dynamischen Transportdienste	255
Abbildung 131: Verteilung der täglich innerhalb des Berliner Stadtgebiets anfallenden Reisedistanzen	256
Abbildung 132: Paarweise Korrelation verschiedener charakteristischer Fahrzeugparameter	257
Abbildung 133: Wie Abbildung 132, aber mit Daten für Szenario I-10af.	258
Abbildung 134: MATSim Status- (oben) und Geschwindigkeitsprofil (Mitte),	260
Abbildung 135: Ausgewählte Ergebnisse der Fahrzeugsimulation mit GT Suite für das P95 Fahrzeug.	261
Abbildung 136: Fahrzeugsimulation mit GT Suite: Beschleunigungsverlauf des P95 Fahrzeugs	262
Abbildung 137: Grafische Übersicht unserer Methode zur szenariobasierten Fahrzeugauslegung.	263

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassifizierung der Automatisierung	5
Tabelle 2: Übersicht zu den Kosten von AVs (Eigene Darstellung nach IHK, 2018)	11
Tabelle 3: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von AVs	35
Tabelle 4: Ergebnistabelle zur Bewertung der Faktoren	46
Tabelle 5: Übersicht der Szenariogerüste	56
Tabelle 6: Demand Responsive Transport - Eigentümerstrukturen (eigene Darstellung)	119
Tabelle 7: Beispiele für Automatisierung im Güterverkehr / Lkw	145
Tabelle 8: Beispiele für Automatisierung im Güterverkehr / Kleinroboter	146
Tabelle 9: Beispiele für Automatisierung im Güterverkehr / Lieferfahrzeuge und Paketboxen	148
Tabelle 10: Beispiele für Automatisierung im Güterverkehr / Dual Use-Fahrzeuge	150
Tabelle 11: Bewertungsmatrix Fokusgruppen Workshop „Zukünftige Geschäftsmodelle“	153

PAVE

Tabelle 12: Mobilitätsangebote nach Flexibilität _____	167
Tabelle 13: Personenverkehr, Berlin innerer und äußere Stadt _____	168
Tabelle 14: Ausgewählte Fahrzeuge für Robotaxi, Pkw privat, Ridesharing _____	170
Tabelle 15: Mobilitätsangebote MIV, ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß äußer Stadt, Preis-Zeit Diagramm _____	175
Tabelle 16: Mobilitätsangebote MIV, ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß äussere Stadt, Preis-Zeit Diagramm [SrV 2013], Kosten für Besetzungsgrad 1,3 _____	176
Tabelle 17: Mobilitätsangebote MIV, ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß äussere Stadt, Preis-Zeit Diagramm _____	177
Tabelle 18: Mobilitätsangebote MIV, AUTOMATISIERTER ÖPNV, Fahrrad, zu Fuß _____	178
Tabelle 19: Robotaxi und Ridesharing, Anteil an Modalgruppen und Mobilitätstypen _____	180
Tabelle 20: Modal-Split ohne und mit AVF-Diensten, PAVE _____	180
Tabelle 21: AVF-Nutzungsbereitschaft und tägliche Nutzung nach AVF-affin und avers _____	181
Tabelle 22: AVF-Nutzungsbereitschaft und tägliche Nutzung, weiblich _____	182
Tabelle 23: AVF-Nutzungsbereitschaft und tägliche Nutzung, männlich _____	182
Tabelle 24: AVF-tägliche Nutzung, innere und äußere Stadt, Bereitschaft den eigenen Pkw abzugeben _____	182
Tabelle 25: Citymaut, Änderung Verkehrsaufkommen innere Stadt _____	185
Tabelle 26: Citymaut, Änderung Modal Split _____	186
Tabelle 27: Ridesharing, Optimale Systemauslegungen [MATSim Daten] _____	190
Tabelle 28: Wege-Anteile Berlin nach Hauptverkehrsart und Region [%] _____	194
Tabelle 29: QUANTOR-Berechnung Variante 1 _____	196
Tabelle 30: QUANTOR-Berechnung Variante 2 _____	197
Tabelle 31: Wegeanteile nach AVF gesamt (QUANTOR®-Ergebnis Szenario S0) _____	199
Tabelle 32: Wege-Anteile 2037 nach Verkehrsart (Modal Split) und AVF _____	200
Tabelle 33: Szenario-Vergleich Alter bezüglich AVF-Affinität _____	201
Tabelle 34: Szenario-Vergleich Wege-Anteile bezüglich AVF-Affinität _____	201
Tabelle 35: Zusammenfassung der Ergebnisse aus ausgewählten Simulationsexperimenten _____	212
Tabelle 36: Kostenübersicht automatisierter Gütertransportkonzepte _____	225
Tabelle 37: Ergebnisse herkömmlicher Belieferung _____	228
Tabelle 38: Ergebnisse autonomer Lieferfahrzeuge _____	228
Tabelle 39: Ergebnisse autonomer Lieferroboter _____	229
Tabelle 40: Kostentechnischer Vergleich untersuchter Konzepte im privaten Gütertransport _____	229
Tabelle 41: Einhaltung des Service-Levels von 1-minütigen Zeitfenstern am Zielort der Kunden _____	232
Tabelle 42: Parametrisierung der Fahrzeugtypen _____	235
Tabelle 43: Wahrscheinlichkeit der Passagieranzahl je Fahrtanfrage _____	236
Tabelle 44: Eigenschaften der resultierenden Ride-Sharing-Dienste _____	237
Tabelle 45: Durchschnittliche Anzahl an Fahrzeugen je Typ _____	238
Tabelle 46: Durchschnittskosten pro Anfrage bei homogener Flotten eines On-Demand-Dienstes _____	239
Tabelle 47: Fahrpreise für dynamischen Transportservice und Kosten für konventionellen PKW _____	253
Tabelle 48: Ausgewählte Performance Indikatoren für die Flottennutzung _____	254
Tabelle 49: Ensemblemittelwerte ausgewählter charakteristischer Fahrzeuggrößen der Flottenfahrzeuge _____	258
Tabelle 50: Charakteristische Größen der für P95 repräsentativen Flottenfahrzeuge _____	259
Tabelle 51: Szenarien für einen ridepooling on-demand Transportservice mit unterschiedlichen _____	264
Tabelle 52: Szenarien für einen individuellen on-demand Transportservice mit unterschiedlichen _____	265

PAVE

8. Veröffentlichungen/Referenzen

Digitale Veröffentlichungen

3D Sim. AVF Szenarien: <https://www.youtube.com/embed/IE9us7EoaLc?feature=oembed>

Projekt Webpage: <https://pave-your-way.de/>

Veröffentlichungen des Projekt Teams mit PAVE Bezug

TU Berlin

Paper

Kaddoura, Ihab, and T. Schlenther. The impact of trip density on the fleet size and pooling rate of ride-hailing services: A simulation study. VSP Working Paper 20-36. TU Berlin, Transport Systems Planning and Transport Telematics, 2020. Presented at ABMTrans

Lécureux, Benoit, and Ihab Kaddourab. Sensitivity of the urban transport system to the value of travel time savings for shared autonomous vehicles: A simulation study. VSP Working Paper 20-38. TU Berlin, Transport Systems Planning and Transport Telematics, 2020. Presented at ABMTrans

Schlenther, Tilmann, et al. „Potential of Private Autonomous Vehicles for Parcel Delivery.“ Transportation Research Record 2674.11 (2020): 520-531. Presented at TRB 2020

Paper under review

Schlenther et. al Addressing Spatial Service Provision Equity for Pooled Ride-Hailing Services through Rebalancing

Otto von Guericke Universität (OVGU) Magdeburg

Vorträge

A Fast, Yet Effective Approach at Order Management in Attended Home Deliveries, 02/2019 Forschungsseminar FG Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik, TU Berlin, Germany

A Large Multiple-Neighborhood Search for Request Management in Attended Home Deliveries, 05/2019 FWW-Forschungsseminar, OVGU Magdeburg, Germany

Dynamic Request Management of Transportation Services in Urban Areas, 05/2019 Doktorandenworkshop Nordost, Lutherstadt Wittenberg, Germany

A Large Multiple-Neighborhood Search for Request Management in Attended Home Deliveries, 06/2019 VeRoLog, Sevilla, Spain

An Efficient Insertion Heuristic for On-Demand Ridesharing Services, 09/2019 EWGT, Barcelona, Spain

PAVE

Evaluation of the Potential of Anticipatory Decision-Making in Ride-Sharing Services, 06/2020 Last-Mile Delivery Workshop, Online

Combining Simulation and Optimisation to Design Reliable Transportation Services with Autonomous Fleets, 09/2020 EWGT, Online, Paphos, Cyprus

Potentiale und Herausforderungen von Roboterbasierten Auslieferungen, 10/2020 ORconf, Online

Evaluation of Anticipatory Decision-making in Ride-sharing Services, 11/2020 INFORMS, Online

Potentials and Challenges of Robot-based Deliveries, 01/2021 SystemXSeminar, Online

Paper

J. Haferkamp, J. F. Ehmke (2020): Potential of Anticipatory Decision-Making in Dynamic Fleet Management. In: Proceedings of the TSL Second Triennial Conference

J. Haferkamp, J. F. Ehmke (2020): An Efficient Insertion Heuristic for On-Demand Ridesharing Services. In: Transportation Research Procedia, Volume 47

I. Bakach, A. M. Campbell, J. F. Ehmke (2021): A Two-Tier Urban Delivery Network with Robot-based Deliveries. In: Networks

R. Kötschau, K. Martins-Turner, J. F. Ehmke, K. Nagel (2021): Combining Simulation and Optimisation to Design Reliable Transportation Services with Autonomous Fleets. In: Transportation Research Procedia, Volume 52

Working Paper under review:

J. Haferkamp, J. F. Ehmke: Evaluation of Anticipatory Decision-Making in Ride-Sharing Services. 2020 Mai 4. doi.org/10.24352/UB.OVGU-2020-141 [Titel anhand dieser DOI in Citavi-Projekt übernehmen]

Haferkamp, J., Ehmke, J. Effectiveness of Demand and Fulfillment Control in Dynamic Fleet Management of Ride-Sharing Systems. In: Network Operations, 2021, <https://doi.org/10.1002/net.22062>

RBosch

Vortrag/Paper

H. Triebke, M. Kromer, P. Vortisch. 2020. Pre-study and insights to a sequential MATSim-SUMO tool-coupling to deduce 24h driving profiles for SAEVs. Sumo User Conference 2020, https://sumo.dlr.de/2020/SUMO2020_paper_44.pdf

INA

INA gGmbH, Werkstattbericht - Übersicht zu innovativen Automatischen Fahrzeugen, PAVE Projekt Dokument, 18.11.2020.

PAVE

IAV

Stottele, M., Bericht zur Szenario Entwicklung, 05.08.2019, PAVE Projekt Dokument, IAV

Datenquellen

ADAC, Autodatenbank, <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/autokosten/> [Zugriff am 23.11.2020]

Bevölkerungsprognose Berlin 2030
<https://www.stadtentwicklung.berlin.de/planen/bevoelkerungsprognose/download/2018-2030/Tabellen/> (zugegriffen 4.12.2020)

DeStatis www.DeStatis.de Bevölkerungsvorausberechnung Berlin nach Alter und Geschlecht, Basis 2018 (zugegriffen 4.12.2020)

Mobilität in Deutschland 2017 (MID 2017), Datensatzpakete B1, Eigentümer BMVI, Bezug: clearingstelle-verkehr.de

Mobilität in Deutschland 2017 (MID 2017), Datensatzpaket B3, Eigentümer BMVI, Bezug: clearingstelle-verkehr.de

Mobilität in Deutschland 2008 (MID2008), scientific use file, Eigentümer BMVI, Bezug: clearingstelle-verkehr.de

Mobilitätspanel Deutschland (MOP 20016/20017), Eigentümer BMVI, Bezug: clearingstelle-verkehr.de

Mobilität in Städten – SRV, Berlin 2013/2018, Eigentümer Senat Berlin, Zugang: <https://www.berlin.de/sen/uvk/verkehr/verkehrsdaten/zahlen-und-fakten/>

Referenzen

Agora Verkehrswende, 2020. Die Automatisierung des Automobils und ihre Folgen. Chancen und Risiken selbstfahrender Fahrzeuge für nachhaltige Mobilität. Berlin 08/2020

Amelang, Manfred; Zielinski Werner (1994): Psychologische Diagnostik und Intervention. Springer, Berlin 1994, ISBN 3-540-58084-0.

Amirjamshidi, G., and M. J. Roorda. 2015. Development of simulated driving cycles for light, medium, and heavy duty trucks: Case of the toronto waterfront area. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 34:255 – 266.

Anderson, J. M. et al., 2016. Autonomous Vehicle Technology: A Guide für Policymakers. Santa Monica: RAND Corporation.

ATKINS, 2016. Research on the Impacts of Connected and Autonomous Vehicles (CAVs) on Traffic Flow, Summary Report. s.l.:Department for Transport.

PAVE

Audi, 2017a. Audi MediaTV. [Online] Available at: <https://www.audi-mediacycenter.com/de/audimediatv/video/footage-audi-a8-audi-ai-staupilot-3785>

Audi, 2017b. TechDay piloted driving – Der Staupilot im neuen Audi A8. [Online] Available at: <https://www.audi-mediacycenter.com/de/techday-piloted-driving-der-staupilot-im-neuen-audi-a8-9276>

Autonomous vehicle German exemption certification [Online] available at <https://www.linkedin.com/company/springmobility/> & <https://www.linkedin.com/company/neolix-autonomous-driving> [Zugriff am 23.11.2020]

Axhausen, K., Hörl, S., Becker, F. & Dubernet, T., 2019. Induzierter Verkehr durch autonome Fahrzeuge: Eine Abschätzung. Zürich: Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, ETH Zürich.

Bakach, I., Campbell, A. M., Ehmke, J. F. (2021): A Two-Tier Urban Delivery Network with Robot-based Deliveries. In: Networks. Advance online publication.

Becker, J., 2019. Die Autohersteller haben das Tempo der digitalen Revolution unterschätzt. Sueddeutsche, p. Online.

Berger, R., 2016. Automated Trucks - The next big disruptor in the automotive Industry?. Chicago / München: Roland Berger GmbH.

Bernart, W. & Winterhoff, M., 2016. Autonomous Driving: Disruptive Innovation that Promises to Change the Automotive Industry as We Know It. München: s.n.

Bertoncello, M. & Wee, D., Juni 2015. McKinsey: Ten ways autonomous driving could redefine the automotive world. [Online] Available at: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/ten-ways-autonomous-driving-could-redefine-the-automotive-world> [Zugriff am 9 September 2019].

BGL (2021): Dieselpreis-Information (Großverbraucher) vom 19. Februar 2021. URL: <https://www.bgl-ev.de/images/downloads/dieselpreisinformation.pdf>.

Bierstedt, J. et al., 2014. Effects of nextgeneration vehicles on travel demand and highway capacity. s.l.:White Paper.

Bischoff, J., Maciejewski, M., and Nagel, K. 2017. *City-wide shared taxis: A simulation study in Berlin*. In 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 275–280.

Bischoff, J., Maciejewski, Michal, 2016. Autonomous taxicabs in Berlin – a spatiotemporal analysis of service performance. *Transportation Research Procedia* 19, 176–186. doi:10.1016/j.trpro.2016.12.078.

Bischoff, J. & Maciejewski, M., 2016. Simulation of City-wide Replacement of Private Cars with Autonomous Taxis in Berlin. 83 Hrsg. s.l.:Procedia Computer Science.

Bischoff, Joschka, und Maciejewski, Michal. 2020. Proactive empty vehicle rebalancing for Demand Responsive Transport services. *Procedia Computer Science*, Volume 170, 2020, 739-744

Bitkom, 2019. Achim Berg: *Vernetzte Mobilität* [Online] available at https://www.bitkom.org/sites/default/files/2019-09/bitkom-charts-vernetzte-mobilitat-05-09-2019_final.pdf [Zugriff am 21. Dezember 2020].

PAVE

Bitkom, 2020. Dorothee Bär et al.: *Digitaltag 2020: Gemeinsam digitale Teilhabe fördern* [Online] available at https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-06/prasentation-digitaltag-auftakt-pk-16-06-2020_final.pdf/ [Zugriff am 21. Dezember 2020].

Bonnefon, J.-F., Shariff, A. & Rahwan, I., 2016. The Social Dilemma of Autonomous Vehicles. VOL 352 ISSUE 6293 Hrsg. s.l.:Science.

Bonus, Tabea und Jan Grippenkoven, Alexandra König und Martin Schmettow: *Der tatsächliche Bedarf hinter bedarfsgesteuerten Angeboten: Analyse des Nutzenbeitrags von Eigenschaften des Bedienkonzepts von Mobility-on-demand Systemen*, Conference Paper, Braunschweig 2018.

Bosch, 2016. „Connected Car Effect 2025“, Bosch-Studie zeigt: Mehr Sicherheit, mehr Effizienz, mehr freie Zeit durch vernetzte Mobilität, Pressemitteilung. s.l.:Robert Bosch GmbH.

Brandão, J. (2009): A Deterministic Tabu Search Algorithm for the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem. In: *European Journal of Operational Research*, 195(3), 716–728.

Brownell, C., Kornhauser, A. (2014): A Driverless Alternative: Fleet Size and Cost Requirements for a Statewide Autonomous Taxi Network in New Jersey. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2416(1), 73–81.

Burmeister, G., Engels, S., Hamm, B. & Kraus, A., 2014. Automated Vehicles for a Sustainable City (White Paper). Ann Arbor: University of Michigan.

Burr, Wolfgang und Johann Valentowitsch, Micha Bosler: *Neuartige Kooperationen mit dem Start-up Sektor*. In: Heike Proff und Thomas Martin Fojcik: *Innovative Produkte und Dienstleistungen in der Mobilität, Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte*, Wiesbaden (Springer/Gabler) 2017.

Cacilo, A. et al., 2015. HOCHAUTOMATISIERTES FAHREN AUF AUTOBAHNEN – INDUSTRIEPOLITISCHE SCHLUSSFOLGERUNGEN. s.l.:Fraunhofer IAO.

Chen, T. D., 2015. Management of a Shared, Autonomous, Electric Vehicle Fleet: Vehicle. Austin, Texas: University of Texas.

Christie, D., Koymans, A., Chanrd, T. & Lasgouttes, J.-M. K. V., 2016. Pioneering driverless electric vehicles in Europe: the City Automated Transport System (CATS). 13 (2016) 30 – 39 Hrsg. s.l.:Transportation Research Procedia.

Cleveron, 2018. How Cleveron's robot courier is going to replace the human courier?. [Online] Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=jgBMMspyY0w> [Zugriff am 28 Oktober 2019].

connect, 2017. 5G: Logo für LTE-Nachfolger offiziell festgelegt. [Online] Available at: <https://www.connect.de/news/5g-logo-offiziell-lte-nachfolger-3196797.html> [Zugriff am 11 September 2019].

Cunningham, M. L., Ledger, S. A. & Regan, M. A., 2018. A survey of public opinion on automated vehicles in Australia and New Zealand. Brisbane, Queensland, 28th ARRB International Conference (2018).

Cusano, J. & Costonis, M., 2017. Driverless Cars Will Change Auto Insurance. Here's How Insurers Can Adapt. [Online] Available at: <https://hbr.org/2017/12/driverless-cars-will-change-auto-insurance-heres-how-insurers-can-adapt> [Zugriff am 24 September 2019].

PAVE

Daimler, 2019c. Automatisiertes Fahren: BMW und Daimler wollen Kräfte bündeln. [Online] Available at: <https://www.daimler.com/innovation/case/autonomous/bmw-daimler-kooperation.html> [Zugriff am 13 September 2019].

Daimler, 2015. Mercedes-Benz F 015 Luxury in Motion: Die Sitzpolster sind mit extrem weichem, fein geprägtem Nappa-Leder in Ice-White bezogen und in eine geschwungene Schale aus hochglanzpoliertem Aluminium eingebettet. [Online] Available at: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/picture.xhtml?oid=7546466&ls=L2RIL2luc3RhbmNIL2tvLnhodG1sP29pZD05OTA0NjI0JnJlbElkPTEwMDEmZnJvbU9pZD05OTA0NjI0JmJvcnRlcuM9dHJlZSZyZXN1bHRJbmcvVHlwZUlzPTE3MiZ2aWV3VHlwZT10aHVtYnMmc29ydERlZmluaXRpb249UFVCTE> [Zugriff am 18 September 2019].

Daimler, 2019a. Daimler Onnovation. [Online] Available at: <https://www.daimler.com/innovation/case/autonomous/rechtlicher-rahmen.html>

Daimler, 2019b. Definition „Autonomes Fahren“. [Online] Available at: <https://www.daimler.com/innovation/autonomes-fahren/special/definition.html>

DeYoung, C. G., Peterson, J. B., & Higgins, D. M. (2002). Higher-order factors of the Big Five predict conformity: Are there neuroses of health? *Personality and Individual Differences*, 33, 533–552

Deloitte, 2019. Urbane Mobilität und autonomes Fahren im Jahr 2035. s.l.:Deloitte.

Deutsche Post DHL Group, 2019. Deutsche Post DHL Group baut Netz der DHL Packstationen bis 2021 deutlich auf rund 7.000 Automaten aus. [Online] Available at: <https://www.dpdhl.com/de/presse/pressemitteilungen/2019/dpdhl-group-baut-netz-der-dhl-packstationen-bis-2021-auf-rund-7000-automaten-aus.html> [Zugriff am 08 Oktober 2019].

DHL Trend Research, 2014. Self-Driving Vehicles in Logistics. Troisdorf: DHL Trend Research.

DHL, 2019. Pakete rund um die Uhr an die Packstation senden lassen. [Online] Available at: <https://www.dhl.de/de/privatkunden/pakete-empfangen/an-einem-abholort-empfangen/packstation-empfang.html> [Zugriff am 08 Oktober 2019].

Dornier, 2017. Autonomes Fahren, Erwartungen an die Zukunft. Berlin: Dornier Consulting International.

Energiezukunft, 2019. *So klimaschädlich ist der Platz im urbanen Verkehr aufgeteilt* [Online] available at <https://www.energiezukunft.eu/mobilitaet/so-klimaschaedlich-ist-der-platz-im-urbanen-verkehr-aufgeteilt/> [Zugriff am 10. November 2020].

Enoch, M. P., 2015. How a rapid modal convergence into a universal automated taxi service could be the future for local passenger transport. 27 (8) 910–924 Hrsg. s.l.:Technology Analysis & Strategic Management.

Fagnant, D. J., Kockelman, M. & Bansal, P., 2015. Operations of Shared Autonomous Vehicle Fleet for Austin, Texas, Market. 2536 Hrsg. s.l.:Transportation Research Record: Journal of the.

Flämig, H., 2015. Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren im Bereich des Gütertransportes. In: M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz & H. Winner, Hrsg. *Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, pp. 377-398.

PAVE

Fragant, D. & Kockelman, K., 2015. Preparing a nation for autonomous vehicles: Opportunities, barriers and policy recommendations. 77 Hrsg. s.l.:Transportation Research Part A Policy and Practice.

Fraunhofer IAO, 2015. Hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen – Industriepolitische Schlussfolgerungen, Management Summary, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. s.l.:s.n.

Fraunhofer IAO, 2019. Autonomes Fahren im Kontext der Stadt von Morgen (AFKOS). s.l.:Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO.

Fraunhofer-Gesellschaft, 2019. Mehr Daten, mehr Tempo, mehr Sicherheit. [Online] Available at: <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/aeltere-artikel/taktiler-internet.html> [Zugriff am 10 September 2019].

Goessling, S. (ohne Jahr), Kostenvergleich Auto-Fahrrad, Deutschland: Berechnungsannahmen, Lund Universität Schweden.

https://www.vivavelo.org/fileadmin/inhalte/user_upload/Goessling_CBA_Auto-Fahrrad_0418.pdf, [Zugriff am 23.03.2021]

GraphHopper (o.J.):GraphHopper Routing Engine. URL: <https://github.com/graphhopper/graphhopper>.

Greenblatt, J. B. & Shaheen, S., 2015. Automated Vehicles, On-Demand Mobility, and Environmental Impacts. 3 Hrsg. s.l.:Springer International Publishing.

Gruel, W. & Standford, J. M., 2016. Assessing the Long-Term Effects of Autonomous Vehicles: a speculative approach. 13 (2016) 18-29 Hrsg. s.l.:Transportation Research Procedia.

Guerra, E., 2016. Planning for Cars That Drive Themselves: Metropolitan Planning Organizations, Regional Transportation Plans, and Autonomous Vehicles. Pennsylvania: Journal of Planning Education and Research.

Gurumurthy, K. M., Kockelman, K. M. (2018): Analyzing the Dynamic Ride-Sharing Potential for Shared Autonomous Vehicle Fleets using Cellphone Data from Orlando, Florida. In: Computers, Environment and Urban Systems, 71, 177–185.

Haferkamp, J., Ehmke, J. F. (2020): An Efficient Insertion Heuristic for On-Demand Ridesharing Services. In: Transportation Research Procedia, Volume 47.

Hatscher, Michael (1999), Das Freiburger Persönlichkeits-Inventar FPI, München, GRIN Verlag, <https://www.grin.com/document/97454>

Heinrichs, D., 2015. Autonomes Fahren und Stadtstruktur. In: M. Maurer, J. Gerdes, B. Lenz & H. Winner, Hrsg. Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, pp. 219-239.

Herger, Mario: *Nuro Lieferroboter vollständig fahrerlos in drei Städten im Einsatz* [Online] available at <https://derletztefuhrerschein.de/2020/10/22/nuro-lieferroboter-vollstaendig-fahrerlos-in-drei-staetten-im-einsatz/>[Zugriff am 23.11.2020]

PAVE

- Hiermann, G., Puchinger, J., Ropke, S., Hartl, R. F. (2016): The Electric Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations. In: European Journal of Operational Research, 252(3), 995–1018.
- Horni, A., K. Nagel, and K. W. Axhausen, editors. 2016. *The multi-agent transport simulation MATSim*. Ubiquity Press, London.
- Hou, Y., E. Wood, E. Burton, and J. Gonder. 2015. *Suitability of synthetic driving profiles from traffic micro-simulation for real-world energy analysis: Preprint*. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 10.
- Hörl, S. (2017): Agent-based Simulation of Autonomous Taxi Services with Dynamic Demand Responses. In: Procedia Computer Science, 109, 899–904.
- <https://logistra.de/news/nfz-fuhrpark-lagerlogistik-intralogistik-city-logistik-udelv-liefert-mit-autonomem-transporter-13954.html>,
- Hussy W., Schreier M., Echterhoff G. (2010) Mixed-Methods-Designs. In: Forschungsmethoden in Psychologie und Sozialwissenschaften für Bachelor. Springer, Berlin, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-95936-6_10
- IHK, 2018. Autonomes Fahren. Köln: s.n.
- Ifo, 2020. Oliver Falck et al. (ifo Institut): *Ifo-Forschungsberichte 115 Verkehrliche Wirkung einer Anti-Stau-Gebühr in München*, München September 2020
- IFH, 2020: Dr. Ralf Deckers et al. (IFH Köln), Corona Consumer Check Vol. 6, November 2020
- imfo, 2016. Autonomous Driving, The Impact of Vehicle Automation on Mobility Behaviour. München: Institute for Mobility Research.
- INFRAS, 2019. Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs 4.1. Technical Report. INFRAS Zurich Switzerland. UR: www.hbefa.net. see<http://www.hbefa.net>.
- ITF, 2015. Urban Mobility System Upgrade: How shared self-driving cars could change city traffic. Paris: International Transport Forum.
- ITF, 2017. Managing the Transition of Driverless Road - Freight Transport. Paris: OECD - International Transport Forum.
- IZT, 2020. Rammler, Stefan: Positionspapier für eine Enkeltaugliche Mobilität. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung et al. (Arbeitskreis „Ethik der Mobilität“), Frankfurt/Berlin September 2020.
- Jabali, O., Leus, R., Woensel, van, T., & Kok, de, A. G. (2015). Self-imposed time windows in vehicle routing. OR Spektrum, 37(2), 331-352.
- Kaddoura, Ihab, Ewert, Ricardo, Martins-Turner, Kai 2021. Exhaust and non-exhaust emissions from today's and future roadtransport: A simulation-based quantification for Berlin. Submitted to Proceedings of the 24th meeting of the Euro Working Group on Transportation 2021, 08-10 Sept. 2021. VSP Working Paper 21-14.

PAVE

Kaddoura, Ihab, Leich, Gregor, Nagel, Kai, 2020a. The impact of pricing and service area design on the modal shift towards demand responsive transit. *Procedia Computer Science* 170, 807–812. doi:10.1016/j.procs.2020.03.152

Kaddoura, Ihab, Leich, Gregor, Neumann, Andreas, Nagel, Kai, 2020b. A Simulation-based Heuristic to Improve Demand Responsive Transit Services. Preprint. VSP-Working Paper 20-14.

Kaddoura, Ihab, Schlenther, Tilmann 2020c. The impact of trip density on the fleet size and pooling rate of ride-hailing services: A simulation study. *Procedia Computer Science*. Vol 184: 674-679. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.03.084>

Kabbaj, W., 2016. What a driverless world could look like. [Online] Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=OILFK8oSNEM&list=RDQMIUBdizpTyus&index=3> [Zugriff am 17 September 2019].

Kiwibot, 2020: Kirsten Korosec: *Kiwibot delivery robots head to San Jose with new partners Shopify and Ordermark* [Online] available at <https://techcrunch.com/2020/07/21/kiwibot-delivery-robots-head-to-san-jose-with-new-partners-shopify-and-ordermark/> [Zugriff am 23.11.2020]

Köhler, C., Ehmke, J. F., Campbell, A. M. (2020): Flexible Time Window Management for Attended Home Deliveries. In: *Omega*, Volume 91.

Kötschau, R., Martins-Turner, K., Ehmke, J. F., Nagel, K. (2021): Combining Simulation and Optimisation to Design Reliable Transportation Services with Autonomous Fleets. In: *Transportation Research Procedia*, Volume 52.

Kyle Wiggers, *Nuro's R2 receives first autonomous vehicle exemption from the U.S. Department of Transportation* [Online] available at <https://venturebeat.com/2020/02/06/nuros-r2-is-the-first-to-receive-an-autonomous-vehicle-exemption-from-the-u-s-department-of-transportation/> [Zugriff am 23.11.2020]

Lamotte, R., de Palma, A. & Geroliminis, N., 2016. Sharing the road: the economics of autonomous vehicles. hal-01281425 Hrsg. s.l.:HAL.

Larco, N., 2018. How Will Autonomous Vehicles Transform Our Cities? @TEDx Talks. [Online] Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=tTOFMwKEg7o> [Zugriff am 12 September 2019].

Lastauto Omnibus-Katalog 2018 (1. Auflage) (2017): Stuttgart, Motorbuch.

Lemmer, K., 2016. acatech Studie Neue autoMobilität: Automatisierter Straßenverkehr der Zukunft. München: Herbert Utz Verlag GmbH.

Litman, T., 2019. *Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning*. Victoria: Victoria Transport Policy Institute.

Liu, J., K. Kockelman, and A. Nichols. 2018. *Anticipating the emissions impacts of smoother driving by connected and autonomous vehicles, using the MOVES model*. Presented at the 95th Annual Meeting of the Transportation Research Board and published in *Smart Transport for Cities & Nations: The Rise of Self-Driving & Connected Vehicles*, page 1-3, ISBN 9780692121504

Lopez, P. A., M. Behrisch, L. Bieker-Walz, J. Erdmann, Y.-P. Flötteröd, R. Hilbrich, L. Lücken, J. Rummel, P. Wagner, and E. Wießner. 2018. *Microscopic traffic simulation using SUMO*. In *The 21st IEEE IC on Intelligent Transportation Systems*, pages 2575–2582.

PAVE

Lu, Chengli, Maciejewski, Michal, Nagel, Kai, 2021. Effective Operation of Demand-Responsive Transport (DRT): Implementation and Evaluation of Various Rebalancing Strategies. Submitted to ITS World Congress 2021. VSP-Working Paper 21-06.

Lutz, 2019. *Auf die Regeln kommt es an: Ein Interview über die rechtlichen Fragen zu selbstfahrenden Autos*, Interview mit Dr. jur. Lennart Lutz November 2019 [Online] available at <https://1e9.community/t/auf-die-regeln-kommt-es-an-ein-interview-ueber-die-rechtlichen-fragen-zu-selbstfahrenden-autos/2555> [Zugriff am 10. Oktober 2020].

Maciejewski, Michal, Bischoff, Joschka, Nagel, Kai 2016. *An assignment-based approach to efficient real-time city-scale taxi dis-patching*. *IEEE Intelligent Systems* 31(1): 68–77.
<https://doi.org/10.1109/MIS.2016.2>

Mallig, N., M. Kagerbauer, and P. Vortisch. 2013. *mobiTopp – a modular agent-based travel demand modelling framework*. *Procedia Computer Science*, 19:854 – 859.

Maunsell, L., Tanguturi, P. & Hogarth, J., 2014. Realising the benefits of autonomous vehicles in Australia. s.l.:Accenture.

McKinsey, 2016. Parcel delivery - The future of last mile, Travel,. s.l.:s.n.

MEGAFON, 2016. Markus Friedrich, Maximilian Hartl, M. Sc. Universität Stuttgart Institut für Straßen-und Verkehrswesen (2016): *MEGAFON - Modellergebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des oeffentlichen Nahverkehrs*. Stuttgart Dezember 2016

Mehlert, Christian (KCW GmbH): 2018. *Ridepooling: Hype oder Disruption?* VVO-Fachtagung, Radebeul, 24. Mai 2018.

Mehlert, Christian (KCW GmbH): 2019. *Geschichte und Marktübersicht zu fahrplanfreien Mobilitätsangeboten*, Göttingen 2019.

Mehlmann, O. (1993): Ein aktives computergestütztes Medium zur verteilten Planung im Unternehmen, Dissertationsschrift im Fachbereich Informatik der TU Berlin, 1993

Michael Förtsch: Das Coronavirus lässt die Nachfrage nach selbstfahrenden Autos steigen [Online] available at <https://1e9.community/t/das-coronavirus-laesst-die-nachfrage-nach-selbstfahrenden-autos-steigen/3966/>[Zugriff am 23.11.2020]

Milakis, D., van Armen, B. & van Wee, B., 2017. Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research. Vol. 21, No. 4 Hrsg. s.l.:Journal of Intelligent Transportation Systems.

Mobilität in Städten 2018 [Online] available at <https://www.berlin.de/sen/uvk/verkehr/verkehrsdaten/zahlen-und-fakten/mobilitaet-in-staedten-srv-2018/> [Zugriff am 09. Oktober 2020].

Mosquet, X. et al., 2015. Revolution in the Driver's Seat. Boston: The Boston Consulting Group.

Müller, R. A. (1991). Kostenplanung mit unscharfen Daten. In A.-W. Scheer (Hrsg.), *Rechnungswesen und EDV* (Seite 365-387). Heidelberg: Physika-Verlag

Müller, R.A. (1995). Intelligent Simulation for Corporate Risk Assessment. Invited Keynote Session Paper presented at the 5th IMACS Symposium "Systems Analysis and Simulation", Berlin, June 26-

PAVE

30. In A. Sydow (Ed.), *Systems Analysis Modelling and Simulation. Proceedings of the IMACS Symposium on Systems Analysis and Simulation* (pp. 55-60). Gordon and Breach Science Publishers SA, Amsterdam B.V.

Narayanan, S., Chaniotakis, E., Antoniou, C. (2020): Shared Autonomous Vehicle Services: A Comprehensive Review. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 111, 255–293.

Neolix, 2020. Steve Plumb: Chinese autonomous vehicle startup makes hospital deliveries [Online] available at <https://www.autobeatonline.com/news/chinese-autonomous-vehicle-startup-makes-hospital-deliveries/> [Zugriff am 23.11.2020]

Neolix's latest solution for UAE Ministry of Health and Prevention [Online] available at <https://www.youtube.com/watch?v=hE91kzZRxxo/> [Zugriff am 23.11.2020]

NFT, 2020. Svenjy Gelowitz: *Modulare Pods. Flexibel durch die Stadt* [Online] available at <https://www.automobil-industrie.vogel.de/modulare-pods-flexibel-durch-die-stadt-a-803627/> [Zugriff am 24.11.2020]

NPM, 2019. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität Arbeitsgruppe 3 „Digitalisierung für den Mobilitätssektor“: *Zweiter Zwischenbericht Handlungsempfehlungen zum autonomen Fahren*. Berlin, Dezember 2019

Nuro, 2020. Auto. Motor. Sport: *Roboterauto mit der Lizenz zum Liefern* [Online] available at <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/mobilitaetsservices/nuro-autonomes-lieferfahrzeug-erhaelt-ausnahmegenehmigung/> [Zugriff am 23.11.2020]

NVP, 2019. Land Berlin, Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz: *Nahverkehrsplan Berlin 2019-2023* Stand: 25. Februar 2019

NYC Taxi and Limousine Commission (o.J.). Trip record data. URL: <https://www1.nyc.gov/site/tlc/about/tlc-trip-record-data.page>.

Planco Consulting GmbH, Intraplan Consult GmbH, TUBS GmbH (2015): Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung: Endbericht für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: FE-PROJEKTNR.: 960974/2011. Essen, Berlin, München, 24. März 2015.

Psaraftis, H. N., Wen, M., Kontovas, C. A. (2016): Dynamic Vehicle Routing Problems: Three Decades and Counting. In: *Networks*, 67(1), 3–31.

PwC, 2015. *The Insurance Monitor: To Be or Not to Be – the Future of Motor*. s.l.:s.n.

PwC, 2017: Dietmar Prümm et al, *Aufbruch auf der letzten Meile. Neue Wege für die städtische Logistik*, Oktober 2017

PwC, 2018. *The era of digitalized trucking - Charting your transformation to a new business model*. Strategy& Hrsg. Germany: PwC Strategy& Germany.

PwC, 2020. Strategy& Part of the PwC-Network: *Digital Auto-Report 2020. Navigating through a post-pandemic world*

Ramboll, 2020: Michael Holzhey et al, *Ergänzende Instrumente zur Finanzierung des Berliner ÖPNV. Machbarkeitsstudie*, Berlin 20. November 2020

PAVE

Reimer, B., 2018. There's more to the safety of driverless cars than AI. [Online] Available at: https://www.youtube.com/watch?v=PnFezqp_2e4 [Zugriff am 24 September 2019].

Ritzinger, U., Puchinger, J., Hartl, R. F. (2016): A Survey on Dynamic and Stochastic Vehicle Routing Problems. In: International Journal of Production Research, 54(1), 215–231.

da Rocha, T. V., A. Can, C. Parzani, B. Jeanneret, R. Trigui, and L. Leclercq. 2013. *Are vehicle trajectories simulated by dynamic traffic models relevant for estimating fuel consumption?* Transportation Research Part D: Transport and Environment, 24:17–26.

Ropke, S., Pisinger, D. (2006): An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows. In: Transportation Science, 40, 455–472.

Rödl&Partner, 2020. Niemann, Jörg und Nicole Biedermann: *Dienstleister für On-Demand-Mobilität, Exemplarischer Vergleich im Kontext strategischer und rechtlicher Anforderungen an Kooperationen*. Hamburg 2020

SAE International, 2014. SAE J3016. s.l.:s.n.

Scherf, 2019. Christian Scherf (m-five) et al.: *Mobilitätsmonitor Mai 2019* [Online] available at <https://www.internationales-verkehrswesen.de/mobilitaetsmonitor-8/> [Zugriff am 30. Oktober 2020].

Schlenther, Tilmann, Leich, Gregor, Maciejewski, Michal, Nagel, Kai. 2021. Addressing Spatial Service Provision Equity for Pooled Ride-Hailing Services through Rebalancing. Submitted to ITS World Congress 2021. VSP-Working Paper 20-35.

Schlenther, Tilmann, Martins-Turner, Kai, Bischoff, Joschka, Nagel, Kai. 2020. Potential of Private Autonomous Vehicles for Parcel Delivery. Transportation Research Record. 2020;2674(11):520-531. doi:10.1177/0361198120949878

Schmid, B. (1979). Simulationsverfahren zur Verarbeitung unscharfer Teilinformationen - Bericht des ORL-Instituts der ETH, Nr. 40. Zürich

Schmid, B. (1985). Zukunftsanalyse durch Auswerten und Verarbeiten von Informationen über komplexe Systeme. In Daimler-Benz AG (Hrsg.), Langfristprognosen – Zahlenspielerei oder Hilfsmittel für die Planung? Referate des 6. Daimler-Benz-Seminars der Forschungsgruppe Berlin vom 15. und 16.11.1984. Report 5 der Schriftenreihe der DBAG. Düsseldorf: VDI-Verlag

Schoeffler, B. & Sivak, M., 2014. A Survey of Public Opinion about Autonomous and Self-Driving Vehicles in the U.S., the U.K. and Australia. UMTRI-2014-21 Hrsg. Ann Arbor, Michigan: The University of Michigan Transportation Research Institute.

Schoettle, B. & Sivak, M., 2015. Potential Impact of Self-Driving Vehicles on Household Vehicle Damnd an Usage. Ann Arbor, Michigan: The University of Michigan Transportation Research Institute .

Schrank, D., Eisele, B. & Lomax, T., 2019. 2019 URBAN MOBILITY REPORT. s.l.:The Texas A&M Transportation Institute.

Self-driving delivery vehicles put into operation in China [Online] available at <https://hsfnotes.com/cav/tag/neolix/> [Zugriff am 23.11.2020]

PAVE

Senat, 2018. Berliner Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen Berlin, 2020. Lebensweltlich orientierte Räume (LOR) in Berlin: Planungsgrundlagen. URL: "

https://www.stadtentwicklung.berlin.de/planen/basisdaten_stadtentwicklung/lor/.

Shanker, R., Jonas, A. & Devitt, S., 2013. Autonomous Cars: Self-Driving the New Auto Industry Paradigm, Blue Paper. New York City: Morgan Stanley.

Sharda, R., Golden, B., Raghavan, S., Voß, S., Wasil, E. (2008): The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges. In: Operations Research/Computer Science Interfaces: Vol. 43. New York, NY, Heidelberg: Springer.

Silberg, G. et al., 2013. Self-Driving Cars: Are We Ready?. [Online] Available at:

<https://home.kpmg/content/dam/kpmg/pdf/2013/10/self-driving-cars-are-we-ready.pdf> [Zugriff am 12 September 2019].

Smith, B. W., 2013. Proximity-Driven Liability. Vol. 102 Hrsg. s.l.:Georgetown Law Journal.

Song, G., L. Yu, and Y. Zhang. 2012. *Applicability of traffic microsimulation models in vehicle emissions estimates*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2270(1):132–141.

Spritmonitor (2020): Mercedes-Benz - Atego - 7,5 tonner, Verbrauch und CO2-Ausstoß. URL:

<https://www.spritmonitor.de/de/detailansicht/720140.html>.

Statista, 2019. Umsätze der wichtigsten Industriebranchen in Deutschland in den Jahren von 2015 bis 2017 (in Milliarden Euro). [Online] Available at:

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/241480/umfrage/umsaetze-der-wichtigsten-industriebranchen-in-deutschland/> [Zugriff am 13 September 2019].

Statistisches Bundesamt, 2018. Wirtschaftsrechnungen - Einkommens- und Verbrauchsstichprobe - Einkommensverteilung in Deutschland. Fachserie 15 Heft 6 - 2013. URL:

https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/Einkommen-Einnahmen-Ausgaben/Publikationen/Downloads-Einkommen/einkommensverteilung-2152606139004.pdf?__blob=publicationFile

Stuttgarter Nachrichten. Werner Ludwig: *Das Auto von übermorgen*, 15.02.2020

Süddeutsche, 2020. Max Hägler: Eine "Anti-Stau-Gebühr" ist der falsche Weg [Online] available at <https://www.sueddeutsche.de/muenchen/muenchen-city-maut-kommentar-1.5031538> [Zugriff am 09. Oktober 2020]

Tagesspiegel, 2020. Tom Kirschbaum (Door2Door): *Autofreie Innenstädte schaffen Transportlücke* [Online] available at <https://background.tagesspiegel.de/mobilitaet/autofreie-innenstaedte-schaffen-transportluecke> [Zugriff am 28. Oktober 2020]

Techncrunch, 2019. <https://techcrunch.com/2019/07/10/udelv-partners-with-heb-on-autonomous-grocery-deliver-pilot/>

The Architect's Newspaper, 2018. What role do architects have in a driverless future?. [Online]

Available at: <https://archpaper.com/2018/04/driverless-future-architects-role> [Zugriff am 11 September 2019].

PAVE

Torrey, F. W. & Murray, D., 2015. An Analysis of the Operational Costs of Trucking: 2015 Update. Arlington, Virginia: American Transport research Institut.

The verge. <https://www.theverge.com/2019/1/8/18173776/udelv-self-driving-delivery-walmart-baidu-ces-2019>;

Thaller, 2018: Heike Flämig, Sandra Lunkeit, Patrick Fieltsch (TUHH), Stephan Müller, Carina Thaller, Gernot Liedtke, Felix Voigtländer (DLR), Cristina Janke (Dronemaster): Automatisiertes und vernetztes Fahren in der Logistik, ATLas, 2018

Toth, P., & Vigo, D. (Eds.) (2002): SIAM monographs on discrete mathematics and applications. The vehicle routing problem. Philadelphia, Pa.: Society for Industrial and Applied Mathematics.

Triebke, H., M. Kromer, P. Vortisch. 2020. *Pre-study and insights to a sequential MATSim-SUMO tool-coupling to deduce 24h driving profiles for SAEVs*. Sumo User Conference 2020, https://sumo.dlr.de/2020/SUMO2020_paper_44.pdf, 18.12.2020

UCS, 2020. Union of Concerned Scientists: *Ride-Hailing is a Problem for the Climate. Here's Why*. [Online] available at <https://www.ucsusa.org/sites/default/files/2020-02/Ride-Hailing%27s-Climate-Risks.pdf> [Zugriff am 12. Oktober 2020]

UDELV, 2020. Chris Albrecht: *UDELV offers its driverless vans to assist with coronavirus efforts* [Online] available at <https://thespoon.tech/udelv-offers-its-driverless-delivery-vans-to-assist-with-coronavirus-efforts/> [Zugriff am 23.11.2020]

U-Shift, 2020. *Modulares, autonomes Fahrzeugkonzept der Zukunft* [Online] available at <https://www.youtube.com/watch?v=ZJtopEtaGeU/> [Zugriff am 24.11.2020]

VCD, 2020. Verkehrsclub Deutschland: *Gute Beispiele. Beispielhafte Mobilitätskonzepte in Wohnquartieren* [Online] available at <https://www.vcd.org/themen/wohnen-und-mobilitaet/gute-beispiele> [Zugriff am 03. November 2020]

VDA, 2015. Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren. Berlin: s.n.

VDI, 2019: VDI-Handlungsempfehlung (12/19): *Automatisiertes und autonomes Fahren*, Düsseldorf Dezember 2019

VDV, 2015: Martin Röhrleef et al.: Positionspapier November 2015: *Zukunftsszenarien autonomer Fahrzeuge - Chancen und Risiken für Verkehrsunternehmen*

VIL, 2017. *ALEES* [Online] available at <https://vil.be/en/project/alees/> & <https://vil.be/en/projecten/> [Zugriff am 02.12.2020]

Vosooghi, R., Puchinger, J., Jankovic, M., Vouillon, A. (2019): Shared Autonomous Vehicle Simulation and Service Design. In: Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 107, 15–33.

Waymo, 2019. Introducing Waymo One. [Online] Available at: <https://waymo.com/>

Wong, Alexander: KFC deploys autonomous 5G ‘food trucks’ in China [Online] available at <https://www.soyacinau.com/2020/11/18/kfc-autonomous-5g-restaurant-on-wheels-china/> [Zugriff am 23.11.2020]

PAVE

Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=W37xtEMI92c>

Zhang, W., Guhathakurta, S., Fang, J. & Zhang, G., 2015. Exploring the impact of shared autonomous vehicles on urban parking demand: An agent-based simulation approach. 19, 34-45 Hrsg. s.l.:Sustainable Cities and Society.

Zieme, Dominik, Kaddoura, Ihab und Nagel, Kai. 2019. The MATSim Open Berlin Scenario: A multimodal agent-based transport simulation scenario based on synthetic demand modeling and open data. *Procedia Computer Science*, Volume 151, 2019, Pages 870-877, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.04.120>.

Ziemke, D., Kaddoura, I., and Nagel, K. 2019. *The MATSim open berlin scenario: A multimodal agent-based transport simulation scenario based on synthetic demand modeling and open data*. *Procedia Computer Science*, 151:870 – 877.

PAVE

9. Anhang

9.1 Fragbogen zur PAVE Onlinebefragung (siehe Kapitel 4.2.1)

Onlinefragebogen Forschungsprojekt PAVE

Mit diesem Fragebogen wurden 1.004 Probanden aus Berlin zu Ihrem täglichen Mobilitätsverhalten und persönlichen Einstellungen zum Verkehr online befragt.

Für die Einhaltung der Datenschutzbestimmungen sind verantwortlich:

INFO GmbH Markt- und Meinungsforschung

Schönholzer Str. 1A

13187 Berlin

<http://www.infogmbh.de>

Dr. Holger Liljeberg (Geschäftsführer)

Axel Melsbach (Datenschutzbeauftragter)

Es bestand eine generelle Antwortpflicht.

Bei den 5er Zustimmungsskalen wurden den Probanden die Zahlen (-2, -1, 0, +1, +2) nicht angezeigt.

1. Einstieg Soziodemographie

1. Bitte geben Sie Ihr Geschlecht an. (QUOTIERUNG)
 - weiblich
 - männlich
 - divers

2. Dürften wir Ihr Alter erfahren? (QUOTIERUNG)
 - Zahleingabe

3. In welchem Bundesland wohnen Sie?
 - Auswahl aus Liste aller Bundesländer (nur Berlin wird akzeptiert)

4. In welchem (ehemaligen) Berliner Bezirk wohnen Sie? (QUOTIERUNG)-
 - Auswahl aus Liste (23 ehemalige Berlin Bezirke)

5. Würden Sie bitte die Postleitzahl Ihrer Wohnung angeben?
 - Zahleingabe

6. Wohnen Sie innerhalb des Berliner S-Bahn Ringes oder außerhalb?
 - Innerhalb des S-Bahn Ringes (Innenstadt)
 - Außerhalb des S-Bahn Ringes (Außenstadt)

7. Welchen höchsten Schulabschluss haben Sie? Welche der folgenden Nennungen trifft am ehesten zu? (QUOTIERUNG)
 - bis zu 8 Klassen
 - 9. Klasse/Hauptschulabschluss
 - 10. Klasse/Mittlere Reife/POS
 - Abitur/Fachabitur

2. Statements zur Mobilität

Die folgenden Aussagen haben wir in vielen Gesprächen mit sehr unterschiedlichen Menschen gehört. Es gibt hier keine richtigen oder falschen Antworten. Bei dieser Untersuchung geht es darum herauszufinden, welche Einstellung Sie persönlich haben.

Bitte geben Sie jeweils an, inwieweit Sie dieser Aussage zustimmen oder nicht zustimmen.

Sie können dabei Ihre Antwort auf einer fünfstufigen Skala auswählen: Stimme überhaupt nicht zu, Stimme eher nicht zu, Weder - noch, Stimme eher zu, Stimme voll und ganz zu

In der Auswertung Werte -2, -1, 0, +1, +2

2.1 Items Preisbereitschaft/Budget

1. Lieber bin ich etwas länger unterwegs, als zu viel Geld auszugeben.
2. Es macht mir Spaß, für meine Fahrten die preisgünstigste Route auszutüfteln.
3. Für meine Mobilität habe ich ein begrenztes finanzielles Budget.
4. Das Verkehrsmittel ist mir eigentlich egal – Hauptsache es ist nicht zu teuer.
5. Es macht mir Spaß, für den geringsten Preis ans Ziel zu kommen.
6. Manchmal verzichte ich lieber auf das Verreisen, als zu viel Geld auszugeben.
7. Ich fahre auch Fahrrad, um Geld zu sparen.

2.2 Items Neugier/Trendsetting

1. Neues probiere ich gern sofort aus.
2. Ich gehöre immer zu den Ersten, die etwas Neues ausprobieren.
3. Für mich ist ein aufregendes Fahrerlebnis wichtig.
4. Öffentliche Verkehrsmittel müssen auf dem neuesten Stand der Technologie sein.
5. Ich erkläre gern anderen neue Trends.
6. Ich bilde mir stets ein eigenes Urteil über neue Technik und Technologien.
7. Der Preis spielt für mich weniger eine Rolle als das positive Erlebnis.

2.3 Items Konservativität

1. Ich warte immer ab, bis sich eine neue Technologie bewährt hat, bevor ich mich darauf einlasse.
2. Bewährtes solle man beibehalten und Neues erst mal von anderen ausprobieren lassen.
3. Ich will mein Auto stets selbst lenken.
4. Ich überlasse keiner Maschine meine Entscheidungen.
5. Ich mag klassische Autos.
6. Es würde mich traurig machen, auf mein Auto zu verzichten.
7. Was man hat, kennt man – was man bekommt, weiß man nicht.

2.4 Items Pragmatismus

1. Ich nutze meistens die Fortbewegungsmittel, die mir am einfachsten zur Verfügung stehen.
2. Über mein Mobilitätsverhalten denke ich eigentlich nicht viel nach.
3. Ich will einfach ohne größeren Aufwand von A nach B kommen.
4. Mir ist es egal, womit ein Auto angetrieben wird – Hauptsache es fährt.
5. Da ich auf den Verkehr sowieso keinen Einfluss habe, passe ich meine Verkehrsmittelwahl an.
6. Mir ist stets der schnellste Weg zum Ziel wichtig.
7. Ich nehme die Dinge so, wie sie kommen.

2.5 Items Revolutionarität

1. Wenn der einzelne Mensch sein Verhalten nicht ändert, muss der Gesetzgeber eben nachhelfen.
2. Für die Rettung der Umwelt ist mir kein Opfer zu groß.
3. Für eine gute Sache kann man auch Einschränkungen in Kauf nehmen.
4. Verbrennungsmotoren sind Klimakiller.
5. Autonom (also ohne Fahrer/in) fahrenden Autos gehört die Zukunft.
6. Wenn alle Autos autonom (also ohne Fahrer/in) fahren, kann der Verkehr viel flüssiger laufen.
7. Digitalisierung wird die Menschheit weiterbringen.

2.6 Items Liberalismus

1. Jeder soll sich so fortbewegen, wie er möchte.
2. Die Entwicklung von Antrieben für Autos muss technologieoffen sein.
3. Ich will niemandem vorschreiben, wie er zu leben hat.
4. Ich respektiere Menschen, die Spaß an verrückten Autos haben.
5. Ich möchte mir von niemandem vorschreiben lassen, wie sich ein guter Bürger privat zu verhalten hat.
6. Welches Auto ich fahre, sollte immer meine Privatsache bleiben.
7. Angst ist immer ein schlechter Ratgeber.

2.7 Allgemeine Mobilität

Jetzt zeigen wir Ihnen ein paar Aussagen zu Ihrem allgemeinen Mobilitätsverhalten. Bitte geben Sie jeweils wieder an, inwieweit Sie diesen Aussagen zustimmen oder nicht zustimmen.

Bitte antworten Sie jeweils wieder auf der fünfer Skala: Stimme überhaupt nicht zu (-2), Stimme eher nicht zu (-1), Weder – noch (0), Stimme eher zu (+1), Stimme voll und ganz zu (+2).

1. Ich gehe im Alltag gerne zu Fuß.
2. Ich fahre im Alltag gerne Fahrrad.
3. Ich fahre im Alltag gerne mit Bus und Bahn.
4. Ich fahre im Alltag gerne Auto.

2.8 Öffentliche Verkehrsmittel

Und was halten Sie von den folgenden Aussagen zu öffentlichen Verkehrsmitteln hier in Berlin (BVG und S-Bahn)? *Bitte antworten Sie jeweils wieder auf der fünfer Skala: Stimme überhaupt nicht zu (-2), Stimme eher nicht zu (-1), Weder – noch (0), Stimme eher zu (+1), Stimme voll und ganz zu (+2).*

1. Öffentliche Verkehrsmittel bieten mir ausreichend Komfort.
2. Ich mag die öffentlichen Verkehrsmittel, da ich während der Fahrt auch andere Dinge tun kann.
3. Mit den öffentlichen Verkehrsmitteln komme ich stressfrei ans Ziel.
4. Im Verkehr der Zukunft sollten die öffentlichen Verkehrsmittel kostenlos sein.
5. Die Zukunft gehört den öffentlichen Verkehrsmitteln.
6. In Bus und Bahn will ich immer einen Sitzplatz haben.
7. Ich finde, wer in öffentlichen Verkehrsmitteln einen Sitzplatz beansprucht, sollte auch mehr dafür zahlen.
8. Mich stört an öffentlichen Verkehrsmitteln, dass es oft sehr voll ist.
9. Die körperliche Nähe zu anderen Menschen in öffentlichen Verkehrsmitteln stört mich.
10. Ich habe in öffentlichen Verkehrsmitteln manchmal Angst um meine Gesundheit.
11. Öffentliche Verkehrsmittel sind in meiner Wohngegend schlecht erreichbar.
12. Ich fahre nicht gern mit den öffentlichen Verkehrsmitteln, weil man so oft warten muss.

2.9 Auto

Und wie ist es mit den folgenden Aussagen zum Thema Auto und Straßenverkehr? *Bitte sagen Sie wieder auf der fünfer Skala: Stimme überhaupt nicht zu (-2), Stimme eher nicht zu (-1), Weder – noch (0), Stimme eher zu (+1), Stimme voll und ganz zu (+2).*

1. Für meine täglich mitzunehmenden Dinge brauche ich unbedingt ein Auto.
2. In Städten sollte generell Tempo 30 gelten.
3. Parkende Autos gehören nicht in den öffentlichen Straßenraum.
4. Das Parken in der Innenstadt ist viel zu teuer.
5. Eine City-Maut für Autofahrer finde ich angemessen.
6. Ich kann mir vorstellen mein Auto abzugeben, wenn es mehr flexible Angebote gibt. (wie z.B. Car Sharing, Leihfahrräder oder Fahrdienste).

2.10 Weitere Mobilitätseinstellungen

Jetzt geht es ganz allgemein um die Mobilität in Städten. Inwieweit stimmen Sie diesen Aussagen zu oder nicht zu? *Stimme überhaupt nicht zu (-2), Stimme eher nicht zu (-1), Weder – noch (0), Stimme eher zu (+1), Stimme voll und ganz zu (+2).*

1. Städte müssen fußgängerfreundlicher werden.
2. Wenn Taxifahren so preiswert wäre, wie Bus und Bahn, würde ich lieber Taxi fahren.
3. Wenn ich schneller ans Ziel komme, würde ich auch öfter das Verkehrsmittel wechseln.
4. Auf meinem Weg zum Ziel hasse ich es umzusteigen.
5. Bei der Verkehrsmittelwahl achte ich auch die Umwelt.
6. Ich finde die Idee Fahrten mit anderen zu teilen, gut. (im Sinne von Fahrgemeinschaften)
7. Ich bin bereit für mehr Komfort auch mehr Geld auszugeben.
8. Ich bin bereit für Zeiteinsparungen mehr Geld auszugeben.

2.11 Autonomes Fahren

Weltweit wird an der Entwicklung von autonomen Fahrzeugen gearbeitet. Autonome Fahrzeuge kommen ohne einen menschlichen Fahrer aus und werden von einem Computer und dessen Sensorik

PAVE

gesteuert. Voraussetzung dabei ist, dass sich diese Fahrzeuge flexibel und sicher im Straßenverkehr bewegen können. Vom autonomen Pkw über Taxi bis zum Bus ist dabei alles vorstellbar.

Wie ist Ihre Meinung zu autonomen Fahrzeugen, wenn es sie heute schon gäbe? *Bitte antworten Sie wieder jeweils mit: Stimme überhaupt nicht zu (-2), Stimme eher nicht zu (-1), Weder – noch (0), Stimme eher zu (+1) oder Stimme voll und ganz zu (+2).*

1. Ich würde die Kontrolle nur ungern an einen Computer in Form eines autonomen Autos abgeben.
2. Ich würde mein Leben nie einem Computer anvertrauen.
3. Wenn es mal autonome Autos gibt, dann möchte ich darin auch Schlafen können.
4. Wenn autonome Fahrzeuge erprobt und zuverlässig sind, hätte ich kein Problem sie zu nutzen.
5. In modernen Autos möchte ich selbst entscheiden, ob es autonom fährt oder ob ich selbst das Steuer übernehme.
6. Bei autonomen Taxis bin ich bereit mehr zu zahlen, wenn ich dafür schneller ans Ziel komme.
7. Ein autonom fahrendes Taxi würde ich nutzen.
8. Ein autonom fahrendes Taxi darf nicht teurer sein als ein Taxi mit Fahrer.
9. Autonome Fahrzeuge können den Straßenverkehr sicherer machen.
10. Ich würde meine Kinder auch allein mit einem autonomen Taxi fahren lassen.
11. Ich halte autonomes Fahren für „Schnick Schnack“.
12. Ich bin bereit für autonome Technologien mehr zu bezahlen.
13. Autonomes Fahren wird sich sowieso nicht etablieren.
14. Ich würde mich in einem autonomen Fahrzeug sicher fühlen.
15. Ich würde auch mit einem autonomen Bus fahren.

2.12 Alternative Antriebe

Wie stehen Sie zu neuen Antriebstechnologien? *Bitte antworten Sie wieder jeweils mit: Stimme überhaupt nicht zu (-2), Stimme eher nicht zu (-1), Weder – noch (0), Stimme eher zu (+1), Stimme voll und ganz zu (+2).*

1. Ich halte Elektroautos für die ideale Technologie der Zukunft.
2. Ich halte Wasserstoffautos für ideale Technologie der Zukunft.
3. Ich würde sofort ein Elektro-Auto fahren, wenn es überall Lademöglichkeiten gäbe.
4. Beim Elektro-Auto muss die Ladezeit so kurz wie bei einem Tankvorgang werden.
5. Elektromobilität ist gut für die Umwelt.

2.13 Corona Pandemie

Wir alle sind betroffen von der anhaltenden Corona-Pandemie. Aus diesem Anlass haben wir auch dazu ein paar Fragen an Sie. *Bitte antworten Sie jeweils wieder auf der fünfer Skala: Stimme überhaupt nicht zu (-2), Stimme eher nicht zu (-1), Weder – noch (0), Stimme eher zu (+1), Stimme voll und ganz zu (+2).*

1. Unter Corona-Hygiene-Regeln fühle ich mich im privaten Pkw wohl.
2. Unter Corona-Hygiene-Regeln fühle ich mich in öffentlichen Verkehrsmitteln wohl.
3. Unter Corona-Hygiene-Regeln fühle ich mich auf dem Fahrrad wohl.
4. Unter Corona-Hygiene-Regeln fühle ich mich im Taxi wohl.
5. Seit dem Beginn der Corona Pandemie bin ich viel mehr zu Fuß unterwegs.
6. Die Einschränkung der Mobilität durch Corona sollte für den Umweltschutz auch nach der Pandemie gelten.
7. Ich halte die Corona-Hygiene-Vorschriften für zu hart.
8. Ich halte die Corona-Hygiene-Vorschriften für zu weich.
9. Corona ist für mich harmlos.
10. Ich habe Angst, mich mit Corona zu infizieren.
11. Ich halte mich stets an alle Corona-Hygiene-Regeln.
12. Wenn die Corona Situation vorbei ist, werde ich die gleichen Verkehrsmittel nutzen wie vor der Pandemie.

3. Mobilitätsausstattung

Sie haben den Großteil der Befragung geschafft! Nun folgen ein paar allgemeine Fragen zu Ihrer Mobilität.

1. Besitzen Sie einen Führerschein?
 - Ja
 - Nein
 - Nein, aber ich habe geplant, in den nächsten Jahren einen Führerschein zu machen.
2. **Besitzen Sie einen Pkw bzw. können Sie einen Pkw in Ihrem Haushalt – ggf. als Mitfahrer nutzen?**
 - **Ja**
 - **Nein**
3. Wie lange benötigen Sie zu Fuß zur nächsten BVG- bzw. S-Bahn Haltestelle von Ihrer Wohnung aus?
 - Weniger als 2 min
 - 2 bis 5 min
 - 5 bis 10 min
 - Mehr als 10 Minuten
 - Weiß ich nicht
4. Welche Fahrkartenart nutzen Sie am häufigsten für Ihre Fahrten mit Bus, Tram, U-Bahn oder S-Bahn hier in Berlin?
 - Einzelfahrschein, Tageskarte, Kurzstrecke, Wochenkarte
 - Monatskarte, Jahreskarte
 - Jobticket, Semesterticket etc. (Firmenabo, Studententicket)
 - Anderes Ticket
 - Ich fahre so gut wie nie mit den öffentlichen Verkehrsmitteln
5. Besitzen Sie ein Smartphone? (Mobiltelefon mit Internetnutzung & Apps)
 - Ja
 - Nein
 - Nein, aber ich möchte mir demnächst ein Smartphone zulegen
6. Wie häufig kaufen Sie im Internet ein?
 - mehrmals pro Woche
 - wöchentlich
 - 1-3 mal pro Monat
 - seltener als monatlich
 - nie bzw. fast nie
7. Sind Sie durch gesundheitliche Probleme in Ihrer Mobilität eingeschränkt?
 - Nein, keine Einschränkung
 - Ja, Gehbehinderung
 - Ja, Sehbehinderung
 - Ja, andere gesundheitliche Erkrankung

PAVE

8. [Filterfrage] Es gibt verschiedene Farben, um mit dem Interview fortzufahren zu können, wählen Sie bitte bei dieser Frage unbedingt die Farbe "rot" aus! Wenn Sie auf eine andere Farbe klicken, wird das Interview an dieser Stelle abgebrochen und Sie können nicht an der Studie teilnehmen!
- - blau
 - - gelb
 - - rot
 - - orange
 - - braun
 - - grün

Fragen 9-15 nur an Pkw Besitzer/Nutzer (nach Item 3.2 = „Ja“)

9. Wo parken Sie Ihre/n Pkw in der Regel bei Ihnen zu Hause? (Mehrfachnennung)
- Öffentlicher Straßenraum mit Parkraumbewirtschaftung
 - Öffentlicher Straßenraum ohne Parkraumbewirtschaftung
 - Fester Stellplatz (Privater Parkplatz, Parkhaus, Garage, Tiefgarage)
 - Sonstiges, unterschiedlich
10. Ich kann mir vorstellen, in Zukunft meinen Pkw abzugeben.
- Ja
 - Ja, vielleicht
 - Nein, eher nicht
 - Nein
 - Ich bin mir nicht sicher
11. Wenn eine Citymaut in der Innenstadt für Pkw-Fahrten von 12 € pro Tag erhoben würde...
- ...würde das nichts an meinen täglichen Autofahrten ändern.
 - ...würde ich auf einige Fahrten in der Innenstadt verzichten.
 - ...würde ich meine Fahrten in der Innenstadt auf ein Minimum reduzieren.
 - ...würde ich es mir überlegen mein Auto abzugeben.
12. Aus welchen Gründen würden Sie am ehesten Ihren Pkw abgeben? (Mehrfachnennung)
- Ich brauche kein Auto und kann meine täglichen Wege gut mit anderen Verkehrsmitteln zurücklegen oder ein CarSharing Auto nutzen.
 - Kosten - Den Unterhalt eines Autos möchte bzw. kann ich mir nicht leisten. Vielleicht kommen bald höhere Parkgebühren oder eine City-Maut.
 - Umwelt - Ohne Auto leiste ich einen Beitrag für eine saubere Umwelt.
 - Stress - Mir ist das Autofahren zu stressig geworden. (z.B. zu viel Verkehr, Stau, Parkplatzsuche)
 - Gesundheitliche Gründe, Altersgründe
 - Aus anderen Gründen
 - Ich möchte auf meinen Pkw nicht verzichten
13. Wie viele Kilometer fahren Sie durchschnittlich im Jahr mit dem Auto?
- unter 5.000 km
 - 5.000 bis unter 10.000 km
 - 10.000 bis unter 20.000 km
 - 20.000 bis unter 50.000 km
 - 50.000 km und mehr
 - Weiß ich nicht

PAVE

14. Schätzen Sie bitte nun wie viele Kilometer Sie davon durchschnittlich pro Jahr im Berliner Stadtgebiet fahren?

- unter 5.000 km
- 5.000 bis unter 10.000 km
- 10.000 bis unter 20.000 km
- 20.000 bis unter 50.000 km
- 50.000 km und mehr
- Weiß ich nicht

15. Inwieweit trifft die folgende Aussage auf Sie zu „Wenn mich ein autonomes Auto sicher und schnell von A nach B bringen kann, würde ich kaum noch selbst fahren.“?

- „trifft gar nicht zu“
- „trifft eher nicht zu“
- „trifft eher zu“
- „trifft genau zu“

Fragen 16-18 nur an Pkw NICHT-Besitzer/Nutzer (nach Item 3.2 = „Nein“)

16. Haben Sie in den nächsten Jahren geplant, sich ein Auto anzuschaffen bzw. einen Dienstwagen nutzen?

- Ja
- Ja, vielleicht
- Nein, eher nicht
- Nein
- Ich bin mir nicht sicher

17. Besaßen Sie früher schon mal ein Auto und haben es abgegeben?

- Ja
- Nein

18. Aus welchen Gründen hat Ihr Haushalt kein Auto (mehr)?

- Ich brauche kein Auto und kann meine täglichen Wege gut mit anderen Verkehrsmitteln zurücklegen oder ein CarSharing Auto nutzen.
- Kosten - Die Anschaffung und der Unterhalt eines Autos möchte bzw. kann ich mir nicht leisten.
- Umwelt - Ohne Auto leiste ich einen Beitrag für eine saubere Umwelt.
- Stress - Mir ist das Autofahren zu stressig geworden. (z.B. zu viel Verkehr, Stau, Parkplatzsuche)
- Gesundheitliche Gründe, Altersgründe
- Aus anderen Gründen

4. Verkehrsmittelnutzung

Welche Verkehrsmittel nutzen Sie? Bitte beziehen Sie sich auf die Zeit vor der Corona-Pandemie.

1. Wie häufig haben Sie die folgenden Verkehrsmittel vor der Corona-Pandemie im Alltag genutzt?

- | | | | | | | |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1. Pkw als Fahrer | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 2. Pkw als Mitfahrer | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 3. Öffentliche Verkehrsmittel | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 4. Fahrrad | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 5. Wege ausschließlich zu Fuß | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 6. Motorrad/Motorroller | ... | | | | | |
| 7. Taxi | | | | | | |
| 8. Fahrdienste OnDemand (App basierte Angebote, z.B. Uber, BerlKönig, CleverShuttle) | | | | | | |
| 9. Car Sharing (z.B. ShareNow, WeShare, Miles Mobility) | | | | | | |
| 10. Leihfahrrad- oder Mietfahrrad (z.B. MoBike, Lidl Bike, Deezer) | | | | | | |
| 11. E-Scooter/E-Moped Sharing (z.B. Emmy, Tier, Coup) | | | | | | |
| 12. Elektro-Tretroller Sharing (z.B. Lime, Tier, Cirq, Bird & Co.) | | | | | | |

- Antwortmöglichkeiten:
 1. täglich bzw. fast täglich
 2. an 1-3 Tagen pro Woche
 3. an 1-3 Tagen pro Monat
 4. seltener als monatlich
 5. nie bzw. fast nie
 6. keine Angabe

2. Es wird in der Zukunft sehr wahrscheinlich autonome Taxis geben, die Sie jederzeit per App buchen können. Wir wollen Ihnen kurz zwei Angebote vorstellen:

„Autonomes Taxi“ – Komfortables selbstfahrendes Fahrzeug mit vier Sitzen, das Sie und Ihre Begleitung exklusiv und direkt zum Zielort bringt. Die Wartezeit beträgt ca. 7 Minuten und der Preis ist im Durchschnitt dreimal so hoch wie eine Fahrt mit einer BVG-Jahreskarte, aber günstiger als das eigene Auto.

„Autonomes Sammeltaxi“ – Dies ist ein selbstfahrender Kleinbus mit 8 Sitzplätzen. Eine Fahrt ist doppelt so teuer wie die BVG, aber günstiger als das autonome (Einzel-)Taxi. Es kann passieren, dass andere Mitfahrer zusteigen oder abgesetzt werden, wodurch sich die Fahrtzeit verlängern könnte.

Bitte stellen sie sich dieses Szenario kurz vor und kreuzen Sie aus dem Bauch heraus an, wie häufig Sie diese neuen Angebote nutzen würden.

- | | | | | | | |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 13. Autonomes Taxi | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| 14. Autonomes Sammeltaxi | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

- Antwortmöglichkeiten:
 1. täglich bzw. fast täglich
 2. an 1-3 Tagen pro Woche
 3. an 1-3 Tagen pro Monat
 4. seltener als monatlich
 5. nie bzw. fast nie

5. Persönlichkeitsmerkmale „Big 5“

Sie haben es fast geschafft! Wir kommen zum vorletzten Teil dieses Fragebogens, in dem wir Sie gern persönlich etwas näher kennenlernen wollen.

Geben Sie bitte aus dem Bauch heraus an, inwiefern die folgenden Aussagen zutreffen.

*Antwortskala: 1 „trifft gar nicht zu“, 2 „trifft eher nicht zu“, 3 „trifft eher zu“, 4 „trifft genau zu“
(Achtung: Hier andere Skala nach Big-5-Persönlichkeitstest)*

Randomisiert

1. Ich fühle mich oft unsicher.	Neurotizismus (N)
2. Ich grübele viel über meine Zukunft nach.	
3. Oft werde ich von meinen Gefühlen hin- und her gerissen.	
4. Ich bin gerne mit anderen Menschen zusammen.	Extraversion (E)
5. Ich bin unternehmungslustig.	
6. Ich bin ein gesprächiger und kommunikativer Mensch.	Gewissenhaftigkeit (C)
7. Meine Aufgaben erledige ich immer sehr genau.	
8. Ich gehe immer planvoll vor.	
9. Ich achte sehr darauf, dass Regeln eingehalten werden.	Offenheit (O)
10. Ich will immer neue Dinge ausprobieren.	
11. Am liebsten ist es mir, wenn alles so bleibt, wie es ist. (-)	„Verträglichkeit“ (A)
12. Ich diskutiere gerne.	
13. Ich achte darauf, immer freundlich zu sein.	
14. Ich würde meine schlechte Laune nie an anderen auslassen.	
15. Ich komme immer gut mit anderen aus, auch wenn sie nicht meiner Meinung sind.	

6. Soziodemographische Angaben

Zum Abschluss haben wir noch ein paar Fragen zur Soziodemographie, um die wissenschaftliche Erhebung abzuschließen. Zur Erinnerung: Alle Ihre Angaben werden anonymisiert und streng vertraulich behandelt.

1. Über welche berufliche Ausbildung/welchen Berufsabschluss verfügen Sie? Sagen Sie bitte, welche der folgenden Nennungen am ehesten zutrifft.
 1. Teilfacharbeiter/in, Anlernberuf
 2. Facharbeiter/innen-Abschluss, Gesellin/Geselle
 3. Meister/innen-Abschluss
 4. Fachschul-/Fachhochschulabschluss
 5. Hochschulabschluss/Universität
 6. Nichts davon bzw. noch nichts davon

2. Welche Tätigkeit üben Sie zurzeit aus? (MiD 2017 HP_TAET_1-8)
 1. Berufstätigkeit Vollzeit (ab 35 Stunden pro Woche)
 2. Berufstätigkeit Teilzeit (unter 35 Stunden pro Woche)
 3. Schüler(in)
 4. Auszubildende(r)
 5. Student(in)
 6. Elternzeit
 7. Hausfrau/Hausmann
 8. Rentner(in)/Pensionär(in)
 9. nicht berufstätig/andere Tätigkeit

3. Falls Voll-/Teilzeit berufstätig, Azubi, Schüler, Student:
Wie groß ist die Entfernung von Ihrer Wohnung zu Ihrem Arbeitsplatz (bzw. Ausbildungsstätte/Schule/Hochschule)?
 1. Weniger als 2 km
 2. 2 bis 5 km
 3. 5 bis 10 km
 4. 10 bis 20 km
 5. Mehr als 20 km
 6. Unterschiedlich - Ich arbeite mobil
 7. Ich arbeite nur von zu Hause
 8. Keine Angabe

4. Falls voll-/teilzeit berufstätig, Azubi, Schüler, Student und Frage 3 ungleich 7):
Haben Sie in Ihrem Beruf oder bei Ihrer Tätigkeit die Möglichkeit von zu Hause zu arbeiten?
 1. Ja
 2. Nein

Fragen 5 und 6 nur an Probanden, die Frage 4 mit „Ja“ beantwortet haben oder Frage 3 = 7

5. Wie viele Tage arbeiteten Sie vor der Corona Pandemie durchschnittlich pro Woche im Home-Office?
 1. 0 Tage pro Woche
 2. 1-2 Tage pro Woche
 3. 3-4 Tage pro Woche
 4. 5 Tage
6. Wie viele Tage arbeiten Sie zurzeit, also während der Corona Pandemie, durchschnittlich pro Woche im Home-Office?
 1. 0 Tage pro Woche
 2. 1-2 Tage pro Woche
 3. 3-4 Tage pro Woche
 4. 5 Tage
7. Wenn Sie einmal alles zusammenrechnen: Wie hoch ist dann etwa das monatliche Nettoeinkommen, das Sie alle zusammen in Ihrem Haushalt haben, nach Abzug von Steuern und Sozialversicherung?
 1. Unter 900€
 2. 900€ bis unter 1500€
 3. 1500€ bis unter 2000€
 4. 2000€ bis unter 2600€
 5. 2600€ bis unter 3000€
 6. 3000€ bis unter 3600€
 7. 3600€ bis unter 4000€
 8. 4000€ bis unter 4600€
 9. 4600€ bis unter 5000€
 10. 5000€ bis unter 5600€
 11. 5600€ bis unter 6000€
 12. 6000€ bis unter 6600€
 13. 6600€ bis unter 7000€
 14. mehr als 7000€
8. Wie viele Personen leben ständig in Ihrem Haushalt?
 1. Anzahl Kinder im Haushalt unter 14 Jahren
 2. Anzahl Jugendliche im Haushalt im Alter von 14 und 15 Jahren
 3. Anzahl Personen im Haushalt ab 16 Jahren und älter

9.2 Auswahl von in Deutschland tätigen DRT (siehe Kapitel 4.2.2)

DRT Mobilität – Die wichtigsten Anbieter, mit Schwerpunkt Deutschland (eigene Darstellung) (INA/InUrban)

<u>Name</u>	<u>Zentrales Geschäftsmodell</u>	<u>Gründung Betriebsaufnahme</u>	<u>Beteiligungen</u>	<u>Wirtschaftskraft</u>	<u>Zielgruppe/ Nutzerkonzept</u>	<u>USP</u>
Didi	TNC, Transportation Network Company) Bedarfsverkehre/ vermittelt Taxis u. Taxi- Dienste mit Privatautos	2012/ China + international (HK, Australien, Taiwan, Japan, Brasilien, Chile, Mexico)	Kapitalgesellschaft, nicht börsennotiert	Marktbewertung 56 Mrd. USD 2018/wichtiger Anteilseigner sind BYD/ Japan Softbank/BAIC	alle/ innerstädtisch/ Stadtrand/ ländlich/ Tür zu Tür	größter Anbieter mit 330 Mio. Kunden 2019
Lyft	TNC (Transportation Network Company)	USA und international (350 Städte)	Tencent booking.com	Marktanteil in China: 90%	Zusatzdienste, preiswertere App für jüngere Zielgruppen	nur USA
Uber	TNC (Transportation Network Company)	2009 gestartet als Limousinen-service	Kapitalgesellschaft, börsennotiert	Kapital 7,64 Mrd. USD Umsatz 11,3 Mrd. USD	alle, auch Mitarbeiter-, Spezialdienste (Schulbusse u.ä.) /Tür zu Tür	international aufgestellt/ hoher Börsen-wert/ unterläuft Arbeitsrecht

PAVE

Reach Now	TNC (Transportation Network Comp.) Intermodale Mobilitätsplattform, Ökosystem für städtische Mobilität	2019 aus Moovel, Drive Now und Car2Go	Kapitalgesellschaft	Fusion der Mobilitätsdienste von Daimler und BMW	Car2Go, DriveNow, MyTaxi, MyShuttle, Park&Charge Now, Moovel, Nextbike	
Door2Door	Systemanbieter für ODS, ÖPNV orientiert, Fokus auf Software & Planung	2012	Private und KfW Bankengruppe, keine Großinvestoren	Keine Großinvestoren/ offen	Anbieter von MaaS und ÖPNV	Auch als Betreiber
ioki	Systemanbieter für ODS (On Demand Shuttleverkehr)	Seit 2018 GmbH (Ausgründung aus DB)	DB örtlich Koop. mit Verkehrsbetrieben	Wird querfinanziert	ÖPNV-Ergänzung Mitarbeitertransport (innerstädtisch), Stadtrand, Kleinstadt/ virtuelle Haltestellen	ioki bietet neben White-Label Lizenzen (ioki App-Design und komplettes ioki-Erscheinungsbild) Co-Branding

PAVE

Wunder Mobility	Systemanbieter für ODS (entwickelt Software für andere Mobilitätsunternehmen als sogenannte White-Label-Lösung)	2014	neutrale Eigentümerstruktur keine Bindung an Konzerne aus dem Mobilitätsbereich, Kooperation u. a. mit Daimler, Audi, Toyota	Neben Großstädten stehen auch Mittel- und Kleinstädte sowie der ländliche Raum und die letzte Meile im Fokus	In Deutschland nur Systemanbieter/International/ Angebote für Mittelstädte und ländl. Raum/ letzte Meile
Clever-shuttle	ODS/ eigenständig	2014/ Leipzig, Kiel, Düsseldorf	Seit 2018 DB Mehrheits-eigner, lokale Partner Madsack	In Stuttgart, HH und FfM 10/2019 eingestellt	Eigener Auftritt/aber kooperations-bereit/ Eigene E-Fzg/ festangestellte Fahrer
MOIA	ODS (On Demand Shuttleverkehr), Eigene Marke als Mobilitätsdienst des VW Konzerns	2016	VW als eigene Sparte	Derzeit großflächig in Hamburg und Hannover, relativ neu am Markt	Neu am Markt
ViaVan	ODS (On Demand Shuttleverkehr), eigene Marke	seit 2017/2018 in EU aktiv	Mercedes Benz und Via (US- Car Sharing) Seit 2020 auch Fiat	Größte Praxi-Erfahrung (seit 2014) aus d. USA	Fleetonomy/Großes Entwickler-team in Israel /zahlreiche

PAVE

				ein, MB Fahrzeugtechnologie		Anwendungs- fälle international
Netliner	ODS (On Demand Shuttleverkehr) vom ÖPNV betrieben	2026 Aachen	ASEAG, Aachener Verkehrsgesellschaft	Als Erweiterung des ÖPNV	Wochentags Pendler, Jüngere am Wochenende. Anbindung suburbaner Gebiete, Ersatz für Linienbus am WE	
Reallabor Schorndorf	ODS/ Ergänzung bzw. Substitution ÖPNV (2 Buslinien wurden am WE ersetzt)	03-12 2018/ Schorndorf	DLR mit Stadt Schorndorf und VVS	Pilotprojekt planmäßig beendet trotz Einsparung Kraftstoffkosten Rund 800 Fahrten/Monat mit 10 Fahrzeugen	Alle (Ältere, Zubringer S-Bahn)/ Stadtgebiet Mittelstadt/ reguläre und virtuelle Haltestellen	
SSB Flex	ODS/Ergänzung bzw. Substitution ÖPNV (Betriebszeiten nur nachts)	Juni 2018/ Stuttgart (gesamtes Stadtgebiet)	Moovel (Daimler) mit SSB	subventioniert als ÖPNV	Technikaffine/Pkw-Nutzer / innerstädtisch/ virtuelle Haltest.	
Chariot	ODS/ eigenständig	2014 eingestellt 01/2019 /	seit 2018 Ford 100%	Eingestellt wegen mangelnder Nachfrage	Pendler	

PAVE

		LA, NY				Mitarbeiterdienste/innerstädtisch, Stadtrand/ Liniendienste
Allygator Shuttle	ODS/Ergänzung ÖPNV	2016 bis 04/2019 Berlin	ADAC & Door2Door	zeitl. begrenztes Pilotprojekt in Berlin mit 25 Fzg als Schaufenster für Door2Door Software	gezielt Nutzer des MIV ansprechen/statt Tür zu Tür virtuelle Haltestellen	
DVG MyBus	ODS/Ergänzung ÖPNV	2014/ Pilotprojekt 2017-Ende 2020/Duisburg	Door2Door Duisburger Verkehrsgesellschaft	Projekt läuft Ende 2020 aus	ÖPNV-Nutzer (Anschluss), 50% junge Leute/innerstädtisch/Stadtrand/ Tür zu Tür	
Isar Tiger und Isar Parkstadt Tiger	ODS/Ergänzung ÖPNV	2018/München	Door2Door Münchner Verkehrsgesellschaft	Wird als ÖPNV subventioniert	Ausgehpublikum am WE, Pendler (Isar Parkstadt)/virtuelle Haltestellen/meist kurze Strecken als Zubringer	

Tabelle Anhang 1: DRT Mobilität – Betrachtete On Demand Dienste (eigene Darstellung)