

Ridepooling in der Modellierung des Gesamtverkehrs

Methodenbericht zur MOIA Begleitforschung



Karlsruhe, Dezember 2021

Impressum

MOIA Begleitforschung

Auftragnehmer

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Institut für Verkehrswesen (IfV)

Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe

www.ifv.kit.edu; info@ifv.kit.edu

im Unterauftrag

Technische Universität München (TUM)

Lehrstuhl für Verkehrstechnik

Arcisstraße 21, 80333 München

www.mos.ed.tum.de/vt.; info.vtk@ed.tum.de

Auftraggeberin

MOIA GmbH

Alexanderufer 5, 10117 Berlin

www.moia.io

Autorinnen und Autoren der Studie

PD Dr. Martin Kagerbauer (KIT)

M.Sc. Nadine Kostorz (KIT)

M.Sc. Gabriel Wilkes (KIT)

Dipl.-Phys. Florian Dandl (TUM)

M.Sc. Roman Engelhardt (TUM)

Dipl.-Ing. Ulrich Glöckl (TUM)

Dr. Eva Fraedrich (MOIA)

M.Sc. Felix Zwick (MOIA)

DOI: 10.5445/IR/1000141282

Danksagung

Wir danken allen Beteiligten für die Unterstützung und die gute Zusammenarbeit bei der Erstellung der Studie. Danken möchten wir insbesondere der Stadt Hamburg und der Behörde für Verkehr und Mobilitätswende.

Das Projektteam dankt Prof. Dr. Peter Vortisch, Dipl.-Ing. Michael Heilig, M.Sc. Tim Wörle, M.Sc. Lukas Barthelmes, M.Sc. Christian Klinkhardt, M.Sc. Lars Briem, M.Sc. Jelle Kübler, M.Sc. Milan Schmitt, M.Sc. Anna Reiffer, M.Sc. Janna Ulrich und Dr. Tim Hilgert vom Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Verkehrswesen; sowie Prof. Dr. Klaus Bogenberger von der Technischen Universität München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik.

Kurzfassung

Dieser Bericht erläutert das methodische Vorgehen bei der MOIA Begleitforschung und präsentiert ausgewählte Ergebnisse. MOIA ist ein Ridepooling-Anbieter, der seit 2019 seinen Dienst in Hamburg und Hannover betreibt. Die vierjährige Betriebsgenehmigung in Hamburg erfolgte 2019 im Rahmen der „Experimentierklausel“ des PBefG¹. Teil der Betriebsgenehmigung war eine Evaluation der verkehrlichen Wirkungen des neuen Angebots auf das städtische Verkehrssystem. Aus dieser formalen Anforderung entstand die MOIA Begleitforschung, die erste evidenzbasierte Langzeitstudie zu den verkehrlichen Wirkungen von Ridepooling.

Das Institut für Verkehrswesen des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) untersuchte in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Verkehrstechnik der Technischen Universität München im Zeitraum von Juni 2019 bis Oktober 2021 am Beispiel der Stadt Hamburg die gesamtverkehrlichen Wirkungen des Ridepooling-Dienstes MOIA und die Eigenschaften der Nutzenden.

Aufgrund der Neuheit dieses Dienstes stand zunächst die Schaffung einer umfassenden Datenbasis der Nutzenden von Ridepooling im Vordergrund. Hierfür wurde zunächst eine Onlinebefragung konzipiert und im Dezember 2019 durchgeführt. Neben Fragen zur Soziodemographie, zu Einstellungen zu verschiedenen Verkehrsmitteln sowie deren Nutzungshäufigkeiten im Alltag und zur letzten Fahrt mit MOIA, beantworteten die Befragten ein Verkehrsmittelwahlexperiment, das diverse bedarfsgerechte, geteilte Angebote beinhaltete (neben MOIA-Ridepooling auch Car-, Bike- und E-Scootersharing). Ergänzend dazu wurde im Dezember 2020 eine Interviewstudie mit MOIA-Nutzenden durchgeführt, um die Motive der

¹ Durch die Novellierung des PBefG 2021 hat sich die Rechtsgrundlage geändert.

Nutzung, die Integration des Dienstes in den Alltag sowie die Wahrnehmung im sozialen Umfeld besser zu verstehen.

Es zeigte sich, dass MOIA-Nutzende eine sehr heterogene Gruppe sind. In Hamburg nutzen Männer und Frauen den Dienst nahezu gleichermaßen. Auch die Bandbreite des Alters ist groß, die größte Altersgruppe bilden zwar Personen zwischen 30 und 39 Jahren, aber ein Viertel der MOIA-Kundschaft ist über 50 Jahre alt. Gemein haben die Nutzenden, dass sie überwiegend berufstätig sind und im Alltag multimodal sind, drei von vier nutzen mindestens zwei verschiedene Verkehrsmittel pro Woche. Dies zeigt sich auch in der hohen Verfügbarkeit verschiedener Mobilitätswerkzeuge (Pkw-Besitz, ÖV-Zeitkartenbesitz, Mitgliedschaft bei Mobilitätsanbietern etc.).

Das Herzstück des Projektes bildet das speziell für die Begleitforschung entwickelte Verkehrsmodell, das erlaubt, die Effekte von Ridepooling auf das Hamburger Verkehrssystem in hohem Detaillierungsgrad zu untersuchen. Hierfür wurde das mikroskopische, agentenbasierte Verkehrsnachfragemodell mobiTopp mit dem Flottensimulationsmodell FleetPy gekoppelt. mobiTopp bildet die Mobilität der gesamten Bevölkerung von Hamburg und dem Umland sowie der geschäftlich und touristisch Reisenden im Verlauf einer Woche ab. Hierfür wird zunächst eine synthetische Bevölkerung generiert, die in Bezug auf Haushaltsgröße, Alter, Geschlecht, Pkw-Besitz dieselben Eigenschaften hat, wie die Bevölkerung des Untersuchungsraums in der Realität. Jeder Agent erhält zudem einen Aktivitätenplan, dem er im Laufe der Woche nachgeht. Die Ortswechsel zwischen den Aktivitäten sind die Wege im Modell. Für jeden Weg wählen die Agenten ein Ziel und ein Verkehrsmittel. Hierbei stehen grundsätzlich folgende Verkehrsmittel zur Verfügung:

- Zu Fuß gehen
- Pkw als FahrerIn/Fahrer
- Öffentliche Verkehrsmittel
- Bike- und E-Scootersharing
- MOIA-Ridepooling
- Fahrrad
- Pkw als MitfahrerIn/Mitfahrer
- Taxi
- Carsharing (stationsbasiert und free floating)

Die individuelle Verkehrsmittelverfügbarkeit jeder Entscheidung eines Agenten hängt von der aktuellen Situation sowie den persönlichen Mobilitätswerkzeugen ab. Während die Daten für alle anderen Verkehrsmittel in mobiTopp simuliert werden, kommen die Daten zu Fahrten mit MOIA von der Flottensimulation. Ein Agent stellt, wenn MOIA zur Verfügung steht, eine Buchungsanfrage. Daraufhin stellt FleetPy Informationen zur Abholung, Fahrtdauer und dem Fahrpreis zur Verfügung. Diese Informationen berücksichtigt der Agent dann bei der Verkehrsmittelwahl. Kommt es zu einer Buchung von MOIA, ordnet FleetPy anschließend Fahrtwünsche MOIA-Fahrzeugen zu. Auch die Fahrzeugverfügbarkeit aufgrund der Schichtplanung, Ladeprozesse der Fahrzeuge und Routenplanung inkl. Repositionierung im Bediengebiet sind Teil des Flottensimulationsmodells. Somit wird sowohl die Angebots- als auch die Nachfrageseite im Verkehrsmodell detailliert modelliert. Dies ist insbesondere bei Ridepooling wichtig, da die Eigenschaften der Fahrt eines Fahrgasts stark vom aktuellen Zustand der Fahrzeugflotte sowie der sonstigen Nachfrage abhängen. Wollen zu viele Kundinnen und Kunden Ridepooling nutzen, sinkt die Verfügbarkeit von Fahrzeugen und Anfragen müssen abgelehnt werden. Nutzen wenige den Dienst, ist wenig Pooling möglich und die Fahrgäste werden vorwiegend auf direktem Weg ans Ziel gebracht.

Das Verkehrsmodell wurde mit von MOIA bereitgestellten Betriebsdaten sowie unter Verwendung zahlreicher anderer Datenquellen für den Status quo (ca. Ende 2019) kalibriert. Im Zuge der Simulationsstudie wurden verschiedene Szenarien simuliert. Sie beinhalten die Weiterentwicklung des Ridepooling-Dienstes MOIA, wie beispielsweise die Vergrößerung der Flotte und Bediengebiete sowie Automatisierung. Auch die Veränderungen der Verkehrsangebote und mögliche künftige Entwicklungen, wie beispielsweise der Ausbau von ÖV und Velorouten, aber auch regulatorische Maßnahmen im MIV sind enthalten.

Die Ergebnisse zeigen, dass Ridepooling eine sehr gute Ergänzung zum ÖV darstellt, v. a. in Gebieten und zu Zeiten mit geringem ÖV-Angebot. Je mehr Alternativen zum privaten Pkw geschaffen werden und je mehr

regulatorische Maßnahmen im MIV ergriffen werden, desto nachhaltiger ist das Verkehrssystem und desto höher ist der Anteil der Verkehrsmittel des Umweltverbundes inklusive Ridepooling.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	ii
Kurzfassung	i
Inhaltsverzeichnis.....	v
Abbildungsverzeichnis.....	vii
Tabellenverzeichnis	ix
Abkürzungsverzeichnis	xi
Was ist MOIA?.....	xiii
1 Die MOIA-Begleitforschung – Projektvorstellung	1
2 Erhebungen der Begleitforschung	3
2.1 Onlinebefragung	3
2.2 Interviewstudie.....	10
3 Aufbau der Simulationsstudie	13
3.1 Integriertes Modellframework	13
3.1.1 Mikroskopische Verkehrsnachfragemodellierung mit mobiTopp	13
3.1.2 Kopplung von Verkehrsnachfragemodell und Flottensimulation	21
3.1.3 Flottensimulation mit FleetPy	23
3.2 Case-Study Hamburg	29
3.2.1 Agentenbasiertes Verkehrsnachfragemodell des Ballungsraums Hamburg	29
3.2.2 Simulation des Betriebs von MOIA.....	46
3.3 Szenarien der Simulationsstudie	51
3.3.1 Übersicht über die Simulationen.....	51

3.3.2	Variation des MOIA-Services	52
3.3.3	Ausbau des Verkehrsangebots	56
3.3.4	Regulatorische Maßnahmen im MIV	57
3.4	Mobilitätskenngrößen im Status-quo-Modell	58
4	Ergebnisse der Simulationsstudie	63
4.1	Auswirkungen auf das Verkehrssystem	63
4.2	Veränderung der auf MOIA bezogenen Kennzahlen	69
5	Diskussion und Fazit	75
	Literaturverzeichnis	79

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	MOIA-Fahrzeug auf der Straße und Innenraum.....	xiii
Abbildung 2	Aufbau der MOIA Begleitforschung	1
Abbildung 3	Inhaltlicher Aufbau der Onlinebefragung	5
Abbildung 4	Verkehrsmittel im Verkehrsmittelwahlexperiment	7
Abbildung 5	Beispielhafte Auswahl-situation im Verkehrsmittelwahlexperiment der Onlinebefragung	8
Abbildung 6	Struktur der mobiTopp-Modellteile	14
Abbildung 7	Ablaufplan der Kopplung zwischen mobiTopp und FleetPy.....	23
Abbildung 8	Datenfluss in mobiTopp	30
Abbildung 9	Modellraum.....	31
Abbildung 10	Anteile der Altersgruppen je Haushaltsgröße (Bevölkerung Stadt Hamburg)	32
Abbildung 11	Verteilung und Anzahl der Aktivitäten nach Beschäftigung (Bevölkerung Stadt Hamburg)	33
Abbildung 12	Ganglinien der Aktivitäten (Vergleich zwischen Modell und Erhebung).....	33
Abbildung 13	Modellierte Mobilitätswerkzeuge und Mitgliedschaften..	34
Abbildung 14	Pkw-Verkehrsnetz	37
Abbildung 15	Haltestellen (Haltepunkte) im ÖV-Netz.....	38
Abbildung 16	Ausschnitt Rad- und Fußnetz	38
Abbildung 17	Angebote der Mobilitätsdienstleistungen	39
Abbildung 18	Erzeugung der Attraktivitäten auf Basis von POI am Beispiel des Wegezwecks Einkaufen täglicher Bedarf	41

Abbildung 19	Im Modell integrierte Verkehrsmittel	42
Abbildung 20	Neststruktur des Verkehrsmittelwahlmodells	43
Abbildung 21	Bediengebiet, Zonen, Zusteigepunkte und Depots für den simulierten MOIA-Betrieb im Status quo (ca. Ende 2019)	48
Abbildung 22	Anteil aktiver Flottenfahrzeuge im Wochenverlauf	49
Abbildung 23	MOIA-Bediengebiet BG-2	53
Abbildung 24	MOIA-Bediengebiet BG-3	54
Abbildung 25	Weglängen nach Agententyp	59
Abbildung 26	Weglängen nach Beschäftigungsstatus	59
Abbildung 27	Verkehrsmittelnutzung nach Wegezwecken in SimA im Vergleich zu MiD 2017 (jeweils bezogen auf Hamburger Bevölkerung)	60
Abbildung 28	Vergleich der Tagesganglinie der MOIA-Nutzenden von Simulation und Realdaten des Samstags	62
Abbildung 29	Zeitliche Entwicklung der Besetzungszustände der Flottenfahrzeuge des Samstags für verschiedene Szenarien	72
Abbildung 30	MOIA-Fahrtlängenverteilung verschiedener Szenarien	74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Personen- und Haushaltseigenschaften.....	16
Tabelle 2	Mobilitätswerkzeuge und Mitgliedschaften bei Mobilitätsanbietern bei der Hamburger Stadtbevölkerung (gerundet)	36
Tabelle 3	Eingangsdaten für das Verkehrsnachfragemodell (Auswahl)	46
Tabelle 4	Kalibrierte Flottenparameter	50
Tabelle 5	Vergleich zwischen Simulation der Flottensimulation und Realdaten	51
Tabelle 6	Szenarien der Simulationsstudie	52
Tabelle 7	Userbase in den verschiedenen Szenarien.....	56
Tabelle 8	Vergleich der Modell-Ergebnisse mit den Ergebnissen der Online-Befragung	61
Tabelle 9	Wegebezogener Modal Split (Binnenverkehr)	64
Tabelle 10	MOIA- und Pkw-Fahrleistung, Emissionen (Werte je Simulationswoche)	67
Tabelle 11	Anteile monomodaler Pkw-Nutzender der Hamburger Bevölkerung über 18 Jahren	68
Tabelle 12	Nutzung von MOIA in den Szenarien	70

Abkürzungsverzeichnis

BG	Bediengebiet (entspricht dem Gebiet, in dem MOIA verfügbar ist)
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BVM	Behörde für Verkehr und Mobilitätswende
BWVI	Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Innovation
GTFS	General Transit Feed Specification (digitales Austauschformat für Fahrpläne)
HVV	Hamburger Verkehrsverbund
IfV	Institut für Verkehrswesen (KIT)
KBA	Kraftfahrtbundesamt
KI	Künstliche Intelligenz
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KPI	Key Performance Indicator
MiD	Mobilität in Deutschland
MOP	Deutsches Mobilitätspanel
ÖV	Öffentlicher Verkehr (zum Beispiel Bus, Straßenbahn)
PBefG	Personenbeförderungsgesetz
POI	Point of Interest
TUM	Technische Universität München

Was ist MOIA?

MOIA ist ein seit 2016 existierender, deutscher Ridepooling-Anbieter, der seinen Dienst großflächig in Hamburg und Hannover betreibt. Mit einer Flotte von insgesamt ca. 500 batterieelektrischen Fahrzeugen ist die Tochtergesellschaft des Volkswagenkonzerns der größte Ridepooling-Anbieter in Europa (Foljanty 2020).

Beim Ridepooling werden Fahrten von Fahrgästen mit ähnlichen Start- und Zielpositionen gebündelt. Fahrgäste buchen ihre Fahrt mit MOIA bei Bedarf (On-Demand) in einer mobilen App. Ein Algorithmus sucht das passende Fahrzeug für die Fahrt aus und optimiert die zu fahrende Route. In der App wird ein Fahrgast im Anschluss an die Buchung zu einem virtuellen Haltepunkt navigiert und dort vom Fahrzeug abgeholt.



Abbildung 1 MOIA-Fahrzeug auf der Straße und Innenraum

Die eigens für Ridepooling konzipierten Fahrzeuge bieten Platz für bis zu sechs Fahrgäste und verfügen über zahlreiche Ausstattungsmerkmale, die eine geteilte Fahrt mit unbekanntem Mitfahrenden möglichst angenehm machen sollen, beispielsweise viel Platz, abgeschirmte Sitze, USB-Anschlüsse, WLAN, eine geräumige Gepäckablage und einen Bildschirm mit den Informationen zur aktuellen Fahrt inkl. der Zwischenhalte.

1 Die MOIA-Begleitforschung – Projektvorstellung

Die Begleitforschung zu MOIA in Hamburg ist die erste umfassende Langzeitstudie zu Ridepooling und analysiert das großflächige und flottenstärkste Ridepooling-Angebot in Europa. Ziel der Untersuchung war, Erkenntnisse zur Nutzung und den Nutzenden des Angebots zu gewinnen sowie gesamtverkehrliche Wirkungen von Ridepooling auf ein städtisches Gesamtverkehrssystem der Zukunft zu analysieren.

Durchgeführt wurde die Begleitforschung vom Institut für Verkehrswesen (IfV) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und dem Lehrstuhl für Verkehrstechnik der Technischen Universität München (TUM) in enger Zusammenarbeit mit MOIA. Im Rahmen des Projekts wurden Erhebungen konzipiert sowie Verkehrsmodelle erstellt, die die Wirkungen von Ridepooling ermitteln und bewerten. Die Projektbestandteile sind in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 2 Aufbau der MOIA Begleitforschung

Mit den im Projekt durchgeführten Erhebungen konnten zum einem die Rahmenbedingungen der Nutzung des Ridepooling-Dienstes und die Charakteristiken der Nutzenden und Nicht-Nutzenden erforscht werden. Zum anderen dienen die erhobenen Daten als Input für das agentenbasierte Verkehrsnachfragemodell mobiTopp, das am KIT-IfV in verschiedenen Projekten entwickelt und in diesem Projekt erweitert und angewendet wurde. Das mobiTopp-Modell bildet sämtliche Mobilitätsentscheidungen der Menschen in Hamburg unter Berücksichtigung der individuell zur Verfügung stehenden Alternativen ab und schafft damit die Basis, um die Wirkungen von neuen Verkehrsangeboten darstellen zu können. Neuartig in diesem Projekt ist die Kopplung des Verkehrsnachfragemodells mobiTopp mit dem an der TUM entwickelten Flottensimulationstool FleetPy, das State-of-the-Art-Flottensteuerungsalgorithmen zur Nachbildung der Ridepooling-Flotte und eine detaillierte Modellierung der Fahrgast-Betreiber-Interaktion umfasst. Somit ist es möglich, Interaktionen zwischen der Ridepooling-Flotte, dem Verkehrssystem und dem Mobilitätsverhalten der Menschen abzubilden. Beide Modelle, mobiTopp und FleetPy, stehen unter Open-Source-Lizenz und sind über GitHub öffentlich zugänglich. Neben der Modellierung des Status quo werden in vier verschiedenen Zukunftsszenarien für Hamburg die Wirkungen von veränderten Rahmenbedingungen dargestellt. Dabei werden unter anderem unterschiedliche Flottengrößen des Ridepooling-Dienstes MOIA, die Automatisierung der Ridepooling-Fahrzeuge oder Angebotsverbesserungen im öffentlichen Verkehr und regulatorische Maßnahmen im Pkw-Verkehr betrachtet.

Dieser Bericht zur MOIA Begleitforschung legt den Fokus auf die Methoden der durchgeführten Arbeiten. Dabei werden die Erhebungen, die Datengrundlagen und Algorithmen der Modelle detailliert dargestellt und die den Szenarien zu Grunde liegenden Annahmen aufgeführt. Abschließend werden die Wirkungen der Szenarien methodisch erläutert. Der Methodenbericht ergänzt den Ergebnisbericht zur MOIA Begleitforschung mit dem Titel „Ridepooling in Hamburg auf dem Weg in die Zukunft“ (Kagerbauer et al. 2021).

2 Erhebungen der Begleitforschung

Ridepooling-Dienste wie MOIA sind ein Novum. Entsprechend wenig Kenntnis hatte man zu Beginn des Projekts über Charakteristika der Nutzenden, das Nutzungsverhalten, die Gründe für die Nutzung und die Bewertung solcher Dienste. Weil sich Kundinnen und Kunden in der MOIA-App lediglich mit ihrer E-Mail-Adresse und den Abrechnungsmodalitäten zur Nutzung des Angebots registrieren, hatte auch der Anbieter wenig Daten zu spezifischen und differenzierten Nutzendenstrukturen.

Das Ziel der ersten Projektphase war somit die Schaffung einer umfassenden Datenbasis zu den MOIA-Nutzenden, um diese anschließend detailliert zu untersuchen und im Modell weiterzuverarbeiten. Hierfür wurde ein Mixed-Method-Ansatz gewählt. Dieser basiert auf der Kombination einer Onlinebefragung (quantitativ) und einer Interviewstudie (qualitativ). Aufgrund der Neuheit des Dienstes und fehlenden vergleichbaren Systemen in Deutschland wurde für die Befragung ein explorativer Ansatz gewählt. Beide Methoden werden im Folgenden detailliert beschreiben.

Einen Einblick in die Ergebnisse zu den Nutzenden in Hamburg allgemein, aber auch speziell zu Personen, die MOIA auf arbeitsbezogenen Wegen nutzen, ist in Kistorz et al. (2021) zu finden. Eine Veröffentlichung zu den Ergebnissen der hier beschriebenen Interviewstudie erscheint im Jahr 2022.

2.1 Onlinebefragung

Onlinebefragungen sind seit vielen Jahren eine etablierte Methode in der empirischen Forschung, denn sie bieten diverse Vorteile (siehe bspw. Taddicken 2013):

- Verschiedene Personen(-gruppen) können einfach und insbesondere ohne räumliche Einschränkungen erreicht werden.

- Erhobene Daten sind schnell verfügbar.
- Sie erfordern weniger Ressourcen-Einsatz im Vergleich zu Papierfragebögen oder (telefonischen) Interviews, entsprechend sind sie häufig deutlich günstiger in der Umsetzung.
- Die Plausibilisierung ist bereits während der Eingabe von Antworten möglich und weist Teilnehmende auf fehlerhafte Antworten hin (z. B. durch Formatvorgaben bei Antworten: PLZ in Deutschland 5-stellige Ziffer)
- Die Möglichkeit zur dynamischen Anpassung des Fragebogens während der Befragung ist gegeben (insbesondere bei Befragung von Personen mit unterschiedlichen Erfahrungen hilfreich).
- Integration audio-visueller Elemente wie z.B. Videos ist möglich.

Für die Sammlung einer umfangreichen Datenbasis im Rahmen der Begleitforschung wurde deshalb eine Onlinebefragung konzipiert, die in Unipark (Tivian) programmiert und Ende 2019 durchgeführt wurde.

Abbildung 3 zeigt den Aufbau des Fragebogens. Soziodemografische Daten und das aktuelle Mobilitätsverhalten sind wichtige Informationen, um eine Person zu charakterisieren und Gemeinsamkeiten zwischen verschiedenen Personengruppen zu erkennen. Daher sind solche Fragen auch in dieser Studie enthalten und wurden zu Vergleichbarkeitszwecken in Anlehnung an die großen Mobilitätsbefragungen (MiD, MOP) formuliert. Zudem sind Fragen zu Einstellungen zu verschiedenen Verkehrsmitteln (in Anlehnung an Hunecke et al. 2007), zu möglichen Gründen für die bisherige (Nicht-)Nutzung, die Bewertung des MOIA-Dienstes sowie ein Verkehrsmittelwahlexperiment enthalten. Die dynamische Konfiguration des Fragebogens ermöglicht, die Fragen entsprechend der bisherigen Erfahrung der Befragten mit MOIA anzupassen. Während Personen mit Erfahrung den Service bewerten und Fragen zur letzten Fahrt mit MOIA beantworten, sehen die übrigen Personen ein Video, das den MOIA-Dienst erklärt und einen ersten Einblick in den Service sowie die speziell gefertigten Ridepooling-

Fahrzeuge gewährt. Anschließend werden Gründe für die bisherige Nicht-Nutzung und eine mögliche zukünftige Nutzung erfragt.

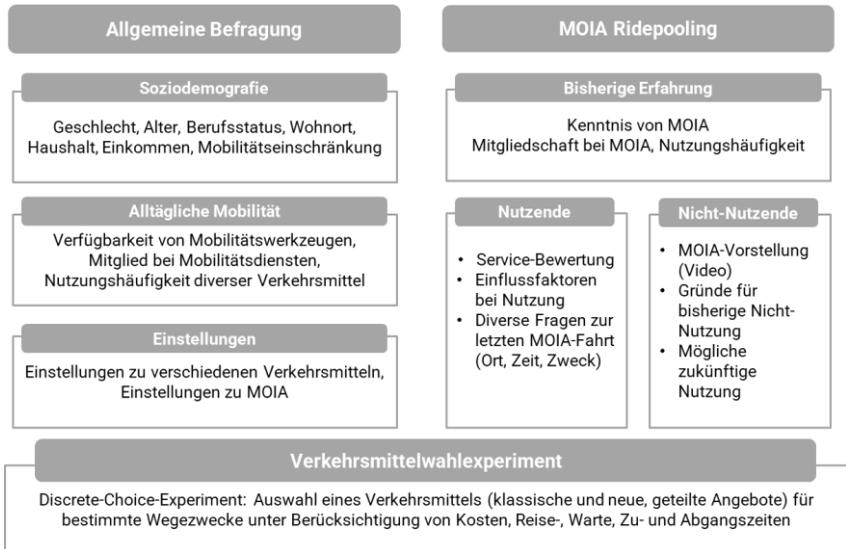


Abbildung 3 Inhaltlicher Aufbau der Onlinebefragung

Eine besondere Art der Befragung stellt das Verkehrsmittelwahlexperiment dar, welches im Folgenden detailliert beschrieben wird.

Verkehrsmittelwahlexperiment

Die großen deutschen Mobilitätserhebungen (Mobilität in Deutschland (MiD) und Deutsches Mobilitätspanel (MOP)) geben Aufschluss über die alltägliche Mobilität der Menschen in Deutschland. Allerdings sind diese Erhebungen nur eingeschränkt geeignet, um die Nutzung neuer Mobilitätsdienste zu untersuchen. Die letzte MiD-Erhebung wurde 2017 durchgeführt und beinhaltet beispielsweise keine Wege mit Ridepooling oder E-Scootern, da diese Dienste zum Zeitpunkt der Erhebung noch nicht in Deutschland verfügbar waren. Das MOP wird zwar jährlich erhoben, allerdings ist die

Anzahl der dort berichteten Wege mit neuen Mobilitätsdiensten – aufgrund einer nicht allzu großen Stichprobe – zu klein, um neue Mobilitätsdienste, die selbst in großstädtischen Räumen nur für einen sehr kleinen Teil der Wege genutzt werden, detailliert zu untersuchen. Entsprechend war eine andere Datenbasis für die Untersuchung der Verkehrsmittelwahl inklusive neuer Mobilitätsdienste nötig, um die Verkehrsmittelwahl hinsichtlich neuer Mobilitätsdienste beim Modellaufbau möglichst realitätsnah zu berücksichtigen.

Ein etabliertes Instrument der Verkehrsforschung sind sogenannte Stated-Choice-Experimente (auch Stated Preference (SP)). Die Befragten entscheiden sich in einer hypothetischen Auswahlssituation für genau ein Verkehrsmittel, welches sie unter den in der Entscheidungssituation spezifizierten Rahmenbedingungen wählen würden. Dies wiederholt sich in der Regel mehrere Male unter leichten Variationen der Attribute, die die verschiedenen Verkehrsmittel auf dem Weg beschreiben (z. B. Reisezeiten oder Kosten), um Sensitivitäten in der Entscheidung zu erhalten.

Die Analyse wurde mittels der Software R unter Anwendung des Pakets „Apollo“ (Hess und Palma 2019) durchgeführt und basiert auf den Grundsätzen der diskreten Entscheidungsmodellierung, welcher das Prinzip der Nutzenmaximierung zugrunde liegt. Auf Basis der getroffenen Entscheidungen wird mittels Maximum-Likelihood-Methode die Relevanz der einzelnen Attribute für die Verkehrsmittelwahl untersucht. Vorteile dieser Methode sind beispielsweise, dass Entscheidungen provoziert werden können, die nur selten auftreten, und zudem vollständige Daten über alle zur Wahl stehenden Alternativen inklusive der zugehörigen Attribute zur Verfügung stehen. Dies ist bei der Analyse von Wegetagebüchern aus klassischen Befragungen (Revealed Preference (RP)) nicht immer gegeben.

Grundsätzlich sind, wie in Abbildung 4 dargestellt, neue Mobilitätsdienste sowie klassische Verkehrsmittel Teil des Experiments:

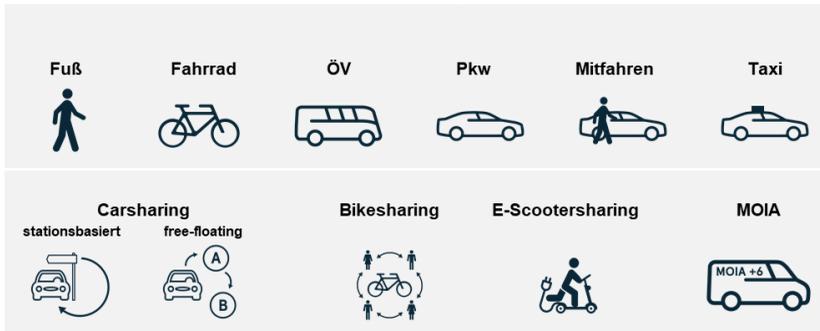


Abbildung 4 Verkehrsmittel im Verkehrsmittelwahlexperiment

Zur Gewährung der Übersichtlichkeit steht in jeder Situation nur ein Teil der Verkehrsmittel zur Auswahl (max. sechs Alternativen, siehe Abbildung 5). Vorab werden die Probanden nach dem im Alltag am häufigsten verwendeten Verkehrsmittel für den betrachteten Wegezweck (z. B. der Pendelweg zur Arbeit oder ein Weg zu den Einkäufen für den täglichen Bedarf) gefragt. Dieses Verkehrsmittel wird in allen Entscheidungssituationen berücksichtigt, genauso wie die neuen Mobilitätsdienste. Die klassischen Verkehrsmittel rotieren in den verschiedenen Auswahl-situationen. Des Weiteren werden die Entscheidungssituationen entsprechend den persönlichen Umständen angepasst, um ein möglichst realistisches Auswahl-szenario vorzufinden. So stehen beispielsweise der Pkw als Fahrende und Carsharing nur Personen mit Führerschein zur Verfügung; bei Personen mit Zeitkarte fallen keine zusätzlichen Kosten bei der Nutzung der öffentlichen Verkehrsmittel an.



Abbildung 5 Beispielfhafte Auswahl-situation im Verkehrsmittelwahl-experiment der Onlinebefragung

Insgesamt werden die Befragten mit je fünf Auswahl-situationen zu insgesamt zwei verschiedenen Wegezwecken konfrontiert, bei denen die Attribute der verschiedenen Verkehrsmittel wie Kosten, Warte-, Zugangs- und Fahrzeiten in den verschiedenen Entscheidungssituationen variieren. Die Ausprägungs-kombination in den einzelnen Wahlentscheidungen wurde mit Hilfe der Software Ngene (ChoiceMetrics 2018) bestimmt.

Da der Großteil der Befragten mit neuen Mobilitätsdiensten, wie MOIA, vertraut ist, kann vorausgesetzt werden, dass sie sich gut in die Entscheidungssituationen hineinversetzen können.

Rekrutierung und Teilnahme

Bei der Auswahl der Erhebungsmethode ist darauf zu achten, dass das Setup keine Personengruppen systematisch von der Teilnahme der Befragung ausschließt. Da der MOIA-Dienst nur via App gebucht werden kann, kann davon ausgegangen werden, dass alle Nutzenden Zugang zum Internet und somit auch zur Befragung haben. Entsprechend gering ist der zu erwartende Bias bezüglich der Befragungsmethode.

Für eine Registrierung bei MOIA sind nur eine E-Mail-Adresse sowie Abrechnungsinformationen notwendig und ggf. eine Berechtigung für personalisiertes Marketing. So konnte MOIA mit diesen Personen in Kontakt treten und eine Einladung zur Onlinebefragung verschicken. Zudem wurde der Link zur Befragung auf diversen Social-Media-Kanälen seitens MOIA aber auch seitens der Hamburger Behörde für Verkehr und Mobilitätswende (BVM, 2019 noch BWVI) geteilt. Die Vergabe personalisierter Links zur Befragung zeigte jedoch, dass der Rücklauf aus den Social-Media-Kanälen weniger hoch war.

Insgesamt konnten 11.732 vollständig ausgefüllte Fragebögen (63 % completion rate) für die Analyse der (Nicht-)Nutzenden generiert werden. Die Teilnahme war freiwillig und nicht incentiviert. Ca. 1.000 Teilnehmende wurden über ein Online-Access-Panel in Hamburg rekrutiert, um die Perspektive von Personen sicherzustellen, die theoretisch den Dienst hätten nutzen können, dies bisher aber nicht getan haben. Anhand eines mehrstufigen Plausibilisierungsverfahrens wurde die Qualität der generierten Datenbasis geprüft. Die Daten wurden in den Statistikprogramm SAS und R ausgewertet. In der von MOIA rekrutierten Stichprobe dauerte die Beantwortung des Fragebogens durchschnittlich 23 Minuten (Median = 17 Minuten). Der Unterschied zwischen Mittelwert und Median deutet darauf hin, dass eine kleine Gruppe der Befragten sehr lange Bearbeitungszeiten hatte. Dies ist z. B. der Fall, wenn Personen die Umfrage unterbrochen haben, ohne den Browser zu schließen. Die durchschnittliche Bearbeitungszeit für die Online-Access-Panel-Stichprobe beträgt

15:30 Minuten mit einem entsprechenden Median von 13:30 Minuten. Die kürzere Ausfüllzeit könnte auf den höheren Anteil von Nicht-Nutzenden zurückzuführen sein, die einen verkürzte Fragebogen hatten. Außerdem sind diese Teilnehmenden möglicherweise eher mit Onlinebefragungen vertraut.

2.2 Interviewstudie

Im Anschluss an die Auswertung der Befragungsergebnisse folgten semi-strukturierte Leitfadeninterviews mit bisherigen MOIA-Nutzenden. Im Gegensatz zur Onlinebefragung, die es ermöglicht einer großen Stichprobe eine begrenzte Anzahl an Fragen mit vorgegebenen Antworten zu stellen, bieten Interviews den Vorteil, sehr detailliert und auf die individuelle Situation bezogene Fragen zu stellen. Somit ist der Erkenntnisgewinn über die subjektiven Einstellungen und handlungsleitende Motive der Interviewten wesentlich aussagekräftiger.

Die Interviews wurden mit einer Auswahl an MOIA-Nutzenden, nämlich Personen, die mindestens 55 Jahre alt sind, Heavy-Usern, also Personen, die den Service durchschnittlich mindestens wöchentlich nutzen, sowie Personen, die außerhalb Hamburgs leben, durchgeführt. Ziel war, ein besseres Verständnis für das Verhalten und die Bedürfnisse dieser Nutzendengruppen zu erlangen. Alle Personen wurden über die MOIA-Co-Creation-Community², das MOIA-Customer-Panel, rekrutiert. Da Personen sich dort unter Angabe bestimmter soziodemographischer Merkmale wie Alter, Geschlecht und Wohnort anmelden, und diese Informationen mit den Buchungsdaten verknüpft sind, konnten gezielt Personen aus den zuvor definierten Gruppen kontaktiert werden.

Die zentralen Forschungsfragen der Interviewstudie waren:

- Wie wird MOIA im Alltag genutzt?
- Wie verhalten sich Fahrgäste während der Fahrt?

² <https://www.moia.io/de-DE/landingpages/cocreation>

- Wie wird MOIA als Verkehrsmittel wahrgenommen und wie von anderen Verkehrsmitteln abgegrenzt?
- Welche Anforderungen haben die Nutzenden an Mobilitätsdienste und welche Bedürfnisse erfüllt MOIA? Wie kann MOIA sich im Sinne der Nutzenden verbessern?
- Welche Rolle spielt Mobilität und insbesondere MOIA im sozialen Umfeld? Wie sieht die Kommunikation bezüglich dieser Themen aus?
- Wie sieht die alltägliche Mobilität der Nutzenden abgesehen von MOIA aus? Wo und wie leben die Nutzenden?
- Welche Unterschiede und welche Gemeinsamkeiten ergeben sich bei den verschiedenen Nutzendengruppen?

Der Leitfaden für die Interviews wurde in enger Zusammenarbeit mit MOIA konzipiert. Die Fragen wurden weitestgehend offen gestellt, um einen hohen Redeanteil der Befragten zu gewährleisten. Die Themen MOIA-Nutzung, Wahrnehmung des Angebots im Kontext anderer Mobilitätsoptionen, Anpassungsvorschläge sowie Kommunikation hinsichtlich MOIA im näheren sozialen Umfeld waren Inhalt aller Interviews. Manche Themen wurden nur innerhalb bestimmter Nutzendengruppen besprochen, beispielsweise wurden nur Personen über 55 Jahren gefragt, welche Gedanken sie sich zur Mobilität im Alter machen, und welche Anforderungen sich in Zukunft aus ihrer Sicht verändern könnten. Detailfragen sowie der Verlauf der Interviews unterschieden sich in Abhängigkeit von der persönlichen Erfahrung, den berichteten Lebensumständen und den gegebenen Antworten der interviewten Person.

Pandemiebedingt wurden die Interviews im Dezember 2020 telefonisch bzw. via Video-Konferenz geführt und mit Einverständnis der Befragten für die anschließende Transkription aufgezeichnet. Insgesamt fanden zwölf Interviews statt, die zwischen 30 und 90 Minuten dauerten. Die Transkription erfolgte mittels KI-basierter Auswertungssoftware (Amberscript) und wurde anschließend manuell geprüft und falls notwendig korrigiert. Allgemein folgte

die Auswertung des Interviewmaterials den Prinzipien der Inhaltsanalyse nach Mayring (2015). Hierbei kam eine Mischform deduktiver und induktiver Kategorien zum Einsatz. Die deduktive Kategorienbildung basiert auf bereits zu Beginn der Auswertung definierten Kategorien und Forschungsfragen, wohingegen die induktive Kategorienbildung die Kategorien aus dem Interviewmaterial ableitet. In Vorbereitung für die induktive Kategorienbildung wurden die Interviews paraphrasiert, generalisiert und auf zentrale Aussagen reduziert.

3 Aufbau der Simulationsstudie

Zur Untersuchung der gesamtverkehrlichen Auswirkungen wurde ein integriertes Verkehrsmodell aufgebaut. Im Folgenden wird zunächst der methodische Ansatz erläutert, indem die verwendeten Simulationswerkzeuge (Kapitel 3.1) und die verwendeten Eingangsgrößen für die konkrete Anwendung in Hamburg (Kapitel 3.2) dargestellt werden. Anschließend werden die Szenarien der Simulationsstudie definiert (Kapitel 3.3) und die Ergebnisse dieser vorgestellt (Kapitel 3.4).

3.1 Integriertes Modellframework

Zur detaillierten Abbildung von Ridepooling innerhalb des Verkehrssystems wird im Rahmen dieses Projekts ein Verkehrsnachfragemodell (mobiTopp) mit einer Flottensimulation (FleetPy) gekoppelt. Hierdurch entsteht ein integriertes Modellframework, mit dem die Wechselwirkungen zwischen dem Ridepooling-Service und allen anderen Verkehrsmitteln abgebildet werden können. Es wird zunächst das Verkehrsnachfragemodell mobiTopp vorgestellt, gefolgt von der Kopplung zwischen mobiTopp und FleetPy, schließlich wird FleetPy detailliert erläutert.

3.1.1 Mikroskopische Verkehrsnachfragemodellierung mit mobiTopp

Im Projekt wurde ein Modell mit dem Framework mobiTopp aufgebaut³. mobiTopp ist ein aktivitäten- und agentenbasiertes Verkehrsnachfragemodell, das jede Person und jeden Haushalt mit deren Eigenschaften

³ mobiTopp ist Open Source. Es steht unter <https://github.com/kit-ivf/mobitopp> zur Verfügung.

modelliert. Personen sind als selbstständig agierende Agenten repräsentiert, welche individuell und situationsabhängig Entscheidungen treffen (agentenbasiertes Modell) (Mallig et al. 2013; Mallig und Vortisch 2017). Verkehr entsteht dadurch, dass die Agenten im Laufe der Simulation Aktivitäten durchführen und durch dafür notwendige Ortsveränderungen Verkehr erzeugen (aktivitätenbasiertes Modell). mobiTopp kann für unterschiedliche Fragestellungen mit unterschiedlichen Teilmodulen aufgebaut werden. Im Folgenden wird die Struktur von mobiTopp erläutert, wie es in diesem Projekt verwendet wurde. Die konkreten verwendeten Daten werden in Abschnitt 3.2.1 dargelegt.

mobiTopp besteht aus zwei Phasen, der Initialisierung (Langfristmodell) und der Simulation (Kurzfristmodell). Durch das Langfristmodul werden Daten erzeugt, welche im Kurzfristmodul verwendet werden. Die grundlegende Struktur der mobiTopp-Modellteile zeigt Abbildung 6.

mobiTopp

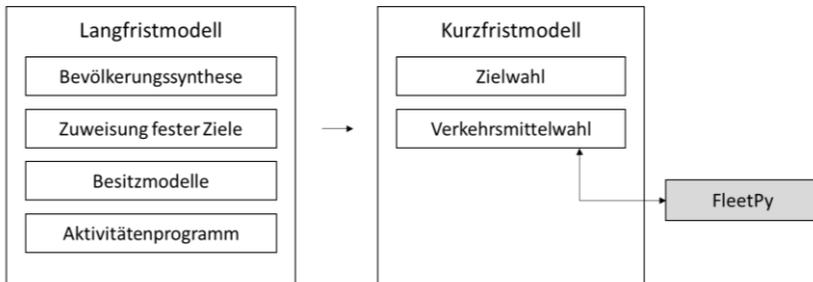


Abbildung 6 Struktur der mobiTopp-Modellteile

Langfristmodell

Im Langfristmodell werden langfristige Entscheidungen und Eigenschaften der Agenten modelliert. In dieser Phase wird zunächst eine synthetische Bevölkerung erstellt. Diese besteht aus Agenten, die in Haushaltskontexten abgebildet werden. Die Haushalte sind jeweils räumlich einer Verkehrszelle zugeordnet. Die Anzahl der Haushalte einschließlich der Agenten mit den wesentlichen Eigenschaften der Personen entsprechen den tatsächlichen Einwohnerinnen und Einwohnern des jeweiligen Gebiets. Hierzu werden Daten der statistischen Ämter so aufbereitet, dass Sollverteilungen für bestimmte Merkmale innerhalb kleinräumiger Gebiete des Modellraums erstellt werden. Einige Eigenschaften der Haushalte und Personen werden dabei aus einer Mobilitätsenerhebung übernommen und so gezogen, dass deren Sollverteilungen mit den Statistiken hinreichend genau übereinstimmen. Es findet dazu eine Optimierung mit dem Verfahren IPU (Iterative Proportional Updating) statt, so dass sich die erstellte synthetische Bevölkerung möglichst gut an die tatsächlichen Einwohnerinnen und Einwohner angleicht.

Diverse weitere Eigenschaften der Personen und Haushalte werden im Rahmen des Langfristmodells modelliert. Eine Übersicht über alle berücksichtigten Eigenschaften ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1 Personen- und Haushaltseigenschaften

Eigenschaft	Herkunft
<i>Haushalte</i>	
Wohnort	Haushaltsziehung
Ökonomischer Status	Haushaltsziehung
Haushaltsmitglieder	Haushaltsziehung
Anzahl Pkw	Besitzmodell
<i>Personen</i>	
Alter	Haushaltsziehung
Geschlecht	Haushaltsziehung
Führerschein	Haushaltsziehung
Beschäftigung	Haushaltsziehung
Pendeldistanz	Haushaltsziehung
Aktivitätenprogramm	Modul actiTopp
Arbeits-/Ausbildungsplatz	Zielwahlmodell
ÖV-Zeitkarte	Besitzmodell
Mitgliedschaft bei Mobilitätsdiensten	Mitgliedschaftsmodelle

Anschließend werden Ziele für die Aktivitäten Arbeit und Ausbildung definiert. Um die Stabilität der gewählten Ziele im Verlauf der Wochen-Simulation zu gewährleisten, werden diese Ziele im Langfristmodell festgelegt. Die Zuordnung erfolgt über differenzierte Teilmodelle. Für Grundschulkindern wird die jeweils dem Wohnort nächstgelegene Zelle mit einer Grundschule gewählt. Für die Zuordnung weiterführender Schulen wird die in der Mobilitätsenerhebung verwendete Pendeldistanz zugrunde gelegt, diese Information wird mit den Schulplätzen kombiniert. Für die Zuordnung von Arbeitsplätzen wird auf Basis der berichteten Pendeldistanz der Erhebung ein Suchradius für Arbeitsplätze definiert. Innerhalb dieses Radius werden mögliche Zellen aus der gemeindefreien Pendelmatrix ausgewählt, diese dient als Randverteilung. Mögliche Zellen für Arbeitsplätze sind alle Zellen, zwischen denen noch nicht ausreichend Pendelnde verkehren. Nach dieser Vorauswahl möglicher Optionen, hängt die Auswahlwahrscheinlichkeit einer

Zelle von der Attraktivität für den Zweck Arbeiten ab. So werden Zellen mit vielen Arbeitsplätzen häufiger gewählt als andere.

Für die Verfügbarkeit der Mobilitätswerkzeuge, wie Pkw-Besitz, ÖV-Zeitkartenbesitz, Mitgliedschaft bei Mobilitätsanbietern, werden weitere spezifische Teilmodelle verwendet. Diese Modelle beruhen auf Parameterschätzungen mit empirischen Daten. In diesen Teilmodellen werden den Haushalten und Agenten, unter Verwendung von diskreten Wahlmodellen, die Mobilitätswerkzeuge zugeordnet. Hierbei wird für jedes Mobilitätswerkzeug eine Nutzenfunktion mit einer stochastischen Komponente erstellt, welche für die meisten Mobilitätswerkzeuge binär ausgewertet wird (verfügbar ja oder nein); einige wenige Mobilitätswerkzeuge haben eine mehrstufige Skala (z. B. Anzahl Pkw im Haushalt). Die Nutzenfunktionen enthalten Umgebungseigenschaften der Haushalte (bspw. Qualität der Verkehrsmittel am Wohnort) sowie Personenmerkmale (bspw. Einkommen und die Verfügbarkeit anderer Mobilitätswerkzeuge), so dass diese bei der Zuordnung der Mobilitätswerkzeuge berücksichtigt werden. Ein Vorteil der Anwendung von Besitzmodellen ist die Berücksichtigung der Maßnahmensensitivität. So ist beispielsweise zu erwarten, dass durch die Erweiterung des ÖV-Angebots der Besitz der Zeitkarten zunimmt. Ebenso nimmt bei der Erweiterung des Angebots von neuen Mobilitätsformen die Anzahl der Mitglieder zu.

Als letzter Schritt des Langfristmodells wird den Agenten ein Aktivitätenprogramm zugewiesen. Dies ist eine Abfolge an Aktivitäten (z. B. zu Hause – Arbeiten – Freizeit – zu Hause) für alle sieben Tage der simulierten Woche. Die Aktivitäten sind durch die Art der Aktivität selbst (zu Hause, Arbeiten usw.), Startzeit und Dauer gekennzeichnet. Im hier erstellten Modell werden die Aktivitäten mittels des Moduls actiTopp (Hilgert 2019) erstellt. Dabei werden in einem mehrstufigen Verfahren, basierend auf logistischen Regressionsmodellen, Aktivitätenpläne für einzelne Agenten erzeugt, unter Berücksichtigung der Eigenschaften der Person und des Haushalts (Haushaltsgröße, Beschäftigung, Pendeldistanz u. a.). Damit sind die Aktivitätendauern und deren Startzeiten festgelegt.

Kurzfristmodell

In der Simulation des Kurzfristmodells verfolgen die Agenten ihr Aktivitätenprogramm – chronologisch und zeitlich synchronisiert beginnend von Montag 00:00 h bis Sonntag 24:00 h in Minutenschritten. Das Ergebnis ist die Modellierung aller Wege innerhalb der betrachteten Woche inklusive der Ziele und der genutzten Verkehrsmittel. Die im Langfristmodell definierten Eigenschaften sowie der aktuelle Simulationszustand werden berücksichtigt. Die Simulation wird im vorliegenden Modell wegebasiert durchgeführt (Mallig 2019). In Anlehnung an das 4-Stufen-Modell wird für jeden beginnenden Weg nach einer Aktivität zunächst das Ziel und anschließend das Verkehrsmittel gewählt. Bei Aktivitäten mit zuvor festgelegten Zielen (Zuhause, Ausbildung, Arbeit) entfällt die Zielwahl.

Bei der Wahl der flexiblen, also nicht bereits im Langfristmodell definierten, Ziele wird ein multinomiales Logit-Modell (MNL) eingesetzt. Dieses basiert auf dem Prinzip der Nutzenmaximierung. Anhand der Nutzenfunktion wird für alle möglichen Zielzellen $d \in D$ für die Aktivität bzw. den Wegezweck $p \in P$ basierend auf der aktuellen Position o der Nutzen $U_{o,p,d}$ bestimmt. Im vorliegenden Zielwahlmodell hängt der Nutzen einer Zelle von der Attraktivität der Zelle d für den jeweiligen Wegezweck p , der Erreichbarkeit der möglichen Zielzelle d von der aktuellen Position o mit verschiedenen Verkehrsmitteln, der Erreichbarkeit des nächsten, bereits definierten Ziels f_{next} sowie den soziodemographischen Einflussfaktoren der Agenten $x \in X$ ab. Die Gewichte β der jeweiligen Einflussgrößen werden empirisch abgeleitet und in das Verkehrsmodell integriert.

$$\begin{aligned}
U_{o,p,d} = & (\beta_{Attraktivität_p} + \sum_{x \in X} \beta_{Attraktivität_{p,x}}) * Attraktivität_{p,d} \\
& + (\beta_{Erreichbarkeit_p} + \sum_{x \in X} \beta_{Erreichbarkeit_{p,x}}) * Erreichbarkeit_{o,d} \quad (1) \\
& + (\beta_{Erreichbarkeit_p} + \sum_{x \in X} \beta_{Erreichbarkeit_{p,x}}) * Erreichbarkeit_{d,next}
\end{aligned}$$

Der sich daraus ergebende Nutzen $U_{o,p,d}$ beeinflusst die Auswahlwahrscheinlichkeit des jeweiligen Ziels.

Nach der Zielwahl wird das Verkehrsmittel gewählt. Neben den Verkehrsmitteln zu Fuß, Fahrrad, ÖV, Pkw als Fahrerin bzw. Fahrer (im Folgenden als „Pkw“ bezeichnet) und Pkw als Mitfahrerin bzw. Mitfahrer (im Folgenden als „Mitfahren“ bezeichnet), können auch neue Mobilitätsangebote wie Ridepooling, Carsharing (stationsbasiert und free-floating), Bikesharing und E-Scootersharing sowie Taxis gewählt werden. Vor der Verkehrsmittelwahl des Agenten wird die Menge der verfügbaren Verkehrsmittel bestimmt. In erster Linie hängen die Verkehrsmittelalternativen eines jeden Agenten von den im Langfristmodell bestimmten verfügbaren Mobilitätswerkzeugen ab. Hinzu kommt der aktuelle Modellzustand, da auch die aktuelle Position des Agenten sowie andere Agenten die verfügbaren Optionen beeinflussen können: Der Pkw steht beispielsweise nur dann zu Verfügung, wenn der Agent eine Fahrerlaubnis besitzt, der Haushalt des Agenten über mindestens einen Pkw verfügt und dieser nicht von einem anderen Haushaltsmitglied genutzt wird. Die neuen Mobilitätsangebote stehen nur Agenten mit einer Mitgliedschaft zur Verfügung und auch nur für Wege, die innerhalb des Bediengebiets des jeweiligen Mobilitätsangebots durchgeführt werden.

Wie bei der Zielwahl wird auch für die Verkehrsmittelwahl ein Discrete-Choice-Modell verwendet. Für jedes zur Verfügung stehende Verkehrsmittel $m \in M$ wird der Nutzen des Verkehrsmittels $U_{m,o,d,p}$ für den Weg vom Startpunkt o zum ausgewählten d Ziel für den Zweck p bestimmt. Die Verkehrsmittelwahl wird durch zahlreiche Komponenten wie Kosten, Fahr-

und Wartezeit, Zu- und Abgangszeit sowie soziodemographische und wegezweckbezogene Einflussfaktoren beeinflusst. Reisezeiten und Kosten stammen in der Regel aus Quell-Ziel-Matrizen, die zeitscheibenfein berechnet werden. Nicht alle Einflussfaktoren treten bei allen Verkehrsmitteln auf, bspw. fallen beim Fahrradfahren oder Zufußgehen keine Kosten an. Vereinfacht lassen sich Nutzenfunktionen bei der Verkehrsmittelwahl wie folgt darstellen:

$$\begin{aligned}
 U_{m,o,d,p} &= asc_m + \beta_{m,p} + \sum_{x \in X} (\beta_{m,x} * x) \\
 &+ (\beta_{Kosten_{m,p}} + \sum_{x \in X} \beta_{Kosten_{m,x}}) * Kosten_{m,o,d} \\
 &+ \sum_{t \in T} ((\beta_{Zeit_{t,m,p}} + \sum_{x \in X} \beta_{Zeit_{t,m,x}}) * Zeit_{t,m,o,d})
 \end{aligned} \tag{2}$$

Wobei X die Menge der soziodemographischen Eigenschaften mit Einfluss auf den Nutzen und T die Menge der Reisezeitbestandteile (Wartezeit, Fahrzeit, Zu- und Abgangszeit) darstellt. Die soziodemographischen Eigenschaften können sowohl den Grundnutzen asc_m als auch die Kosten- und Zeitparameter ($\beta_{Kosten_{m,p}}$, $\beta_{Zeit_{t,m,p}}$) beeinflussen. Analog zur Zielwahl werden auch bei der Verkehrsmittelwahl die β -Parameter empirisch bestimmt.

Bei der Verkehrsmittelwahl im ÖV modelliert mobiTopp auch intermodale Wege⁴. Der Zugang zu einer Haltestelle des ÖV ist nicht nur zu Fuß, sondern auch mit allen anderen zur Verfügung stehenden Verkehrsmitteln möglich (bspw. kann mit dem Fahrrad zum Bahnhof gefahren und für die letzte Meile ein Taxi genutzt werden). Somit können auf einem Weg zwischen zwei Aktivitäten bis zu drei verschiedene Verkehrsmittel genutzt werden. Die Wahl der Zu- und Abgangsverkehrsmittel findet nach der Wahl des Hauptverkehrsmittels ÖV statt. Bei der Wahl des Hauptverkehrsmittels wird

⁴ In anderen Projekten auch bei weiteren Verkehrsmitteln, v. a. im Sharing-Bereich.

die mittlere Erreichbarkeit bei den verschiedenen Zu- und Abgangsalternativen berücksichtigt. Wird der ÖV als Hauptverkehrsmittel gewählt, wird im Anschluss das Zugangs- und dann das Abgangsverkehrsmittel gewählt. Für alle Verkehrsmittelkombinationen wird im Vorfeld für jede Quell-Ziel-Relation der optimale Umsteigepunkt berechnet. Der Verkehrsmittelwahl für Zu- und Abgang liegt ebenfalls ein Discrete-Choice-Modell zugrunde (Wörle et al. 2021).

Die in mobiTopp modellierte Nachfrage wird in Zeitscheiben zu Verkehrsnachfragematrizen aggregiert und dann umgelegt (i. d. R. in PTV Visum, so auch in diesem Projekt). Dies ermöglicht die Berechnung neuer Reisezeiten in Form von Quell-Ziel-Matrizen, die dann wieder in die Ziel- und Verkehrsmittelwahl in mobiTopp einfließen. Des Weiteren besteht prinzipiell die Möglichkeit, die Nachfrage auf der Ebene einzelner Agenten umzulegen. Hierfür werden alle Agenten und Wege z. B. in die Open-Source-Software MATSim überführt und dort umgelegt (Briem et al. 2019).

mobiTopp modelliert im Verlauf einer Woche alle Personen respektive Agenten, mit ihren Personen- und Haushaltseigenschaften, alle Aktivitäten, Ziele und genutzten Verkehrsmittel räumlich und zeitlich hoch aufgelöst, minutenfein und auf Ebene von Geokoordinaten. Die Verkehrsnachfrage ist somit vollständig in mobiTopp abgebildet. Insbesondere beim Ridepooling hängt die Nachfrage stark vom Angebot, also der Anzahl der verfügbaren Fahrzeuge in näherer Umgebung, sowie von den Fahrtwünschen anderer Personen ab. Um die Ridepooling-Angebotsseite im Rahmen des Projektes im Verkehrsmodell detailliert zu berücksichtigen, wurde mobiTopp mit dem Flottensimulationsmodell FleetPy gekoppelt.

3.1.2 Kopplung von Verkehrsnachfragemodell und Flottensimulation

Ridepooling-Dienste sind stark dynamische Systeme. Die Möglichkeit Ridepooling zu nutzen sowie die Eigenschaften einer Fahrt hängen stark von

aktuellen Flotten- und Nachfragezuständen ab. Wollen zu viele Personen Ridepooling nutzen, sinkt die Verfügbarkeit von Fahrzeugen und Anfragen müssen abgelehnt werden. Nutzen wenige Personen den Dienst, ist wenig Pooling möglich und die Fahrgäste werden vorwiegend auf direkten Weg ans Ziel gebracht.

Um diese Dynamik möglichst genau abzubilden, wurde das Nachfragemodell mobiTopp mit der agentenbasierten Ridepooling-Flottensimulation FleetPy gekoppelt. Agenten aus mobiTopp, denen MOIA als Verkehrsmittel zur Verfügung steht, stellen Wegeanfragen an das Flottensimulationsmodell. Das Flottenmodell evaluiert, basierend auf bereits gebuchten Fahrten und Flottenkontrollstrategien, die Möglichkeit, die Anfrage zu bedienen und kommuniziert Fahrtparameter wie Reise- und Wartezeit, Fahrpreis und Laufwege zurück an mobiTopp. Diese Parameter bilden die Grundlage bei der Verkehrsmittelwahl des Agenten. Falls der Agent die Fahrt mit MOIA bucht, wird dieser in der Routenplanung der Flottenfahrzeuge übernommen.

Ein Spezialfall besteht in der Kommunikation von intermodalen Fahrtanfragen. In dieser Studie sind intermodale Fahrten mit Ridepooling dabei Wege, die einen Umstieg von Ridepooling in den ÖV (Zugang) oder umgekehrt vom ÖV ans Ziel (Abgang) beinhalten. Da für einen Umstieg eine Vielzahl von ÖV-Haltestellen in Frage kommen und für den Prozess der Verkehrsmittelwahlmodellierung Attribute des Gesamtweges benötigt werden, wird im Vorfeld mittels PTV Visum eine Vorauswahl von fünf potenziellen ÖV-Umsteigestationen erstellt. Für jede dieser Umsteigestationen sendet mobiTopp eine Anfrage an die Flottensimulation. Diese Anfrage beinhaltet neben den bereits beschriebenen Attributen auch die ÖV-Reisezeit. Für Last-Mile-Anfragen kann damit auch der Zeitpunkt berechnet werden, der den frühestmöglichen Abholzeitpunkt des Ridepooling-Fahrzeugs an der Station definiert. Die Flottensimulation bearbeitet alle Anfragen und gibt Attribute des intermodalen Weges zurück, was die Reisezeit des Gesamtweges (summiert für ÖV und Ridepooling) minimiert.

Sobald alle Agentenentscheidungen eines Simulationszeitschrittes bearbeitet wurden, übermittelt mobiTopp einen neue Simulationszeit. Daraufhin werden Fahrzeugbewegungen und Zusteigeprozesse in der Flottensimulation nach den aktuell geplanten Routen durchgeführt. Die Flottensimulation wird im nächsten Abschnitt näher erläutert. Der Ablauf der Kopplung ist in Abbildung 7 skizziert. Die Kopplung wurde erstmalig in (Wilkes et al. 2021) beschrieben.

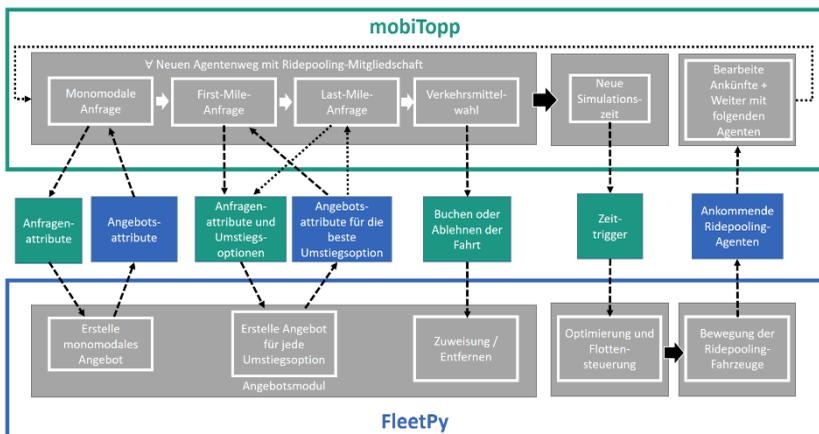


Abbildung 7 Ablaufplan der Kopplung zwischen mobiTopp und FleetPy

3.1.3 Flottensimulation mit FleetPy

Aufgabe der Flottensimulation ist eine möglichst realistische Nachbildung des Betriebs von Ridepooling-Flotten. Dies beinhaltet in diesem Projekt zwei Kernaspekte: Zum einen ist der Buchungsprozess zwischen Anbieter und Kundschaft abzubilden, indem die anfragenden Personen Fahrtangebote erhalten und buchen können, die auf dem aktuellen Flottenzustand (z. B. hinsichtlich der Auslastung) beruhen. Zum anderen werden operationale Aspekte der Flottensteuerung detailliert dargestellt, um verkehrliche Auswirkungen von Ridepooling abschätzen zu können. Dies beinhaltet u. a. die Optimierung der Routenzuweisungen der Fahrzeuge, um Fahrgäste zu

bedienen, das proaktive Verteilen von Fahrzeugen je nach erwarteter Nachfrage, Ladeprozesse der Fahrzeuge und deren zeitlicher Verfügbarkeit in Abhängigkeit von den Schichten des Fahrpersonals.

Die Flottensimulation ist ein agentenbasiertes Modell. Folgende Agenten werden abgebildet: ein Flottenbetreiber, der seine Fahrzeuge durch Routenzuweisungen steuert, Flottenfahrzeuge $v \in V$ mit der Flottengröße $|V|$ und der Sitzplatzkapazität c_v , die sich basierend auf Routenzuweisungen des Betreibers auf einem Netzwerkgraphen bewegen, und Fahrgäste, die Reiseanfragen r an den Betreiber stellen. Dabei ist eine Reiseanfrage r_i durch das Tupel $(o_i, d_i, t_i^r, n_i, t_i^{late}, tt_i^{d,max})$ mit Startpunkt der Reiseanfrage o_i , dem Ziel d_i , dem Zeitpunkt der Anfrage t_i^r , der Gruppengröße n_i und den durch den Betreiber definierten zeitlichen Randbedingungen der spätesten Abholzeit t_i^{late} und der maximalen Reisezeit $tt_i^{d,max}$ definiert. Die zeitlichen Randbedingungen sind dabei gegeben durch

$$t_i^{late} = t_i^r + t_{max}^{late} \quad (3)$$

$$tt_i^{d,max} = \Delta_{abs} + (1 + \Delta_{rel})tt_i^{direct}. \quad (4)$$

Dabei entspricht t_{max}^{late} einer maximalen Wartezeit, Δ_{abs} einer absoluten Umwegzeit, Δ_{rel} einer relativen Umwegzeit und tt_i^{direct} der direkten Reisezeit des Fahrgastes von Start zu Ziel.

Innerhalb des Netzwerkgraphen werden Knoten mit zusätzlichen Funktionen abgebildet: Zum einen gibt es Zustiegepunkte, an denen zu- oder ausgestiegen werden kann, zum anderen werden Depots abgebildet, in denen inaktive Fahrzeuge geparkt werden und zusätzlich Ladeinfrastruktur vorhanden ist. Die Kanten haben eine statische mittlere Reisezeit und ihre Länge als Attribute. Um unterschiedliche Verkehrszustände während der Simulationszeit abzubilden, können verschiedene Reisezeiten zu bestimmten Simulationszeiten geladen werden.

Der Betreiber weist seinen Fahrzeugen v Pläne $\psi_v[s, R_\psi]$ zu, die diese Fahrzeuge zu erfüllen haben. Ein Fahrzeugplan besteht dabei aus einer Liste

an Stopps s und dem Set an Fahrgästen R_ψ , die mit diesem Plan bedient werden. Jeder Stopp ist durch eine Netzwerkposition, eine Dauer und der Aufgabe an dieser Position (z. B. Zu-/Ausstieg bestimmter Kundschaft, Laden oder Parken) definiert. Fahrzeuge fahren zwischen den Stopps auf den schnellsten Routen im Netzwerk. Pläne werde nach einer Bewertungsfunktion ρ bewertet:

$$\rho(\psi_v[s, R_\psi]) = t_\psi^{end} - t - |R_\psi|\theta. \quad (5)$$

Dabei entspricht t_ψ^{end} dem geschätzten Zeitpunkt, an dem der Plan abgeschlossen sein wird, t der aktuellen Simulationszeit, $|R_\psi|$ der Anzahl an Kunden, die durch den Plan bedient werden und θ einer Zuweisungsbelohnung. Mit dem Ziel Pläne zuzuweisen, die diese Funktion minimieren, werden möglichst viele Fahrgäste bedient (θ wird sehr hoch gewählt), während die Zeit minimiert wird, die die Flotte zur Bedienung braucht („Systemzeit“). Zugewiesene Pläne können zusätzlich zur Prüfung der Fahrzeugverfügbarkeiten genutzt werden.

Zur Erfüllung der oben beschriebenen Anforderungen an die Flottensimulation ist der Betreiber und dessen Strategie der Zuweisung von Plänen an Fahrzeuge in vier Module unterteilt:

Angebotsmodul

Dieses Modul ist für die Kommunikation zwischen Reisenden und Betreiber verantwortlich. Sobald die Agenten aus mobiTopp Anfragen an den Betreiber stellen, muss abgeschätzt werden, ob eine Fahrt mit dem Service möglich ist und, falls dem so ist, Parameter des Trips abgeschätzt werden, die als Grundlage für die Verkehrsmittelwahl der Reisenden dienen. Dafür versucht der Betreiber die neue Anfrage r mittels einer „Insertion Heuristic“ in alle möglichen zugewiesenen Fahrzeugpläne einzufügen. Dabei wird derjenige Plan ausgewählt, der den Unterschied der Optimierungsfunktionen

$$\Delta \rho_{v,r} = \rho(\psi_v[s_r, R_\psi]) - \rho(\psi_v[s_0, R_\psi \setminus r]) \quad (6)$$

am stärksten verringert und somit die Systemzeit am wenigsten erhöht. Aus dieser Initiallösung werden für die neuen Fahrgäste Warte- und Reisezeiten, Laufwege und Fahrpreise bestimmt, die als Ridepooling-Charakteristiken an das Mode-Choice-Modell von mobiTopp übergeben werden. Wird keine Lösung gefunden, steht ihnen MOIA nicht zur Verfügung. Falls die Reisenden das Angebot annehmen, wird die Initiallösung für das jeweilige Fahrzeug übernommen, ansonsten wird die Lösung verworfen.

Intermodale Anfragen bilden einen Spezialfall. Wie in Abschnitt 3.1.3 beschrieben, erhält die Flottensimulation für alle Reisenden für jede intermodale Anfrage verschiedene Umsteigeoptionen mit entsprechenden Reisezeiten des ÖV-Anteils des Weges. Analog zu den bereits beschriebenen monomodalen Anfragen, wird für jede dieser Optionen innerhalb des Moduls eine quasi-monomodale Anfrage mit Start-(End-)Punkt der Anfrage als den jeweiligen Umsteigepunkt des Last-(First-)Mile-Weges gestellt. Bei einer Last-Mile-Anfrage ist zusätzlich relevant, dass eine Abholung durch den Ridepooling-Service erst nach Ankunft an der ÖV-Station möglich ist. Basierend auf der ÖV-Reisezeit wird daher ein frühestmöglicher Abholzeitpunkt berechnet, den die Pläne zu erfüllen haben. Nachdem alle intermodalen Optionen berechnet wurden, wird diejenige Umsteigeoption, und somit intermodale Anfrage, als Angebot zurückgegeben, die die Gesamtreisezeit aus Ridepooling und ÖV minimiert.

Reoptimierungsmodul

Das Angebotsmodul produziert in der Regel suboptimale Lösungen durch die verwendete „Insertion Heuristic“, die nötig ist, um Rechenzeiten so gering wie möglich zu halten. Daher werden im Reoptimierungsmodul die Fahrzeugpläne aller Fahrzeuge global optimiert, sobald alle Anfragen eines Zeitschrittes abgearbeitet wurden. Dieser Algorithmus basiert auf der Arbeit von (Alonso-Mora et al. 2017a). Details zur Implementierung sind in (Engelhardt et al. 2020) zu finden. Die grundsätzliche Idee des Algorithmus ist, in einem ersten Schritt alle möglichen Fahrzeugpläne für jedes Fahrzeug zu erstellen, die alle möglichen Nutzendengruppen zusammen bedienen, um

somit den gesamten Lösungsraum aufzuspannen. Dabei werden sämtliche Pläne $\psi_v[s, R_\psi]$, die die gleiche Nutzendengruppe R_ψ bedienen, zu einem V2RB („vehicle-to-request-bundle“) $\Psi_v[R_\psi]$ zusammengefasst. Die Bewertungsfunktion des V2RBs ist definiert durch

$$\rho_{v,R_\psi} = \rho(\Psi_v[R_\psi]) = \min_s \rho(\psi_v[s, R_\psi]). \quad (7)$$

Da ein naives Suchverfahren zu rechenintensiv ist, besteht die grundsätzliche Idee des Algorithmus daraus, Bedingungen zu formulieren, die für die Existenz eines V2RBs, welches alle zeitlichen Randbedingungen erfüllt, notwendig sind. Die erste Bedingung besagt, dass ein V2RB, bei dem Fahrzeug v den Fahrgast r bedient, nur existieren kann, wenn dieses Fahrzeug den Fahrgast innerhalb der maximalen Wartezeit erreichen kann. Die zweite Bedingung besagt, dass ein V2RB, welches die Fahrgäste r_1 und r_2 bedient, nur dann existieren kann, wenn ein hypothetisches Fahrzeug, welches am Startpunkt einer der beiden Fahrgäste startet, auch den anderen Fahrgast bedienen kann. Die dritte Bedingung besagt, dass für die Existenz des V2RBs $\Psi_v[R_\psi]$ alle V2RBs $\Psi_v[R_\psi \setminus r] \forall r \in R_\psi$ ohne einen der Fahrgäste existieren müssen. Diese Bedingungen ermöglichen eine effiziente, iterative Erstellung aller möglichen V2RBs. Dieses Suchprozedere kann trotzdem sehr rechenaufwendig werden, daher wird für bestimmte Szenarien eine Heuristik verwendet, welche die Anzahl von Fahrzeugen beschränkt, die für die Bedienung eines Fahrgastes in Frage kommen.

Nach Erstellung aller V2RBs, werden diese durch das Lösen eines ganzzahlig linearen Optimierungsproblems (ILP) den Fahrzeugen zugewiesen:

$$\min \sum_v \sum_{R_\psi} \rho_{v,R_\psi} z_{v,R_\psi} \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{R_\psi} z_{v,R_\psi} \leq 1 \quad \forall v \in V \quad (9)$$

$$\sum_v \sum_{R_\psi \in \Omega_i} z_{v,R_\psi} = 1 \quad \forall i \in R_i \quad (10)$$

Die Gleichung (8) besagt dabei aufgrund der Definition der Kostenfunktion möglichst die V2RBs (und somit Fahrzeugpläne) zuzuweisen, die möglichst viele Fahrgäste bedienen und gleichzeitig die Systemzeit minimieren. $Z_{v,R,\psi}$ entspricht einer Entscheidungsvariable, die den Wert 1 annimmt, falls das V2RB ψ dem Fahrzeug v zugewiesen werden soll. Gleichung (9) beschränkt, dass jedem Fahrzeug nur ein V2RB zugewiesen werden kann, während Gleichung (10) besagt, dass jeder Fahrgast zugewiesen werden muss. Ω_i beschreibt die Menge aller Nutzendengruppen R_ψ , die den Fahrgast i enthalten. Es ist möglich, jeden Fahrgast zuzuweisen, da durch die Methodik des Angebotsmoduls bereits eine mögliche Initiallösung für alle Nutzenden besteht, die den Service nutzen. Das Ziel der Reoptimierung ist, Lösungen zu finden, die gebuchten Nutzenden mit effizienteren Routen zu bedienen.

Repositionierungsmodul

Eine Repositionierungsstrategie wurde implementiert, um Fahrzeuge räumlich entsprechend der erwarteten Nachfrage zu verteilen. Sie wird in einem Intervall von T_{Repo} und zusätzlich, wenn Fahrzeuge aus dem Depot aktiviert werden, ausgeführt. Die Strategie unterteilt das Geschäftsgebiet in Zonen, die auf den Stadtbezirken Hamburgs beruhen. Da eine direkte Nachfragevorhersage pro Zone in der Simulation nicht zur Verfügung steht, wurde ein Ansatz gewählt, der das Ziel hat, eine Dichte an ungebuchten Fahrzeugen so umzuverteilen, dass sie einer Zieldichte pro Zone möglichst gut entspricht. Die Zieldichte sollte möglichst den erwarteten Ridepooling-Fahrten pro Zone entsprechen. Zur Berechnung der Repositionierungsfahrten wird darauf aufbauend der Algorithmus von (Pavone et al. 2012) angewendet.

Verwaltungsmodul

Im Verwaltungsmodul werden sonstige dynamische Strategien der Flottenkontrolle bearbeitet. Dieses beinhaltet zum einen die Ladestrategie. Fahrzeuge laden, wenn sie sich im Depot befinden und dort freie Ladeplätze vorhanden sind. Fahrzeuge werden proaktiv ins Depot gesendet, sobald ihr Ladezustand unter einen kritischen Wert s_{crit} fällt. Es wurde modelliert, dass

Fahrpersonal in diesem Fall für den Rest ihrer Schicht in ein anderes Fahrzeug im Depot wechseln, welches somit für den Betrieb aktiviert wird. Zum anderen wird in diesem Modul die zeitliche Verfügbarkeit von Flottenfahrzeugen basierend auf Fahrerschichtplänen modelliert. Sobald sich diese Verfügbarkeit ändert, werden Fahrzeuge in das Depot gesandt und für den Betrieb deaktiviert oder umgekehrt aus dem Depot für den Betrieb aktiviert. Letztlich regelt dieses Modul auch die dynamische Anpassung der Fahrpreise nach Simulationszeit und/oder aktueller Nachfrage.

3.2 Case-Study Hamburg

Anknüpfend an die methodischen Erläuterungen wird nachfolgend der konkrete Aufbau des Modells des Ballungsraums Hamburg erläutert. Hierzu werden auch die verwendeten Daten zur Kalibrierung dargestellt.

3.2.1 Agentenbasiertes Verkehrsnachfragemodell des Ballungsraums Hamburg

Im folgenden Kapitel wird der konkrete Aufbau des mobiTopp-Modells für die MOIA Begleitforschung einschließlich der verwendeten Eingangsdaten dargelegt. Als Ergänzung zu den Erläuterungen dient Abbildung 8 auf der nachfolgenden Seite. Hierin ist der gesamte Datenfluss des Modells dargestellt.

mobiTopp Übersicht

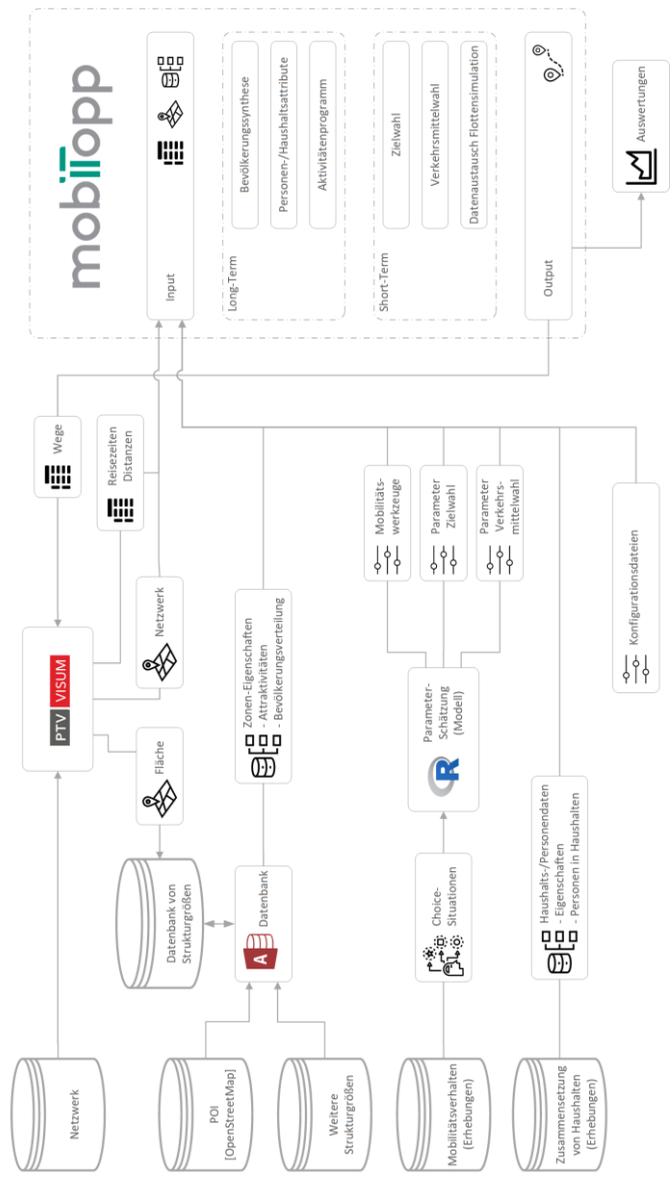


Abbildung 8 Datenfluss in mobiTopp

Bevölkerungssynthese

Im Modell werden die Aktivitäten und Wege der Bevölkerung (Einwohnerinnen und Einwohner) des Stadtstaats Hamburg sowie aus Teilen der umgebenden Bundesländer Niedersachsen und Schleswig-Holstein abgebildet (vgl. Abbildung 9). Hinzu kommen Geschäftsreisende und Touristen, deren Ziel Hamburg ist. Der Planungsraum im engeren Sinne ist Hamburg, die Bevölkerung der umgebenden Landkreise ist enthalten, damit auch der Verkehr, der durch diese Personen in Hamburg entsteht, berücksichtigt wird.

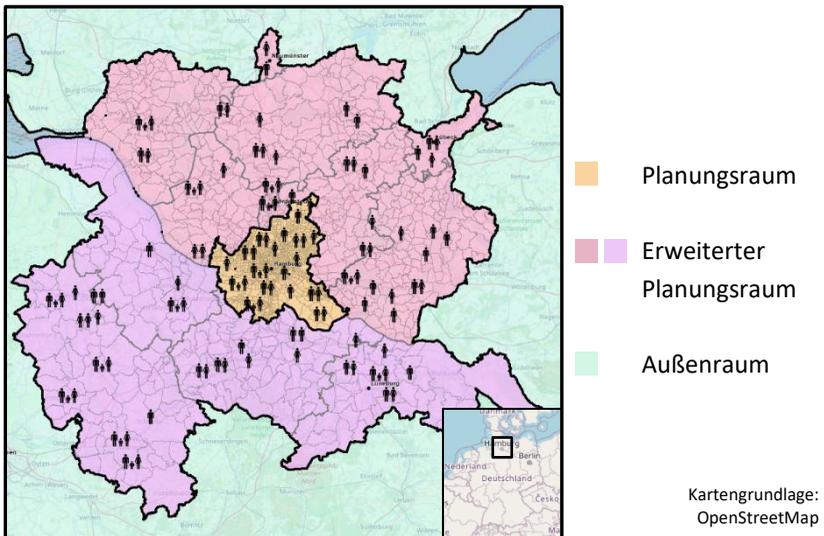


Abbildung 9 Modellraum

Für die Sollverteilung der Bevölkerung werden Daten der statistischen Landesämter (Statistikamt Nord und Landesamt für Statistik für Niedersachsen) herangezogen. Die von diesen Quellen verwendeten Randsummen sind Alter, Geschlecht und Haushaltsgröße. Insbesondere für Hamburg selbst liegen diese auf kleinräumiger Ebene (statistische Bezirke oder Stadtteile) vor. Die Bevölkerung wird aus den Daten der MiD 2017

gezogen, wobei jeweils nur Personen gezogen werden, die selbst aus dem gleichen Raumtyp wie die zu modellierende Verkehrszelle stammen. Für diese Zuordnung wurde die Klassifizierung der regionalstatistischen Raumtypologie des BMVI verwendet (RegioStaR 7). Hiermit werden die Soziodemographie sowie logisch passende Haushalte generiert. In Abbildung 10 sind Auswertungen der synthetischen Bevölkerung dargestellt: Während Personenagenten unter 20 Jahre meistens in Haushalten mit mindestens drei Personen leben, wohnen Ältere vielfach in 1- und 2-Personen-Haushalten.

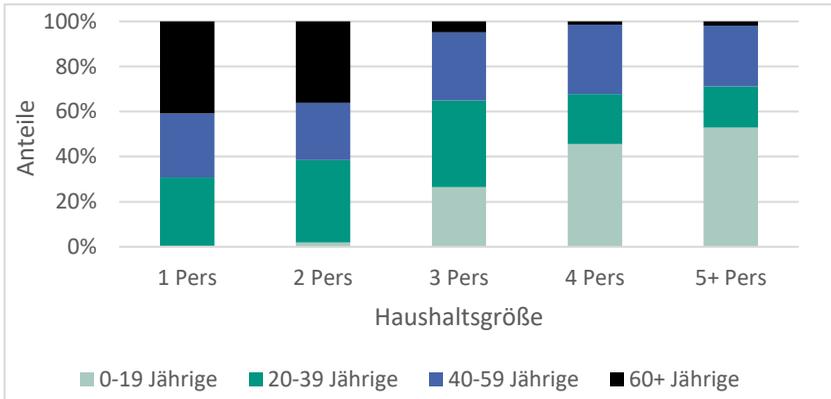


Abbildung 10 Anteile der Altersgruppen je Haushaltsgröße (Bevölkerung Stadt Hamburg)

Die Aktivitäten werden durch das Modell actiTopp ergänzt (vgl. Abschnitt 3.1.10). Hierbei werden die Personen- und Haushaltseigenschaften einschließlich der Wohnumgebung berücksichtigt. Die Auswertung der Aktivitäten nach Beschäftigungsart zeigt, dass sich die Aktivitäten deutlich zwischen verschiedenen Personengruppen unterscheiden (vgl. Abbildung 11). actiTopp basiert auf Daten des MOP. Obwohl eine andere Datengrundlage vorliegt, zeigt ein Vergleich zwischen Modell und MiD 2017, dass das Modell die Aktivitäten sehr gut wiedergeben kann (vgl. Abbildung 12).

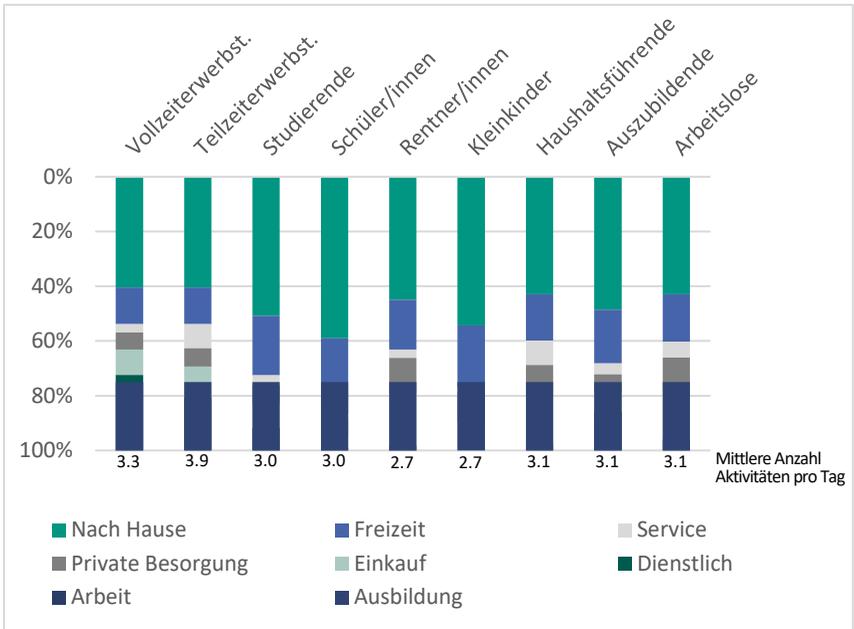


Abbildung 11 Verteilung und Anzahl der Aktivitäten nach Beschäftigung (Bevölkerung Stadt Hamburg)

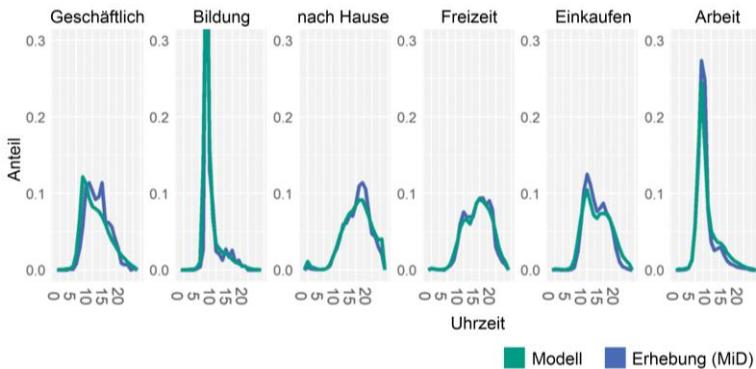


Abbildung 12 Ganglinien der Aktivitäten (Vergleich zwischen Modell und Erhebung)

Zusätzlich zu den Einwohnerinnen und Einwohnern Hamburgs und des Umlands werden Personen simuliert, die Hamburg als Ziel einer geschäftlichen oder touristischen Reise haben. Hierzu wurde das mobiTopp-Modul touriTopp verwendet (Ulrich et al. 2022). Dabei wird auf Grundlage von Übernachtungszahlen von Beherbergungsbetrieben, weiteren touristischen Erhebungen sowie den erhobenen Aktivitäten aus Mobilitätsenerhebungen die Wege dieser Personen in Hamburg abgebildet. Sowohl Reisen mit Übernachtung als auch Tagesreisen ohne Übernachtung werden damit modelliert. Etwa 700.000 Personen, respektive Agenten, wurden dem Modell auf diese Weise hinzugefügt.

Mobilitätswerkzeuge und Mitgliedschaften bei Mobilitätsanbietern

Als Mobilitätswerkzeuge sind Pkw-Besitz und Besitz einer ÖV-Zeitkarte sowie Mitgliedschaften bei Mobilitätsanbietern mit jeweils separaten Teilmodellen ergänzt worden (siehe Abbildung 13).



Abbildung 13 Modellierte Mobilitätswerkzeuge und Mitgliedschaften

Die Parameterwerte für diese Modelle wurden auf Basis empirischer Daten mittels Schätzungsverfahren erstellt. Grundlage für die Modellschätzung bildet bei den Mitgliedschaftsmodellen von E-Scootersharing und MOIA die Projektbefragung. Für alle weiteren Modelle wurde die MiD 2017 als Grundlage verwendet. Zusätzlich wurden aus verschiedenen Datenquellen Daten zur Raumstruktur aufbereitet und entsprechend der

Wohnortinformation in der jeweiligen Erhebung den bestehenden Datensätzen zugespielt. Zu diesen Raumstrukturvariablen gehören:

- Räumliche Ausprägung der Bedienegebiete der Mobilitätsdienste
- Landnutzungsinformationen
- Art und Menge von Points of Interest
- Straßendichte nach Straßentyp
- Zugang und Qualität des ÖV

Für alle Mobilitätswerkzeuge wurden multinomiale Logit-Modelle verwendet, da diese im Vergleich zu anderen Modellarten die beste Modellgüte hatten.

In der Schätzung wurden folgende Parameter als signifikant identifiziert, welche daher im Modell verwendet werden:

- Soziodemographie (Person und/oder Haushalt)
- Raumstruktur des Wohnorts (siehe Auflistung zuvor)
- Besitz/Mitgliedschaft anderer Mobilitätswerkzeuge
- Verfügbarkeit des modellierten Mobilitätswerkzeugs (über Bedienegebiete)

Die Kalibrierung erfolgte zum einen anhand der gesamten Verteilung mit den gewichteten Werten der MiD 2017 (z. B. Anzahl der Bikesharing-Mitglieder). Zum anderen wurden die Modelle hinsichtlich berücksichtigter Einflussgrößen mit gewichteten Werten der MiD 2017 kalibriert (z. B. Abgleich der Einkommensverteilung der Bikesharing-Mitglieder zwischen Modell und Erhebung). Außerdem wurden exogene Vergleichsgrößen zur Kalibrierung und Validierung herangezogen, insbesondere: Anzahl gemeldeter Pkw laut Kraftfahrtbundesamt (KBA), Anzahl verkaufter Zeitkarten im Hamburger Verkehrsverbund (HVV), Anzahl recherchierter und angefragter Anzahl von registrierten Kundinnen und Kunden bei ausgewählten Mobilitätsdiensten.

Die Gesamt mengen der zugewiesenen Mobilitätswerkzeuge sind für die Hamburger Bevölkerung in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2 Mobilitätswerkzeuge und Mitgliedschaften bei Mobilitätsanbietern bei der Hamburger Stadtbevölkerung (gerundet)

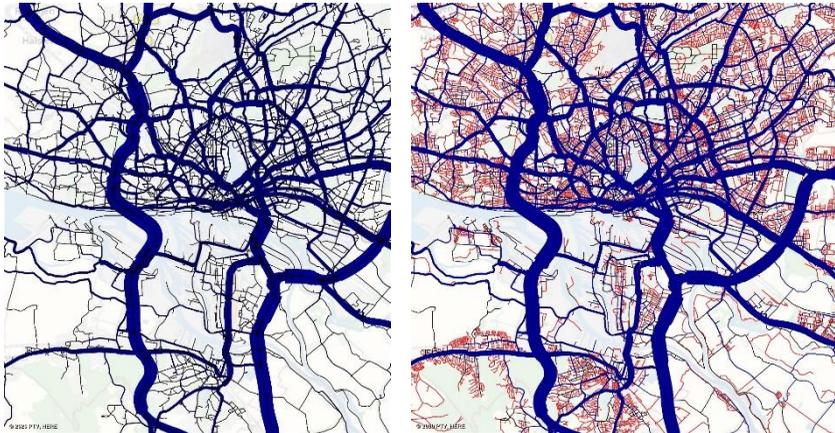
Haushalte (N=1.042.000)	
Besitz von Pkw	0 Pkw: 453.000 1 Pkw: 492.000 2 und mehr Pkw: 97.000
Personen (N=1.871.000)	
Mitglieder bei stationsbasiertem Carsharing	24.000
Mitglieder bei free-floating Carsharing	255.000
Mitglieder bei E-Scootersharing	284.000
Mitglieder bei Bikesharing	310.000
Mitglieder bei MOIA	54.000 "aktive" 74.000 "registrierte"
Besitz eines Fahrrads (aus Haushaltsziehung)	1.404.000
Besitz einer ÖV-Zeitkarte	726.000
Besitz einer Pkw-Fahrerlaubnis (aus Haushaltsziehung)	1.425.000

Zu beachten ist, dass diese modellierten Werte nicht direkt mit den Angaben aus anderen Quellen vergleichbar sind. In der Realität setzt sich beispielsweise die Menge der ÖV-Zeitkarten aus Fahrscheinen unterschiedlicher Gültigkeitsdauer zusammen (Jahreskarte, Monatskarte, Wochenkarte, ...). Im Modell werden diese unterschiedlichen Zeitkarten für eine durchschnittliche Woche berücksichtigt.

Verkehrsangebot

Das Pkw-Verkehrsnetz im Verkehrsmodell basiert auf dem Netz der Stadt Hamburg, das für dieses Projekt zur Verfügung gestellt wurde. Es wurde in diesem Projekt verfeinert, um insbesondere MOIA-Routen feiner abbilden zu können. Darüber hinaus erfolgte die Umlegung mit der Pkw-Nachfrage aus

dem mobiTopp-Modell, ergänzt mit der Nachfrage aus dem städtischem Verkehrsmodell zum Lkw-Verkehr, wodurch zeitlich feiner aufgelöste und wochentagspezifische Belastungen abgebildet werden können. Es wurden je Wochentag zwölf Zeitscheiben je 2 h berechnet.



Städtisches Verkehrsmodell

Verdichtetes Netz (rot = Verfeinerung)

Abbildung 14 Pkw-Verkehrsnetz

Das ÖV-Verkehrsnetz basiert auf dem HVV-Fahrplan 2020. Es wurde ein Extrakt aus einer möglichst störungsarmen Zeit gewählt (Soll-Fahrplandaten mit Stand Januar 2020 für Ende November 2020). Die GTFS-Daten wurden in Visum eingelesen und durch Daten des Verkehrsmodells der Stadt Hamburg für Bereiche außerhalb des HVV ergänzt. Die ÖV-Ticketpreise wurden mit Stand 2020 entsprechend den HVV-Einzelfahrscheinen erstellt, für Gebiete außerhalb des HVV vereinfacht luftlinienbasiert. Wie für den MIV sind mittels PTV Visum die ÖV-Reisezeiten in 12 Zeitscheiben je Wochentag getrennt. Ein Ausschnitt des Netzes ist in Abbildung 15 dargestellt, hierin sind alle Haltestellen des Netzes visualisiert.

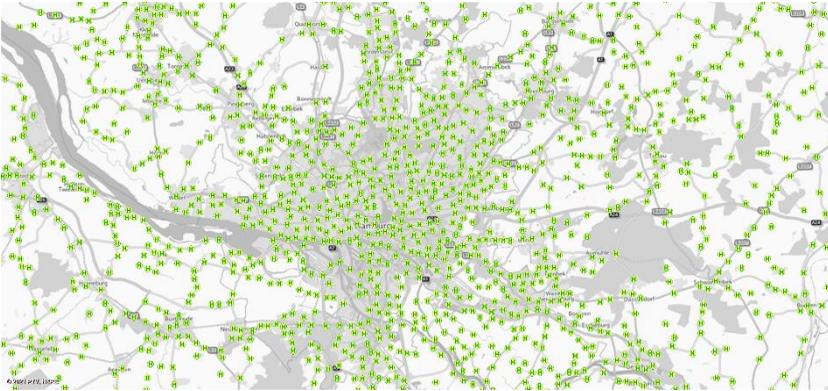


Abbildung 15 Haltestellen (Haltepunkte) im ÖV-Netz

Für die Ermittlung der Reisezeiten für die Verkehrsmittel zu Fuß und Fahrrad wurden jeweils Netze auf Basis von OpenStreetMap-Daten in PTV Visum eingelesen und aufbereitet (siehe Abbildung 16). Für den Radverkehr wird auf Radverkehrsanlagen eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 16 km/h angenommen, auf Fußwegen von 5 km/h. Für den Fußverkehr werden durchgehend 5 km/h angenommen.

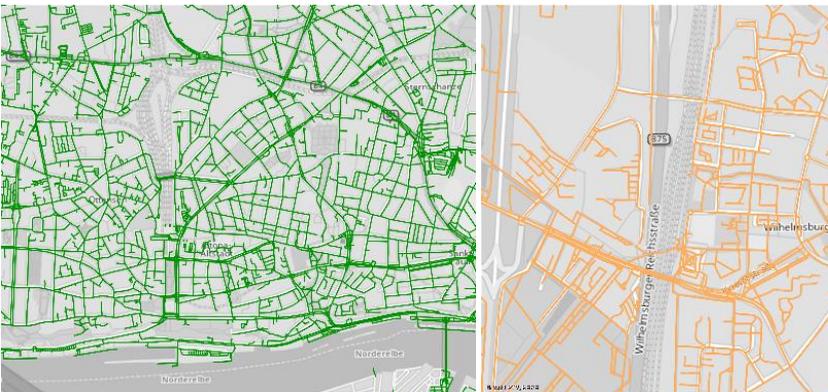
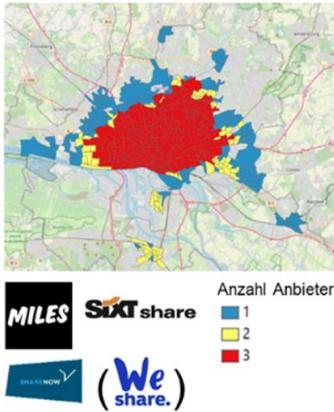
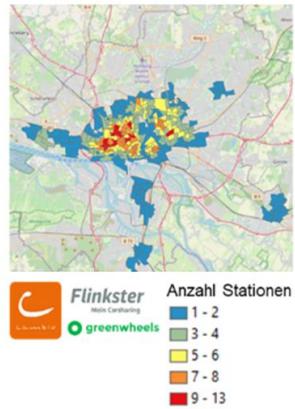


Abbildung 16 Ausschnitt Rad- und Fußnetz

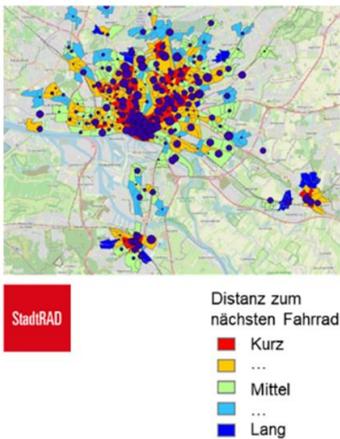
Carsharing - free-floating



Carsharing - stationsbasiert



Bikesharing



E-Scooter

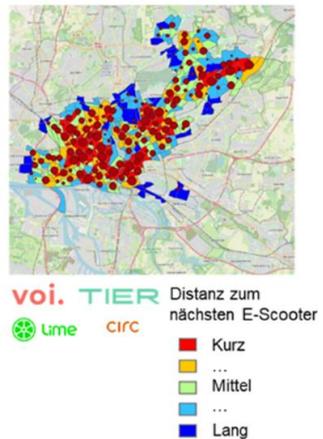


Abbildung 17 Angebote der Mobilitätsdienstleistungen

Auch neuartige Mobilitätsangebote sind detailliert im Modell enthalten. Rund 200 Pkw an 126 Stationen sind im stationsbasierten Carsharing berücksichtigt sowie rund 2.000 Pkw als Teil der free-floating Carsharing-Angebote. Auch das Bikesharing-Angebot (StadtRAD) wird mikroskopisch mit den etwa 2.900 Fahrrädern an rund 250 Stationen abgebildet. Das E-Scootersharing-Angebot wird unter Berücksichtigung der Angebotsdichte und des Bediengebiets der größten Anbieter abgebildet. Einen Überblick über die modellierten Mobilitätsdienstleistungen gibt Abbildung 17.

Wege Zwecke, Attraktivitäten und Zielwahlmodell

Im Modell wird zwischen 17 verschiedenen Aktivitäten unterschieden, welche den Wegezweck auf dem Weg zur Aktivität definieren. In folgender Aufzählung sind diejenigen Wege kursiv dargestellt, deren Ort bereits im Langfristmodul fest zugeordnet wird.

- *Zu Hause/in touristischer Unterkunft*
- *Arbeiten/dienstlich*
- Service/private Erledigung / Besuch
- *Bildung: Grundschule/weiterführende Schule/Hochschule*
- Einkaufen: täglicher Bedarf/sonstiger Bedarf
- Freizeit: innen/allgemein außen/Sightseeing/spazieren
- *Flugreise: privat/dienstlich*

Attraktivitäten für Einkaufs-, Freizeit- und Besorgungswege konnten nach der Methodik von Klinkhardt et al. (2021) durch OpenStreetMap gewonnen werden. Exemplarisch zeigt dies Abbildung 18 für den Wegezweck Einkaufen täglicher Bedarf.



Abbildung 18 Erzeugung der Attraktivitäten auf Basis von POI am Beispiel des Wege zwecks Einkäufen täglicher Bedarf

Die Verteilung der Arbeitsplätze basiert zum einen auf den Pendelmatrizen der Agentur für Arbeit, zum anderen konnte das Merkmal Anzahl Erwerbstätige aus dem städtischen Verkehrsmodell zur Berechnung der Attraktivität verwendet werden. Die Attraktivität von Bildungszielen wurde durch das städtische Verkehrsmodell sowie weitere Daten generiert.

Zur Schätzung der Parameter des Zielwahlmodells wurden die Daten aus der MiD 2017 (B3-Datensatz), die Reisezeitmatrizen der unterschiedlichen Verkehrsmittel sowie die oben genannten Attraktivitäten zugrunde gelegt. Für die räumliche Feinverteilung der Ziele (unterhalb der Zellenebene) wurden Flächennutzungsdaten des Urban Atlas 2018 (European Environment Agency) verwendet.

Die in der Nutzenfunktion enthaltenen Einflussgrößen sind die Erreichbarkeit abgebildet durch die Reisezeiten mit den verschiedenen Verkehrsmitteln

(mittels Logsumme zu Fuß, Rad, ÖV sowie Pkw), der Wegezweck sowie die Parameter, die den Einfluss soziodemographischer Größen (hier Alter, Erwerbstätigkeitsstatus, ökonomischer Status, Zeitkartenbesitz) auf den Nutzen abbilden. Wie in Abschnitt 3.2.1 erwähnt, wird neben dem Ziel für die nächste Aktivität auch das jeweils nächste feste Ziel beachtet. Die Zielwahl wurde anhand der Wegelängenverteilung der MiD 2017 kalibriert.

Verkehrsmittel und Verkehrsmittelwahlmodell

Den Agenten stehen im Verkehrsmodell bis zu zehn verschiedene Verkehrsmittel zur Verfügung; Abbildung 19 zeigt diese.

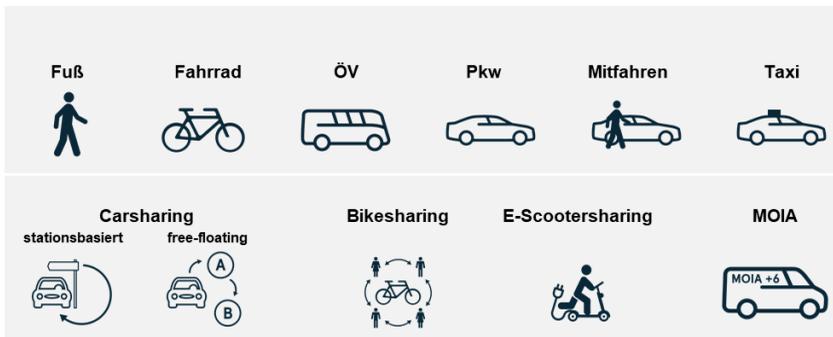


Abbildung 19 Im Modell integrierte Verkehrsmittel

Zur Schätzung des Verkehrsmittelwahlmodells wurden die Daten der MiD 2017 (B3-Datensatz) aus dem Planungsraum (Revealed Preference) sowie die Daten der Verkehrsmittelwahlexperiments der im Projekt durchgeführten Onlinebefragung verwendet. Insbesondere die Daten zur Nutzung der geteilten Mobilitätsangebote sind aufgrund ihres neuartigen Charakters und einer Stichprobe, die viel Erfahrung mit diesen Diensten im Alltag gesammelt hat von besonders hohem Wert für das Modell. Die Daten der Onlinebefragung enthalten bereits alle für die Wahlentscheidung relevanten Optionen, zudem können die soziodemographischen Daten aus der Befragung zugespielt werden. Bei der MiD 2017 wurden für die Daten der

Verkehrsmittelalternativen die für das Verkehrsmodell erzeugten Reisezeitmatrizen verwendet.

Ein Cross-Nested-Logit-Modell lieferte bei der Parameterschätzung die beste Modellgüte. Nested-Logit-Modelle berücksichtigen im Vergleich zu herkömmlichen Logit-Modellen die Korrelation zwischen verschiedenen Alternativen. Korrelierende Alternativen werden in einem Nest zusammengefasst. Bei einem Cross-Nested-Logit-Modell können bestimmte Alternativen anteilig verschiedenen Nestern zugeordnet werden. Hiermit sind die Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Verkehrsmitteln und die Verlagerungen zum Ridepooling-Dienst besonders detailliert abbildbar. Die Neststruktur des Verkehrsmittelwahlmodells zeigt Abbildung 20.

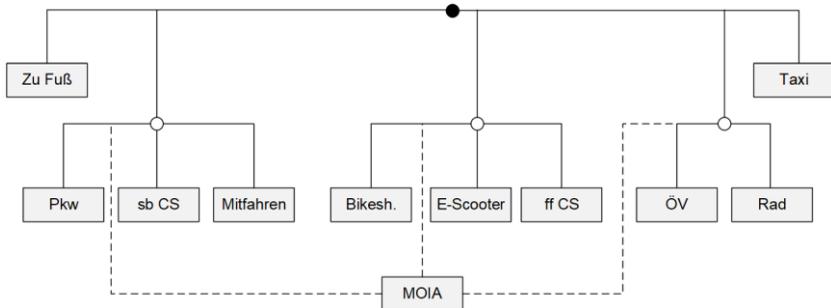


Abbildung 20 Neststruktur des Verkehrsmittelwahlmodells

In die Wahlentscheidung einfließende Parameter sind insbesondere:

- Reisezeit (als Summe von Zu- und Abgangszeit sowie Warte- und Fahrzeit)
- Wegezweck
- Fahrtkosten
- Uhrzeit
- ÖV-Zeitkarte
- Pkw im Haushalt

- Geschlecht
- Alter
- Ökonomischer Status
- Parkdruck am Ziel

MOIA steht – wie die anderen Mobilitätsangebote – nur denjenigen Personen zur Verfügung, die hierfür registriert sind (sog. Userbase). Für MOIA wurden unterschiedliche Nutzenparameter identifiziert, abhängig davon, ob die Person MOIA regelmäßig oder nur gelegentlich nutzt. Diese unterschiedlichen Verhaltensweisen werden im Modell durch eine Unterteilung in zwei Gruppen berücksichtigt: registrierte sowie aktive Mitglieder. Registrierte Personen sind zu verstehen als Personen, die die App installiert haben und sporadisch MOIA nutzen. Aktive Personen besitzen eine Affinität, den Dienst regelmäßiger zu nutzen (im Mittel mindestens einmal pro Woche).

Die Verkehrsmittelwahl ist intermodal modelliert: als Zubringer zum ÖV kann nicht nur zu Fuß gegangen werden, sondern es können auch die Verkehrsmittel Fahrrad, Pkw, Taxi, MOIA, E-Scooter und Bikesharing genutzt werden. Die Erreichbarkeit des ÖV mit diesen Zu- und Abgangsverkehrsmitteln fließt in die Wahlentscheidung ein. Wird ÖV gewählt, erfolgt anschließend die Wahl des Zu- und des Abgangsverkehrsmittels. Die Daten zur Schätzung dieses Modells stammen aus der MiD 2017 (Etappendatensatz), der Onlinebefragung sowie einer spezifischen Erhebung des KIT-IfV über Zu- und Abgangsverkehrsmittel (vgl. Wörle et al. 2021).

Kalibrierung

Die nicht in den Daten der statistischen Ämter enthaltenen Merkmale wurden mit den Daten aus der MiD 2017 (B1-Datensatz) kalibriert und soweit möglich weitere Einschätzungen bzw. Validierungen mit weiteren Datenquellen durchgeführt (MOP, KBA, Fahrscheinverkäufe u. a.). Die Simulation (Ziel- und Verkehrsmittelwahl) wurde ebenfalls mit MiD 2017 (B3-Datensatz) kalibriert. Da in Hamburg eine große Aufstockungstichprobe der MiD 2017 erhoben

wurde, konnte die MiD 2017 im Rahmen dieses Projekts sinnvoll eingesetzt werden.

Übersicht verwendeter Daten

Eine Übersicht der wichtigsten im Verkehrsnachfragemodell verwendeten Daten ist in Tabelle 3 aufgeführt. Darüber hinaus wurden für einzelne weitere Fragestellungen sowie zur Kontrolle weitere Daten verwendet. Für Informationen zu Daten, die im Tourismusmodul eingesetzt werden, siehe Ulrich et al. (2022).

Tabelle 3 Eingangsdaten für das Verkehrsnachfragemodell (Auswahl)

Datensatz (ggf. Stand)	Herkunft	Verwendung für
Mobilität in Deutschland 2017 (B1- und B3-Datensatz)	BMVI (Nobis und Kuhnimhof 2018)	Haushaltsziehung, Verkehrsmittel- und Zielwahlmodelle, Mobilitätswerkzeuge, Strukturgrößen
Deutsches Mobilitätspanel (2004 - 2019)	BMVI (Ecke et al. 2020)	Aktivitätenpläne
Verkehrsmodell Stadt Hamburg (2019, 2021)	Stadt Hamburg - BVM	Verkehrsangebot, Strukturgrößen, Wirtschaftsverkehr
Pendelmatrizen (2019)	Bundesagentur für Arbeit	Arbeitsplätze
Bevölkerungsmerkmale (2019)	Landesämter für Statistik	Sollverteilungen der Bevölkerung
OpenStreetMap (2019/2020)	OpenStreetMap	Attraktivitäten, Verkehrsangebot (Netz)
GTFS-ÖV-Fahrplan (2020/2021)	Hamburger Verkehrsverbund	Verkehrsangebot
Bediengebiete etc. der Mobilitätsdienste (2019/2020)	Anbieter von Car-, E-Scooter- und Bikesharing	Verkehrsangebot
Projektbefragung (2019)	MOIA Begleitforschung	Mobilitätswerkzeuge, Verkehrsmittelwahlmodell

3.2.2 Simulation des Betriebs von MOIA

Der Betrieb von MOIA wird mit der Flottensimulation FleetPy abgebildet. Die Eingangsgrößen der Flottensimulation wurden so gewählt, dass der Status quo (ca. Ende 2019) der MOIA-Flotte in Hamburg möglichst genau in diesem Simulationsmodell abgebildet wird. Im Kalibrierungsprozess wurden Simulationsparameter der Flottensimulation angepasst, um eine Woche im

November 2019 möglichst genau nachzubilden. Als Vergleichsdaten standen zur Verfügung:

- Infrastruktur, Bediengebiet, Zusteigepunkte und Depots mit Park- und Ladeplätzen
- Buchungsdaten mit Fahrtcharakteristika
- Aggregierte Flotten-KPI
- Austausch mit MOIA zur Funktionsweise des verwendeten Zuweisungs- und Repositionierungsalgorithmus
- Zeitabhängige Anzahl von in Betrieb befindlichen Flottenfahrzeugen
- Attribute der Flottenfahrzeuge (Sitzplätze, Reichweite)
- Vereinfachtes Preismodell mit zeitlichem Verlauf des nachfrageabhängigen Preisfaktors

Eingangsgrößen der Flottensimulation

Abbildung 21 zeigt Infrastruktureingangsparameter für die Flottensimulationen von MOIA auf dem Stand November 2019. Zusteigepunkte innerhalb des Bediengebietes 1 (BG-1) wurden auf Grundlage der zur Verfügung gestellten Daten den nächstmöglichen Netzwerkknoten zugewiesen. Vereinfachend wurden nur diejenigen fünf MOIA-Depots in der Simulation abgebildet, die auch über Ladeinfrastruktur verfügen.

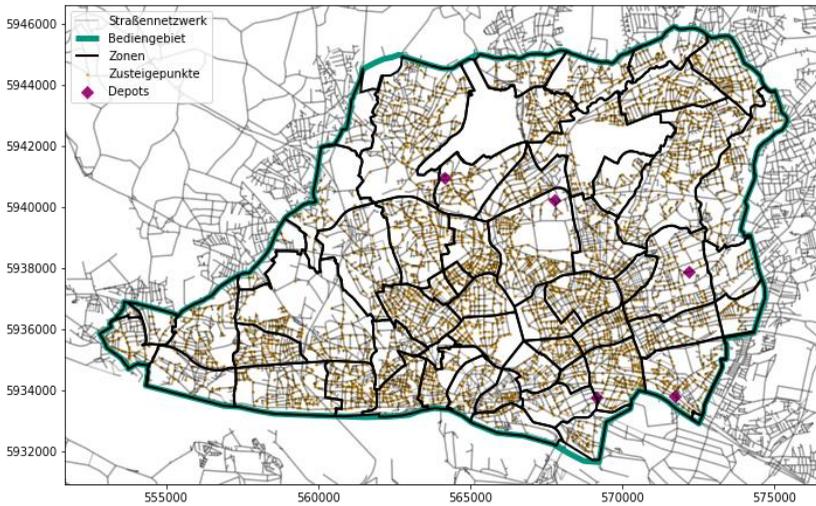


Abbildung 21 Bediengebiet, Zonen, Zusteigpunkte und Depots für den simulierten MOIA-Betrieb im Status quo (ca. Ende 2019)

Im Status quo sind maximal 250 MOIA-Fahrzeuge im Einsatz. Im realen Betrieb ändert sich jedoch die Anzahl der für den Service verfügbaren Fahrzeuge dynamisch in Abhängigkeit von Servicezeiten und Schichtplanung von MOIA. Um dies in der Simulation darzustellen, wurde aus den Daten die zeitabhängige Anzahl verfügbarer Fahrzeuge ausgewertet. Den Anteil der im Wochenverlauf zur Verfügung stehenden Fahrzeuge zeigt Abbildung 22. Basierend auf diesem Verlauf, werden in der Simulation zeitabhängig Fahrzeuge mit Fahrpersonal in die Depots gesendet oder aus diesen reaktiviert. Für Szenarien mit autonomen Fahrzeugen wird diese Bedingung fallen gelassen und angenommen, dass die Fahrzeuge konstant zur Verfügung stehen.

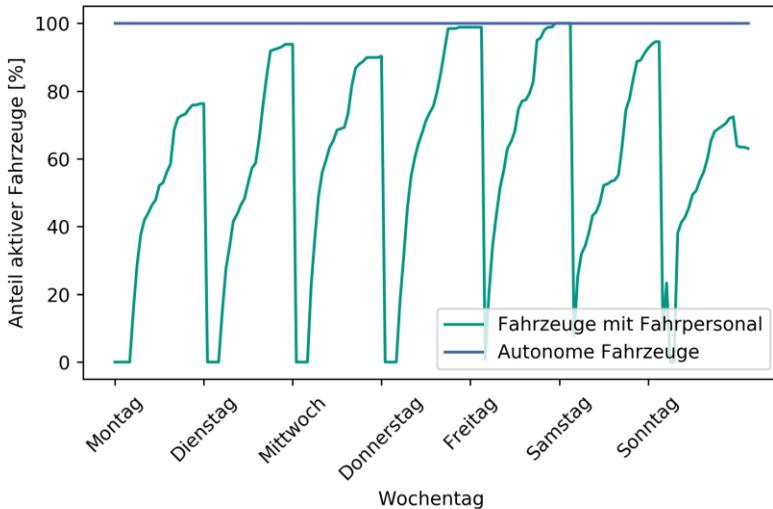


Abbildung 22 Anteil aktiver Flottenfahrzeuge im Wochenverlauf

Kalibrierung der Flottensimulation

Zunächst wurde die Flottensimulation, unabhängig von mobiTopp, so kalibriert, dass die simulierte Flotte die Fahrten aus den Buchungsdaten analog zu der realen MOIA-Flotte abbildet.

Für die realistische Darstellung des Ridepooling-Betriebs müssen auch Repositionierungen im Simulationsmodell durchgeführt werden. Während ein Betreiber in Wirklichkeit historische Daten nutzen kann, um die zukünftige Nachfrage abzuschätzen und um Fahrzeuge proaktiv zu verteilen, stehen diese Informationen aufgrund der Architektur des Simulationsmodells nicht zur Verfügung. Um dennoch Fahrzeuge nach erwarteter Nachfrage zu verteilen und um realistische Verfügbarkeiten abzubilden, wurden Attribute des mobiTopp-Modells als Abschätzung der erwarteten Nachfrage gewählt. Ziel der Repositionierung war, Fahrzeuge so zu verteilen, dass ihre Dichte der normierten Verteilung von MOIA-Nutzenden und Attraktivitäten für alle Wegezwecke (vgl. Abschnitt 3.2.1) pro Zelle entspricht. Dieser Ansatz hat im

Validierungsprozess gute Ergebnisse im Vergleich mit realen Flotten-KPI erbracht. Die kalibrierten Parameter sind in Tabelle 4 zu finden.

Tabelle 4 Kalibrierte Flottenparameter

Parameter	Wert
Maximale Wartezeit t_{max}^{late}	12 min
Maximaler relativer Umwegfaktor Δ_{rel}	40 %
Maximaler absoluter Umweg Δ_{abs}	5 min
Dauer eines Ein-/Ausstiegsprozesses t_B	2 min
Repositionierungsintervall T_{repo}	12 min
Kritischer Ladezustand s_{crit}	10 %

Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der Kalibrierung mit den beschriebenen Flottenkontrollparametern. Als Anfragen wurden reale Anfragen von MOIA verwendet, die mit einem Angebot von MOIA beantwortet wurden; unabhängig davon, ob sie auch bedient wurden oder ein Angebot abgelehnt haben. In der Simulation lehnen diejenigen ein Angebot automatisch ab, wenn sie dies auch in den Daten getan haben. Am Anteil von Anfragen mit Angebot und bedienten Fahrgästen ist zu erkennen, dass eine Verfügbarkeit wie im Realbetrieb dargestellt werden kann. Wartezeiten sind in der Simulation etwa eine Minute geringer, was in einem komplexen Ridepooling-System an einer Vielzahl von Gründen liegen kann, wie z. B. Reaktionszeiten von Fahrpersonal auf neue Aufgaben im Realbetrieb. Fahrt- und Umwegzeiten werden sehr gut getroffen. Ein etwas kürzerer Laufweg ist darauf zurückzuführen, dass in der Simulation alle Start- und Zielpositionen auf dem nächsten Netzwerkknoten liegen. Im Realbetrieb werden Laufwege von beliebigen Positionen berechnet.

Tabelle 5 Vergleich zwischen Simulation der Flottensimulation und Realdaten

Parameter	Simulation	MOIA real
Anteil Anfragen mit Angebot [%]	99,1	100,0
Anteil bediente Fahrgäste [%]	98,9	100,0
Durchschnittliche Wartezeit [min]	4:05	5:09
Durchschnittliche Fahrtzeit [min]	19:54	19:23
Durchschnittlicher relativer Umweg [%]	29.0	30.7
Durchschnittlicher absoluter Umweg [min]	4:46	4:29
Durchschnittlicher Laufweg [m]	77	120

3.3 Szenarien der Simulationsstudie

Im Rahmen der Simulationsstudie sollen die Eigenschaften und Wirkungen von Ridepooling unter neuen Rahmenbedingungen erforscht werden. Daher wurden vier in der Zukunft liegende Szenarien entwickelt, die mögliche Pfade in die Zukunft aufzeigen. Der Zustand ca. Ende 2019 (Status quo) und vier Zukunftsszenarien stehen im Fokus der Simulationsstudie der MOIA Begleitforschung. Innerhalb der Szenarien werden der MOIA-Service und die verkehrlichen Rahmenbedingungen jeweils unterschiedlich ausgestaltet.

3.3.1 Übersicht über die Simulationen

In SimA (Status quo) wird der Zustand in Hamburg um die Jahre 2019/2020 modelliert – vor der Coronapandemie. Die Einwohnerzahl in Hamburg beträgt ca. 1,87 Mio. – hinzu kommen die Einwohnerinnen und Einwohner aus dem Umland sowie die geschäftlich und touristisch Reisenden. Das MOIA-Bediengebiet BG-1 umfasst weite Teile der Stadt nördlich der Elbe (190 km²) – nicht nur die Innenstadt, sondern auch viele weitere Stadtteile. Die äußeren Grenzen sind in südwestlicher Richtung Blankenese, nordwestlich Niendorf, nordöstlich Wellingsbüttel und südöstlich Horn (siehe Abbildung 21).

In den Szenarien SimB bis SimE wird der Blick in die Zukunft gerichtet: Ein Bevölkerungswachstum findet statt (auf 1,95 Mio. Personen), das

Verkehrsangebot wird fortgeschrieben (Details hierzu siehe 3.3.3). Weiterhin werden in den Szenarien den MIV betreffende regulatorische Maßnahmen etabliert (siehe 3.3.4) und die Eigenschaften des MOIA-Services variiert (siehe 3.3.2). SimD und SimE liegt die Annahme zugrunde, dass der Service mit autonomen Fahrzeugen bewerkstelligt wird. Dadurch steht im Modell die komplette Flotte dauerhaft zur Verfügung und wegen einer günstigeren Kostenstruktur kann der Service auch zu einem geringeren Preis angeboten werden.

Tabelle 6 Szenarien der Simulationsstudie

	SimA (Status quo)	SimB	SimC	SimD	SimE
Bevölkerung	Stand 2019	Fortschreibung			
Verkehrsangebot ÖV, MIV, Rad	Stand 2019/ 2020	Fortschreibung			
Push-Maßnahmen MIV	-	-	Leicht	-	Stärker
MOIA- Bediengebiet	BG-1	BG-1	BG-2	BG-2	BG-3
MOIA-Service	Mit Fahrpersonal			Autonom	
MOIA-Preis	Regulär			Halbiert	
MOIA-Flottengröße	250	500	1.200	2.500	5.000

3.3.2 Variation des MOIA-Services

In den Szenarien wird angenommen, dass der Ridepooling-Dienst MOIA ausgebaut wird. Diese Annahme kann zum einen darauf gegründet werden, dass MOIA erst seit kurzer Zeit am Markt ist und deshalb die Nutzendenbasis noch wächst, zum anderen wird der Betrieb auch reagieren, wenn politische Maßnahmen zur Reduzierung des MIV umgesetzt werden, und wenn sich durch die Automatisierung der Fahrzeuge die Kostenstrukturen ändern.

Bediengebiet

Das MOIA-Bediengebiet wird in drei unterschiedlichen Größen abgebildet. BG-1 wurde bereits in Abschnitt 3.2.2 dargestellt (vgl. Abbildung 21). Im BG-2 (Abbildung 23) werden zusätzlich die Stadtteile Wilhelmsburg und Bergedorf eingeschlossen, es umfasst damit 350 km². MOIA ist jetzt auch südlich der Elbe verfügbar.

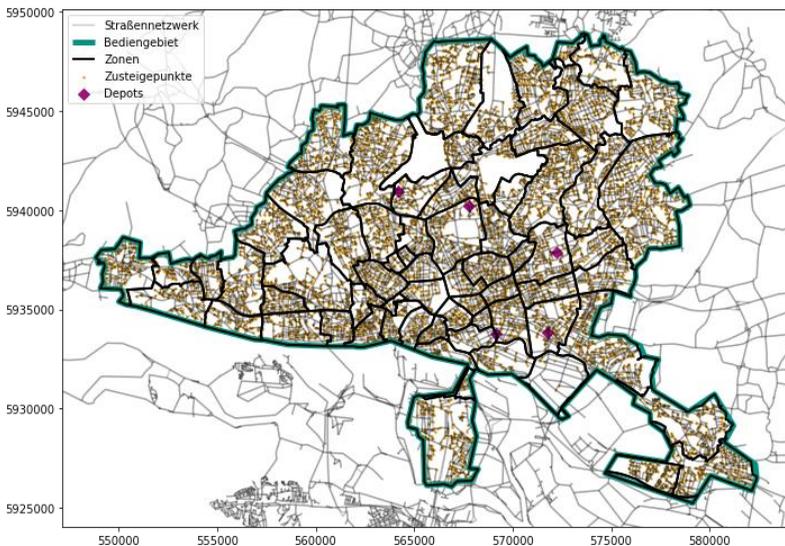


Abbildung 23 MOIA-Bediengebiet BG-2

Mit BG-3 (Abbildung 24) wird schließlich das gesamte Stadtgebiet zum MOIA-Bediengebiet, wodurch sich dieses auf einer Fläche von 700 km² erstreckt. Zusteigepunkte für den MOIA-Dienst wurden innerhalb der neuen Bediengebieten durch einen Algorithmus platziert, der zum Ziel hat, dass binnen 300 m Laufweg von jedem Netzwerkknoten aus drei Zusteigepunkte erreichbar sind. Dabei sind Knoten ausgenommen, die an Straßen mit einer erlaubten Geschwindigkeit von mehr als 50 km/h anschließen. Dadurch kann eine ähnlich dichte Verteilung von Zusteigepunkten wie im realen Betrieb

garantiert werden. Für das Bedienegebiet BG-3 wurden in Absprache mit MOIA weitere Depots mit Ladeinfrastruktur in den neu erschlossenen Randbereichen eingefügt, um kurze Anfahrtswege zu Lademöglichkeiten bereitzustellen.

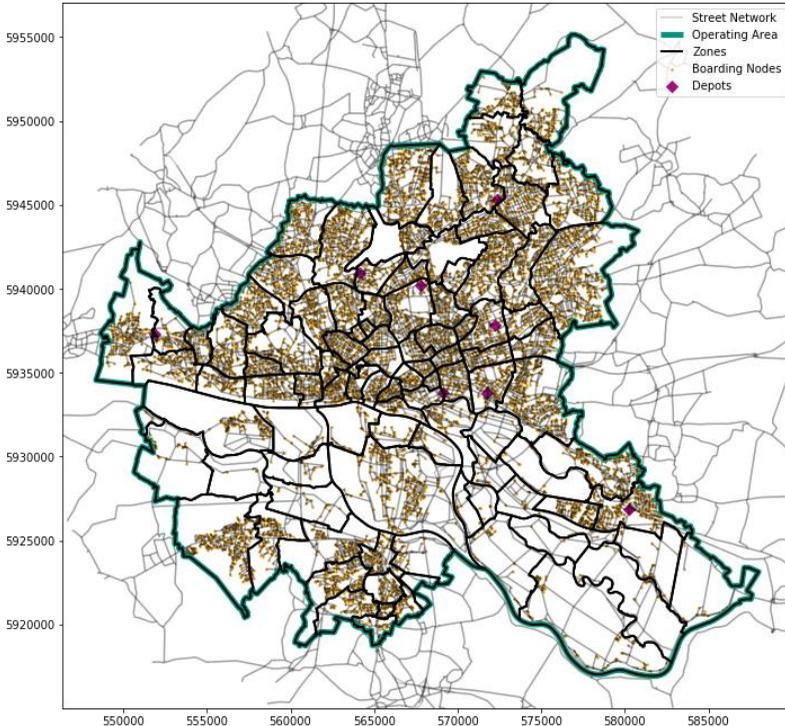


Abbildung 24 MOIA-Bedienegebiet BG-3

Flottengröße

Die absolute Anzahl von MOIA-Fahrzeugen wird über die Szenarien von 250 Flottenfahrzeugen bis zu 5.000 Flottenfahrzeugen variiert. Der Anteil dieser Fahrzeuge, die zu einer bestimmten Simulationszeit für den Service zur Verfügung steht, hängt von der Annahme ab, ob diese Fahrzeuge von

Fahrpersonal bedient werden oder es sich um autonome Fahrzeuge handelt. Handelt es sich um Fahrpersonal, sind Fahrzeuge nach den geplanten Schichten verfügbar. Werden autonome Fahrzeuge angenommen, sind diese immer für den Service verfügbar, sofern sie nicht zum Laden ins Depot zurückkehren.

Userbase

Das Verkehrsmittel MOIA steht in der Simulation nur Agenten zur Verfügung, die das Merkmal aktiver oder registrierter Fahrgast besitzen (sog. Userbase). Übertragen auf die Realität ist dies so zu verstehen, dass diese Personen MOIA aktiv in ihrer Verkehrsmittelwahl berücksichtigen. Eine Bedingung dafür ist insbesondere die Installation der MOIA-App auf dem Smartphone.

Die MOIA-Userbase wird für diese Simulationen analog zur Flottengröße skaliert, d.h. sie steigt mit größerer Flotte. Hierbei liegt die Annahme zugrunde, dass mit einer größeren Flotte der Dienst bekannter wird und daher mehr Personen MOIA als Option in ihrer Verkehrsmittelwahlentscheidung berücksichtigen. Die Flottengröße wurde wiederum in Abhängigkeit zu der Nutzung justiert, wobei der Optimierungsspielraum nicht ausgereizt wurde, sondern die Flottengröße wurde überschlägig mittels Simulationen bestimmt. Die Größe der Userbase in den unterschiedlichen Szenarien ist in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7 Userbase in den verschiedenen Szenarien

	SimA	SimB	SimC	SimD	SimE
Userbase [Pers.]	161.518	321.905	634.829	1.255.078	1.793.775
Davon wohnhaft in Hamburg [Pers.]	128.332	253.860	515.050	1.004.265	1.542.962

Preis

Der Fahrpreis in der Simulation spiegelt annähernd genau das originale Preismodell von MOIA im November 2019 wider. Dieses besteht grundsätzlich aus einem Grundpreis je Fahrt sowie einer kilometerbasierten Komponente. Das Preismodell enthält zusätzliche Rabatte für Gruppenfahrten und einen dynamischen Term, der den Fahrtpreis je nach Wochentag und Uhrzeit variiert. Dieser Term wurde aus Originaldaten abgeleitet. Im Falle der Szenarien mit autonomen Fahrzeugen wurde der Gesamtpreis pro Fahrt halbiert.

3.3.3 Ausbau des Verkehrsangebots

Das Verkehrsangebot in Hamburg wird sich in den nächsten Jahren weiterentwickeln. Daher werden im Verkehrsmodell auch bei anderen Verkehrsmitteln neben MOIA Veränderungen im Verkehrsangebot in den Szenarien SimB bis SimE im Modell berücksichtigt. Diese implementierten Veränderungen basieren auf den aktuellen Planungen der Stadt Hamburg, welche auch im Rahmen eines Workshops sowie im Austausch mit der BVM geschärft wurden.

Für den MIV werden die Neu- und Ausbautvorhaben der Autobahnen A7, A1 und A26 abgebildet, der autofreie Bereich der Innenstadt wird ausgeweitet, und streckenbezogen wird Tempo 30 auf bestimmten Hauptverkehrsstraßen eingeführt. Im ÖV werden folgende Ausbaumaßnahmen im Modell integriert:

jeweils erster Abschnitt der U- und S-Bahnlinien U5 und S4, Verlängerung der U4 und Einrichtung der S-Bahn-Station Ottensen. Zudem gibt es kleinere Anpassungen am Busnetz. Die weiteren Ausbauprojekte des sogenannten Hamburg-Takts mit einem sehr starken Ausbau des Busverkehrsnetzes sowie dem weiteren Ausbau des Schienenverkehrs gehen darüber hinaus. Sie sind nicht im Modell enthalten, da sie zum Zeitpunkt der Modellerstellung noch keine Detailplanung vorlag. Im Radverkehr werden die 14 geplanten Velorouten⁵ zum Netz hinzugefügt. Auf diesen werden Radfahrende gegenüber dem Kfz-Verkehr bevorrechtigt, daher werden sie statt mit 16 km/h mit einer erhöhten Streckengeschwindigkeit von 19 km/h abgebildet.

3.3.4 Regulatorische Maßnahmen im MIV

Im Szenario SimC mit leichten regulatorischen Maßnahmen im MIV wird angenommen, dass Parkplätze verknappt und an ausgewählten Straßen leichte Geschwindigkeitsreduktionen eingeführt werden. Hierdurch steigt neben der Reisezeit auch die Parksuchzeit sowie die Zu- und Abgangszeiten zum Pkw. Abgebildet wird dies im Modell durch folgende Anpassungen der Reisezeiten: Steigerung der Pkw-Reisezeiten für Hamburger Binnenwege um 25 % mit minimal fünf und maximal 15 Minuten. Ein Weg, der zuvor fünf Minuten dauerte (beispielsweise von der HafenCity zur Binnenalster), dauert somit jetzt zehn Minuten; ein Weg von zuvor 40 Minuten (beispielsweise von Wohldorf-Ohlstedt zur HafenCity), dauert somit jetzt 50 Minuten. Für Quell- und Zielverkehr von bzw. nach Hamburg wird jeweils angenommen, dass die Reisezeit um die Hälfte dieser Werte ansteigen wird.

Im Szenario SimE mit stärkeren regulatorischen Maßnahmen wird davon ausgegangen, dass der MIV in Hamburg noch stärker reguliert wird. Sowohl das Parken wird weiter erschwert, als auch das Fahren wird verlangsamt. Dies wird wie in SimC modelliert, allerdings mit erhöhten Werten: Steigerung der

⁵ <https://www.hamburg.de/fahrradfahren-in-hamburg/300372/velorouten/>

Pkw-Reisezeiten für Binnenwege in Hamburg um 50 % mit minimal zehn Minuten und maximal 30 Minuten zusätzlich. Zudem sind die Kosten ein effektiver Hebel zur Regulierung des städtischen MIV, dies kann zum Beispiel über die Kraftstoffpreise oder Parkgebühren erreicht werden. Im Modell wird dies durch eine Erhöhung der Kosten pro Kilometer im MIV um 30 % umgesetzt. Dieses Szenario liegt von einer weiter entfernten Zukunft, in der die Pkw-Nutzung aufgrund der getroffenen Maßnahmen über einen längeren Zeitraum hinweg unattraktiver als heute ist. Daher wird davon ausgegangen, dass die Pkw-Besitzquote sinkt. In Folge hiervon wird in dem Szenario neben den dargestellten Anpassungen von Reisezeit und Fahrtkosten eine Reduktion der Pkw-Anzahl in Hamburg um 20 % angenommen.

3.4 Mobilitätskenngrößen im Status-quo-Modell

Für die weitere Einordnung der Ergebnisse der Simulationsstudie werden zunächst grundlegende Eigenschaften des Status-quo-Modells (SimA) dargestellt. Es werden Ergebnisse des Status-quo-Modells sowie, soweit möglich, ein Vergleich zu externen Erhebungen dargestellt.

Aufteilung des Binnenverkehrs in Hamburg

Unter den in Hamburg zurückgelegten Binnenwegen werden im Modell 88 % (34 Mio. Wege) von Einwohnerinnen und Einwohnern Hamburgs durchgeführt. Die übrigen Wege teilen sich gleichmäßig auf die Agenten, die im Hamburger Umland wohnen (2,2 Mio. Wege), und die Agenten, die über das Tourismusmodul abgebildet werden (2,3 Mio. Wege), auf.

Wegelängen

In Abbildung 25 und Abbildung 26 sind die durchschnittlichen Wegelängen in unterschiedlichen Agentengruppen gegliedert. Es ist zu erkennen, dass die mittleren Wegedistanzen bei in Hamburg wohnenden Agenten deutlich geringer sind als bei denjenigen, die außerhalb wohnen. Den kleinsten Anteil an allen Wegen und auch die kürzesten Wege weisen die geschäftlich und touristisch Reisenden auf. In der Betrachtung der Fahrtweiten nach

Beschäftigungsstatus (Abbildung 26) wird erkennbar, dass die weiteren Distanzen hauptsächlich von Berufstätigen zurückgelegt werden.

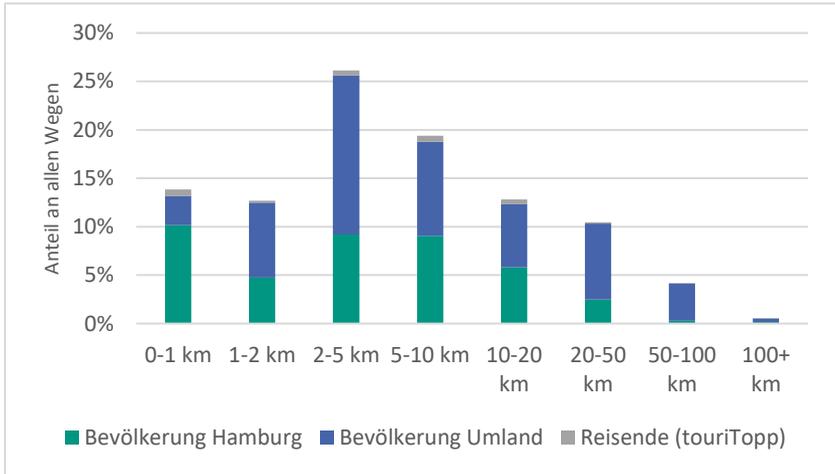


Abbildung 25 Weglängen nach Agententyp

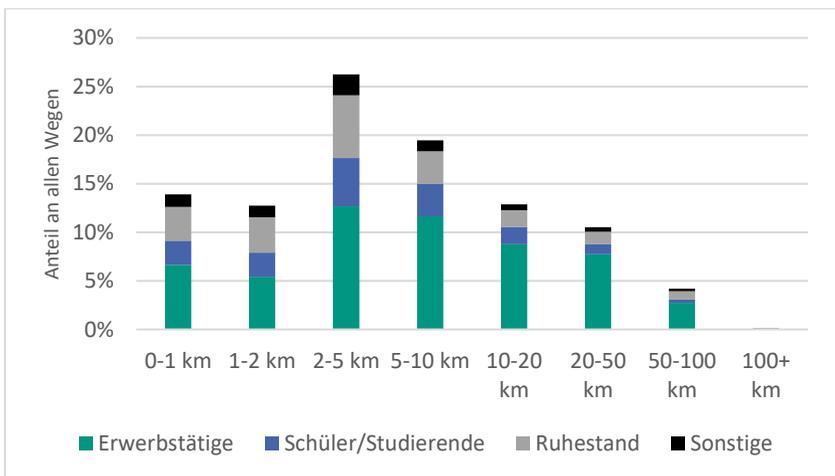


Abbildung 26 Weglängen nach Beschäftigungsstatus

Verkehrsmittelwahl

In Abbildung 27 ist die Verkehrsmittelnutzung nach Wegezwecken gegliedert und mit den Werten aus der Erhebung Mobilität in Deutschland 2017 gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass das Modell das tatsächliche Verkehrsmittelwahlverhalten sehr gut abbilden kann. Daher eignet es sich dazu, belastbare Aussagen zu „Was-wäre-wenn“-Fragen zu treffen – wenn sich das Verkehrsangebot auf eine bestimmte Weise verändert, wie verändert sich dann das Verkehrsverhalten.

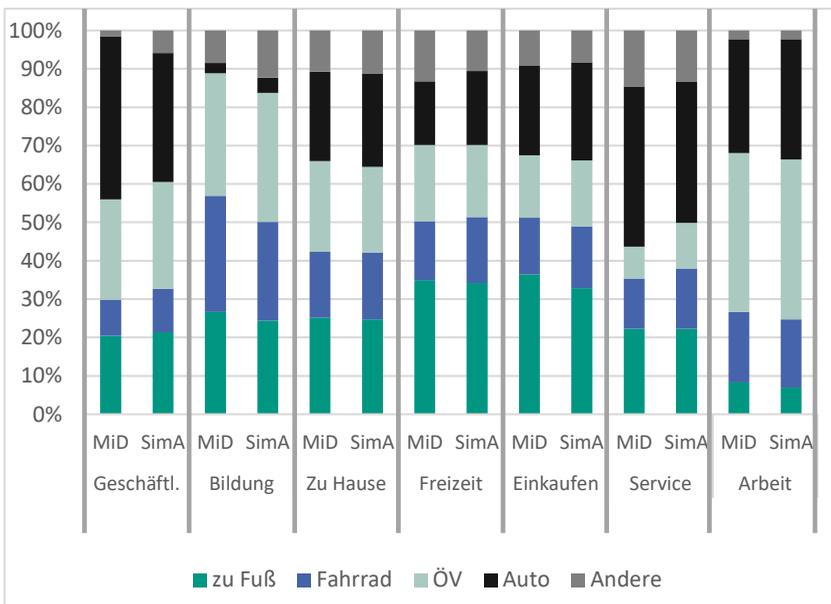


Abbildung 27 Verkehrsmittelnutzung nach Wegezwecken in SimA im Vergleich zu MiD 2017 (jeweils bezogen auf Hamburger Bevölkerung)

Vergleich Modell – Onlinebefragung

Tabelle 8 stellt die soziodemographischen Eigenschaften der Nutzenden aus der Onlinebefragung mit den Ergebnissen der Nutzenden im Status-quo-Modell (SimA) gegenüber. Das durchschnittliche Alter dieser stimmt exakt überein und die Abweichungen bei Geschlecht und Beschäftigungstatus sind mit einem und zwei Prozentpunkten vernachlässigbar gering. Somit kann festgehalten werden, dass im Modell die reale Kundschaft gut repräsentiert wird.

Tabelle 8 Vergleich der Modell-Ergebnisse mit den Ergebnissen der Online-Befragung

	Online-Befragung	Modell (SimA)
Geschlecht	58 % männlich 42 % weiblich	57 % männlich 43 % weiblich
Mittleres Alter	41 Jahre	41 Jahre
Beschäftigungsstatus	86 % erwerbstätig 14 % Sonstiges	84 % erwerbstätig 16 % Sonstige

Vergleich Modell – MOIA-Buchungsdaten

Um die Darstellung der MOIA-Flotte auch bei Kopplung mit mobiTopp zu validieren, wurden Flotten-KPI der Simulationen des Status quo mit Realdaten verglichen. Abbildung 28 vergleicht den zeitlichen Verlauf der Nutzung in der Simulation mit den Echtdateen aus der Kalibrierungswoche am Beispiel des Samstags. Es ist zu erkennen, dass das Modell den Verlauf gut widerspiegelt. Auch eine mittlere Fahrzeit von 17:48 Minuten mit einem zugehörigen Umweg von 26 % bilden die realen Werte von 19:23 Minuten und 31 % gut ab. Als mittlere Wartezeit ergeben sich 4:30 Minuten im Vergleich zu 5:09 Minuten im Realbetrieb. Insgesamt bildet somit auch das gekoppelte Modell den Status quo des MOIA-Betriebs sehr gut ab.

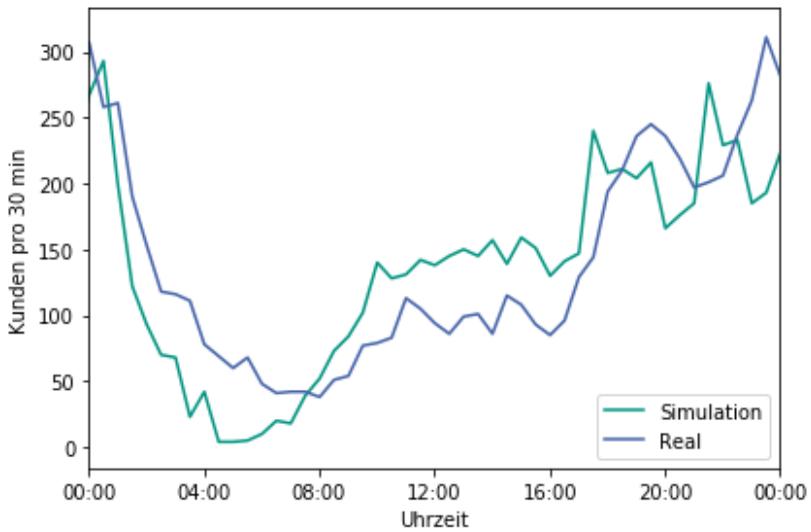


Abbildung 28 Vergleich der Tagesganglinie der MOIA-Nutzenden von Simulation und Realdaten des Samstags

4 Ergebnisse der Simulationsstudie

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse der Simulationsstudie, bestehend aus dem Status quo sowie vier weiteren Szenarien (siehe Kapitel 3.3) dargestellt. Sie dienen der Illustration der angewandten Methodik aus der Fusion von Angebots- und Nachfragemodellierung in einem Simulationsframework. In Kapitel 4.1 wird die Auswirkung der Serviceanpassungen von MOIA sowie die Auswirkung der Angebotsausweitung anderer Verkehrsmittel und die Wirksamkeit der regulatorischen Maßnahmen auf das Verkehrssystem betrachtet. Kapitel 4.2 fokussiert verschiedene auf MOIA bezogene Kenngrößen und deren Entwicklung in den verschiedenen Szenarien. Die Auswertungen beziehen sich jeweils auf die ganze Simulationswoche.⁶

4.1 Auswirkungen auf das Verkehrssystem

Im Rahmen der MOIA Begleitforschung werden die gesamtverkehrlichen Wirkungen des Ridepooling-Dienstes MOIA auf das städtische Verkehrssystem in Hamburg bewertet. Es ist notwendig, nicht nur Ridepooling zu modellieren und nachfolgend zu analysieren, sondern auch das übrige städtische Verkehrssystem. Wie bereits in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, bildet mobiTopp die in Hamburg zur Verfügung stehenden Mobilitätsoptionen für alle dort lebenden Personen ab. Dies gilt auch für alle anderen, die sich in Hamburg fortbewegen, wie beispielsweise Personen aus

⁶ Da die Rechenzeit bis zu 28 Tage je Simulationstag beträgt, wurde eine Methode zur Hochrechnung von drei repräsentativen Tagen auf die ganze Woche für alle fünf Simulationsläufe identisch eingesetzt.

der erweiterten Metropolregion, Geschäftsreisende sowie Touristinnen und Touristen.

Hervorzuheben ist, dass die im folgenden Abschnitt erläuterten Kenngrößen sich auf den Binnenverkehr beziehen, d.h. auf Wege mit Start und Ziel in Hamburg, unabhängig davon, ob die jeweiligen Personen in Hamburg wohnen. Somit unterschieden sich die Ergebnisse von jenen aus typischen Haushaltserhebungen, welche die Mobilität der Einwohnerinnen und Einwohner eines Raums beschreiben.

Veränderungen im Modal Split

Eine einfache Möglichkeit Veränderungen innerhalb eines Verkehrssystems zu erfassen, ist der Vergleich des wegebezogenen Modal Splits. In Tabelle 9 wird die Entwicklung in den Szenarien dargestellt. Die Anteile der verschiedenen Verkehrsmittel in den verschiedenen Szenarien variieren und somit wird gezeigt, dass das Simulationsmodell maßnahmensensitiv ist und sich die Agenten je nach Rahmenbedingungen unterschiedlich verhalten.

Tabelle 9 Wegebezogener Modal Split (Binnenverkehr)

	SimA	SimB	SimC	SimD	SimE
Zu Fuß	26,5 %	25,7 %	26,6 %	25,7 %	27,7 %
Fahrrad	14,5 %	14,9 %	15,4 %	14,7 %	16,2 %
Pkw	25,2 %	24,6 %	22,8 %	24,3 %	17,4 %
ÖV	23,9 %	24,6 %	25,7 %	24,5 %	28,7 %
MOIA	0,1 %	0,2 %	0,5 %	1,4 %	3,0 %
Andere	9,7 %	9,9 %	8,9 %	9,4 %	7,1 %

Ausgehend vom Status quo (SimA) wird in SimB die Bevölkerung fortgeschrieben sowie das Verkehrsangebot für verschiedene Verkehrsträger entsprechend den aktuellen Planungen verändert (wie unter Kapitel 3.3 dargestellt): Das Angebot des ÖV und Radverkehrs verbessert sich, für den MIV gibt es teils Verbesserungen und teils Einschränkungen, Sharing-Angebote und MOIA werden ausgebaut. Diese Maßnahmen führen zu

leichten Veränderungen im Modal Split: Es steigen die Anteile des ÖV und des Radverkehrs sowie die Anteile neuer Mobilitätsdienste. Der Pkw-Verkehr sowie der Fußverkehr reduzieren sich leicht. MOIA verdoppelt seinen Anteil am Modal Split und erreicht über 83.000 Fahrten pro Woche. Eine Detailanalyse zeigt, dass MOIA zum einen den ÖV ergänzt und zum anderen von allen Verkehrsmitteln Nachfrage abzieht, aktive Modi (Zufußgehen, Radfahren) anteilig jedoch am geringsten betroffen sind. Grund hierfür ist, dass Fuß- und Radwege tendenziell kürzere Strecken sind, auf denen MOIA durch den Basispreis verhältnismäßig teuer ist. Dies wiederum reduziert die Wahrscheinlichkeit eines Modal Shifts von den aktiven Modi hin zu MOIA.

Die Hinzunahme von leichten regulatorischen Maßnahmen im MIV sowie die Erweiterung des MOIA-Angebots in Form von Flotten- und Gebietsvergrößerung in SimC verstärkt die in SimB beobachteten Tendenzen. Der Pkw verliert mit 2,4 Prozentpunkten den größten Anteil, der ÖV verzeichnet mit einem Wachstum von 1,8 Prozentpunkten das größte Wachstum. Im Vergleich zum Status quo gewinnen nun Rad- und Fußverkehr. Die Verluste bei „Andere“ kommen dadurch zustande, dass auch Mitfahren im privaten Pkw von den MIV-Maßnahmen betroffen ist und somit dieser Anteil leicht sinkt.

In SimD und SimE sinken durch die angenommene Automatisierung die Kosten für die Nutzung von MOIA um ca. 50 %. Ein Vergleich zwischen SimB und SimD zeigt, dass die Angebotserweiterung und die Senkung der Kosten von MOIA den Anteil der Pkw-Nutzung weiter verändern (von 24,6 % auf 24,3 %). Die Effekte ohne weitere regulatorischen Maßnahmen im MIV sind jedoch moderat. Somit wird deutlich, dass diese ein wichtiger Hebel in der Beeinflussung des städtischen Verkehrs sind. In SimE sind durch die Kombination von Angebotserweiterung und starken regulatorischen Maßnahmen sowie einer Reduktion des Pkw-Bestands beträchtliche Effekte sichtbar. Der Anteil des Pkw am Modal Split sinkt um knapp acht Prozentpunkte. Eine tiefergehende Analyse zeigt, dass die Maßnahmen (in Form von Kosten- und Reisezeiterhöhung) sowie die Reduktion des Pkw-Bestands in nahezu gleichen Anteilen diesen Effekt verursachen. Zudem wird

anhand SimE sehr deutlich, dass die anfangs befürchtete Kannibalisierung des ÖV sowie des Taxis durch MOIA nicht stattfindet. Im Gegenteil, der ÖV gewinnt in allen hier betrachteten Szenarien. Einerseits profitiert der ÖV von der Ausweitung des ÖV-Angebots, andererseits aber auch durch die Ausweitung des MOIA-Angebots. Die Gründe hierfür sind vielseitig: MOIA wird als Gelegenheitsverkehrsmittel häufig nur auf einem Weg einer Tour genutzt (also nur dem Hin- oder Rückweg). Durch die häufige Kombination von ÖV und MOIA gewinnt der ÖV am Ende mehr Fahrten durch diesen „Toureneffekt“ als er durch die Substitution von Wegen mit MOIA verliert. Zudem erleichtert MOIA bei stadtweitem Bedienebiet insbesondere in Gebieten mit weniger dichtem ÖV-Haltestellen-Netz den Zugang zum ÖV. Die intermodale Abbildung des ÖV berücksichtigt diese Verbesserung im Zu- bzw. Abgang und wirkt sich entsprechend positiv auf die Nachfrage aus.

Fahrleistung und Emissionen

Die in der Simulation resultierende Verkehrsreduktion im MIV in Fahrzeug-Kilometern erfüllt verschiedene Ziele: einerseits die verkehrliche Entlastung der innerstädtischen Straßen und somit weniger Stau, andererseits die Reduktion der freigesetzten Emissionen. Durch die Elektrifizierung der MOIA-Fahrzeuge wird der Effekt der lokalen Emissionseinsparungen noch größer. Beide Kenngrößen können mittels des hier bestimmten Modellansatzes bestimmt werden.

Die Gesamtfahrleistung des Verkehrssystems setzt sich aus der Summe der Fahrzeugkilometer von Pkw, Carsharing, Taxi und MOIA innerhalb der simulierten Woche zusammen. Zurückgelegte Distanzen in mobiTopp gehen aus den Ortswechseln der Agenten und den zugehörigen Werten der Distanzmatrizen hervor. Für die Ermittlung der Flottenkilometer reicht die Analyse der Quell-Ziel-Beziehungen von Fahrtwünschen allein nicht aus, denn die Flotte legt auch Kilometer bei Depotfahrten, Repositionierung der Fahrzeuge und Abholfahrten von Fahrgästen zurück. Hinzu kommt, dass durch das Pooling Umwege zustande kommen. All dies berücksichtigt jedoch das Flottensimulationsmodell FleetPy, so dass die gesamte Fahrleistung der

MOIA-Flotte kilometerfein ausgewiesen werden kann. Darauf basierend können die daraus resultierenden Emissionen berechnet werden. Die Entwicklung der MOIA- und Gesamtfahrleistung sowie der Emissionen ist in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10 MOIA- und Pkw-Fahrleistung, Emissionen (Werte je Simulationswoche)

	SimA	SimB	SimC	SimD	SimE
Gefahrene Strecke von MOIA [Mio km]	0,33	0,59	1,62	4,52	9,44
Gefahrene Strecke von Pkw, Carsharing, Taxi und MOIA [Mio km]	86,8	88,6	83,2	90,7	72,8
Gesamte Emissionen im Betrieb [t CO₂]⁷	14.877	15.141	14.047	14.841	10.732

Obwohl der Pkw in allen oben beschriebenen Szenarien zumindest kleine Anteile am Modal Split verliert, zeigt die Analyse der Fahrzeugkilometer, dass die Fahrleistung in SimB und SimD durch das Bevölkerungswachstum zunächst steigt. Da MOIA aufgrund des elektrischen Antriebs und des dafür eingesetzten CO₂-neutralen Stroms keine CO₂-Emissionen im Betrieb verursacht, können in SimD zumindest im Vergleich zum Status quo CO₂-Emissionen eingespart werden. Der bereits im Modal Split beobachtete Effekt der regulatorischen Maßnahmen im MIV sowie im Rückgang des Pkw-Besitzes zeigt sich auch in der Reduktion der Fahrleistung in SimC und SimE.

Die Ergebnisse der gefahrenen MOIA-Strecke zeigen, dass mit der Vergrößerung des MOIA-Angebots die Fahrleistung von MOIA deutlich

⁷ Berücksichtigt sind Pkw, Carsharing, Taxi und MOIA. Pkw, Carsharing und Taxi werden mit 172 g CO₂/km kalkuliert. Dies basiert auf dem HBEFA (Handbuch zur Berechnung von Emissionsfaktoren im Straßenverkehr) Version 4.1 mit dem Zieljahr 2025. Da MOIA mit CO₂-neutralem Strom betrieben wird, wird MOIA mit 0 g CO₂/km angesetzt. Beide Werte beziehen sich jeweils auf den Betrieb der Fahrzeuge (Kraftstoffverbrennung bzw. Stromerzeugung). Die Berücksichtigung vorgelagerter Prozesse ist aufgrund großer Variationsmöglichkeiten kaum vergleichbar und wird daher hier nicht verfolgt.

ansteigt. Dem Anstieg liegen verschiedene Effekte zugrunde: einerseits wächst mit der größeren Flotte auch die Nachfrage, so dass insgesamt mehr Fahrten im Verlauf der Woche zustande kommen, andererseits wird das Bedienegebiet erweitert, wodurch längere Fahrten zurückgelegt werden können. Dass mehr Flottenkilometer nicht zwingend negativ zu werten sind, zeigt der gegensätzliche Trend der gefahrenen Strecke von MOIA und allen Fahrzeugen (Pkw, Carsharing, Taxi und MOIA) kombiniert. Wie die detaillierten Auswertungen der MOIA-Flotte in Kapitel 4.2 zeigen, steigt die Effizienz der Flotte durch größere Nachfrage und Flottenstärke durch einen höheren Besetzungsgrad im Gegensatz zu Carsharing, Taxi, Pkw oder auch Ridehailing (bspw. Uber).

Mono- und Multimodalität

Die Simulation einer ganzen Woche ermöglicht die Analyse der Multi- und Monomodalität im Alltag. Multimodalität bezeichnet die Nutzung von mindestens zwei verschiedenen Verkehrsmitteln (ausgenommen ist zu Fuß gehen) innerhalb einer Woche. Sie entsteht einerseits durch die Nutzung verschiedener Verkehrsmittel auf sich wiederholenden Wegen innerhalb der Woche (z. B. Pendelwege). Andererseits können neue Verhaltensweisen auf Wegen zu nicht täglich stattfindenden Aktivitäten (z. B. Freizeit oder Einkaufen) beobachtet werden. Beide Effekte können bei der Modellierung eines Tages nicht vollständig erfasst werden. mobiTopp bildet zudem intermodale Wege für den ÖV ab. Entsprechend ist eine Person, die den ÖV nicht zu Fuß erreicht, auch multimodal.

Tabelle 11 Anteile monomodaler Pkw-Nutzender der Hamburger Bevölkerung über 18 Jahren

	SimA	SimB	SimC	SimD	SimE
Monomodale Pkw-Nutzende	10,0 %	9,9 %	8,4 %	9,6 %	4,9 %

Somit können Personen zu verschiedenen Mobilitätstypen zusammengefasst werden. Exemplarisch sind in Tabelle 11 die Anteile der monomodalen Pkw-Nutzenden dargestellt, also Personen, die im Verlauf der Woche

ausschließlich den eigenen Pkw nutzen. In SimA gehören 10,0 % der Hamburger Bevölkerung dieser Gruppe an. In SimB und SimD, also den Szenarien ohne Push-Maßnahmen, verändert sich dieser Wert um weniger als 0,5 Prozentpunkte. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Verkehrsmittelwahl eine routinierte Entscheidung ist und auch die Stabilität in der Verkehrsmittelwahl im Verlauf von mobiTopp berücksichtigt wird. Eine Änderung tritt insbesondere bei einer starken Veränderung der Rahmenbedingungen wie in SimC oder SimE ein. Im letzten Szenario halbiert sich der Anteil der monomodalen Pkw-Nutzenden im Vergleich zu SimA. Dies zeigt, dass die Abhängigkeit vom Pkw als alleiniges Verkehrsmittel weitgehend schwindet und die Personen flexibler in ihrer Verkehrsmittelwahl werden.

4.2 Veränderung der auf MOIA bezogenen Kennzahlen

Mit dem integrierten Modellframework wird das Zusammenspiel aus dem Angebot, das MOIA bereitstellt, und der Nachfrage durch die Nutzenden detailliert abgebildet. Hierdurch können die Wechselwirkungen zwischen beiden Seiten besonders gut nachvollzogen und analysiert werden. In den Szenarien wird angebotsseitig das Bediengebiet, die Flottengröße und das Preisniveau variiert. Die Nachfrage stellt sich – ausgehend von der variierenden Userbase – dynamisch darauf ein, sodass das Gesamtsystem in einen Gleichgewichtszustand gerät.

Mit wachsendem Angebot und einer größeren Userbase nimmt die MOIA-Nutzung deutlich zu. Das ist eindrücklich an der Anzahl der Fahrten abzulesen: von 43.500 Fahrten in der Simulationswoche in SimA steigt diese auf fast 1,2 Mio. Fahrten in SimE (vgl. Tabelle 12).

Tabelle 12 Nutzung von MOIA in den Szenarien

	SimA	SimB	SimC	SimD	SimE
Anzahl Fahrten	43.500	83.144	215.914	575.820	1.196.867
Besetzungsgrad [Personen/km]	1,33	1,42	1,67	1,62	1,83
Geteilte Fahrten [%]	68,8	72,3	80,1	83,7	86,3
Relativer Umweg [%]	25,5	27,6	32,5	35,1	36,7
Fahrtlänge [km]	6,92	6,87	8,59	8,81	9,84

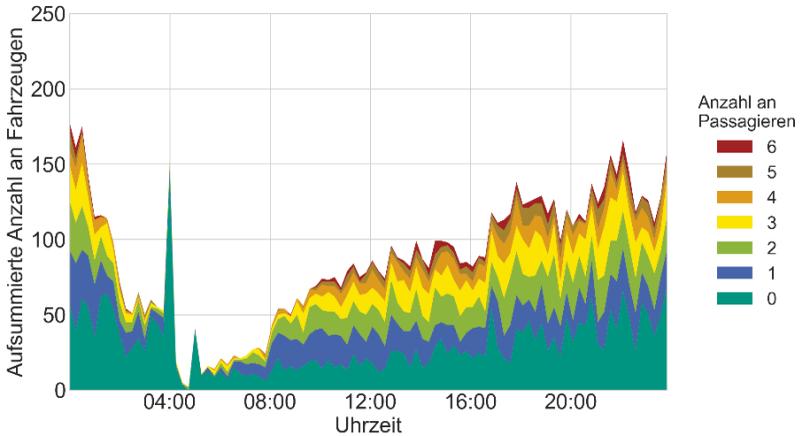
Mit der intensiveren Nutzung geht eine Steigerung der Flotteneffizienz einher. Ausgehend von SimA mit einem mittleren Besetzungsgrad von 1,33 Personen pro Fahrzeugkilometer erhöht sich der Wert bis auf 1,83 in SimE. Das heißt, es sind im Mittel deutlich mehr Personen gleichzeitig im MOIA-Fahrzeug. Der dargestellte Besetzungsgrad schließt alle Leerfahrten mit ein. Entsprechend sind auch die Wege aus und in das Depot, Anfahrten zu Kundinnen und Kunden sowie Repositionierungsfahrten (Platzierung an einer günstigeren Stelle im Stadtgebiet) in der Kennziffer enthalten. Auch Fahrten des Fahrpersonals zu Pausenorten tragen zu diesem Wert bei. Diese werden zwar nicht explizit im Modell abgebildet, sind aber implizit durch die Kalibrierung in den Repositionierungsfahrten enthalten. Der Wert größer Eins zeigt, dass die Leerkilometer effizient durch Pooling ausgeglichen werden können. Im Vergleich dazu würde sich für Ridehailing-Dienste, die keine geteilten Fahrten anbieten, mit einem Leerfahrtanteil von ca. 40 % (Schaller 2021; Henao und Marshall 2019) ein durchschnittlicher Besetzungsgrad von 0,6 ergeben.

Mit steigenden Nutzendenzahlen und wachsender Flottengröße steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Fahrtwünsche gepoolt werden können. Dies spiegelt sich in dem stetig steigenden Besetzungsgrad und einen wachsenden Anteil an geteilten Fahrten wider. Eine kleine Abweichung von diesem Verhalten bildet dabei SimD, bei welchem zwar der Anteil der geteilten Fahrten steigt, der mittlere Besetzungsgrad wegen eines erhöhten Leerfahrtanteils aber etwas sinkt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die ständig aktiven,

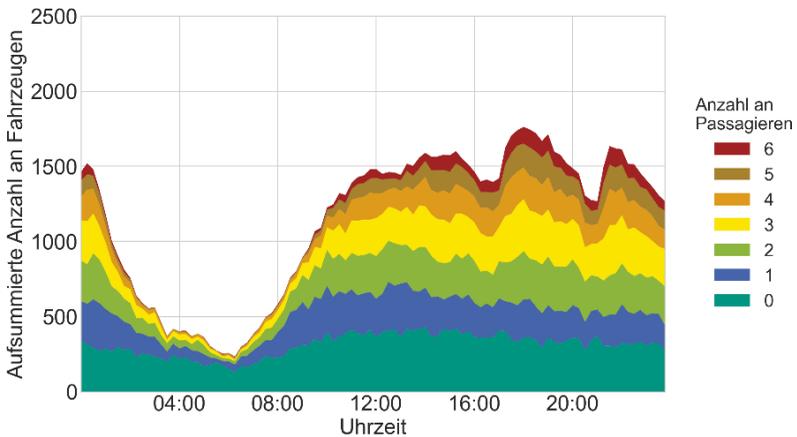
automatisierten Fahrzeuge mehrmals am Tag repositioniert werden, um die Fahrzeugverteilung der Nachfrageverteilung anzupassen.

Die Simulationen wurden nicht auf maximales Pooling oder minimale Leerfahrten hin optimiert. Es ist zu erwarten, dass durch weitere Algorithmen, insbesondere hinsichtlich der Nachfragevorhersage und einer längeren Vorbuchungszeit, die Leerfahrten in allen Szenarien noch reduziert werden könnten sowie der Anteil geteilter Fahrten erhöht werden könnte.

Abbildung 29 stellt den zeitlichen Verlauf der Besetzungszustände der aktiv fahrenden Flottenfahrzeuge für den simulierten Samstag dar. Fahrzeuge ohne Passagiere entsprechen dabei Fahrzeugen auf Leerfahrten (Abhol-, Repositionierungs- und Depotfahrten). Die Differenz bis zum jeweiligen Maximalwert der Fahrzeuge (250 bzw. 2500) resultiert aus den stehenden Fahrzeugen (z. B. durch Laden im Depot, aber auch durch momentan ungenutzte Fahrzeuge). Es ist zu erkennen, dass ein Großteil der aktiven Fahrzeuge in allen Szenarien stets mit mindestens zwei Personen besetzt ist, wodurch der mittlere Besetzungsgrad über Eins resultiert. Der Anteil höher besetzter Fahrzeuge steigt dabei mit den Szenarien. Der Peak an Leerfahrten um 4 Uhr morgens in SimA entspricht Rückkehrfahrten ins Depot nach Schichtende. Mit Einführung autonomer Fahrzeuge in SimD wird angenommen, dass die Schichtplanung entfällt und konstant nahezu 100 % der Fahrzeuge zur Verfügung stehen; die Verfügbarkeit wird nur durch Ladeprozesse in den Depots eingeschränkt, wenn der Ladezustand von Fahrzeugen dies bedingt. Diese erhöhte Verfügbarkeit von Flottenfahrzeugen wirkt sich auch auf die Nachfrage aus und sorgt für höhere Besetzungszustände tagsüber zwischen 8 und 16 Uhr.



SimA



SimD

Abbildung 29 Zeitliche Entwicklung der Besetzungszustände der Flottenfahrzeuge des Samstags für verschiedene Szenarien

Neben dem Besetzungsgrad veranschaulicht auch der Kennwert Anteil geteilter Fahrten die Entwicklung des Poolings bei MOIA. Er spiegelt den

Anteil von Fahrten, bei denen sich Buchungen von mindestens zwei Personen überschneiden, wider. Der Wert steigt von 68,8 % in SimA auf 86,3 % in SimE. Daran ist zu erkennen, dass mit der Vergrößerung des Angebots sowie der Userbase die Bündelung von Fahrten trotz größeren Bedienegebiets besser gelingt.

Demgegenüber steht eine Erhöhung des relativen Umwegs von 25,5 % auf 36,7 %; wenn mehr Pooling möglich wird, steigt auch die Häufigkeit eines Umwegs, um weitere Kundschaft aufzunehmen oder abzusetzen. Trotz der Umwege gelingt es MOIA weiterhin, ein für die Nutzenden attraktives Angebot zu bieten. Andernfalls würde die Anzahl der Buchungen zurückgehen, denn die Informationen bezüglich Fahrt dauern werden den Agenten bei der Verkehrsmittelwahl von der Flottensimulation zur Verfügung gestellt.

Weiterhin ist anhand von Abbildung 30 zu erkennen, dass die Fahrtlänge von MOIA-Fahrten im Verlauf der Szenarien deutlich anwächst. Die durchschnittlichen Fahrtlängen steigen besonders bei einer Vergrößerung des Bedienegebiets, da ein größeres Bedienegebiet längere Wege ermöglicht (zwischen SimB und SimC sowie zwischen SimD und SimE). Hierdurch verändert sich das Verhalten der Kundinnen und Kunden. Gleichzeitig ist auch zu erkennen, dass die Fahrtweiten nicht proportional zum Bedienegebiet wachsen, sondern schwächer. MOIA wird demnach kaum dafür verwendet, die gesamte Stadt zu durchqueren, sondern bleibt ein Verkehrsmittel für Wege mittlerer Entfernung, besonders im Bereich 3 bis 16 km (73 % der Fahrten auch in SimE).

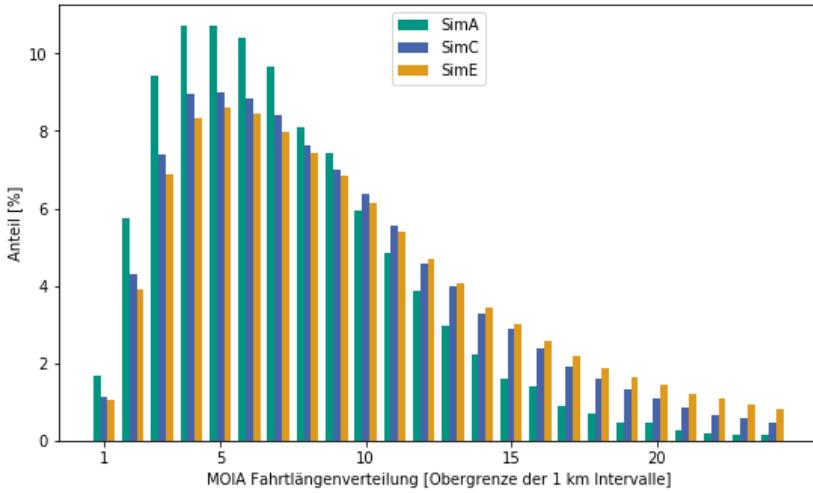


Abbildung 30 MOIA-Fahrtlängenverteilung verschiedener Szenarien

5 Diskussion und Fazit

Das Projekt der MOIA Begleitforschung liefert methodisch und inhaltlich wichtige Beiträge zur Bewertung von Ridepooling innerhalb des Verkehrssystems. Die Kombination aus der Gewinnung empirischer Daten, dem Aufbau eines Verkehrsmodells und der Durchführung von Simulationen fördert einen Erkenntnisgewinn, wer die Nutzenden von Ridepooling sind und welche gesamtverkehrlichen Wirkungen derzeit vorhanden und in Zukunftsszenarien möglich sind. Die Ergebnisse der Verkehrssimulationen zeigen, dass Ridepooling einen Beitrag zur Verkehrswende in Hamburg liefern kann, regulatorische Maßnahmen im Pkw-Verkehr aber zudem notwendig sind, um größere Effekte zu erzielen.

Die Erhebungen stellen einen bedeutenden Baustein des Projektes dar, da es zu Ridepooling – aufgrund der Neuheit des Mobilitätsangebots – bisher wenig empirische Daten gibt. Die qualitativen Interviews helfen, die Motivation, das Verkehrsverhalten und die persönlichen Lebensumstände bestimmter Ridepooling-Nutzender besser zu verstehen. Dank der sehr großen Beteiligung an der Onlinebefragung, welche für Befragungen dieser Art eher untypisch ist, ist die Belastbarkeit der Datenbasis sehr hoch. Grund dafür ist neben der Stichprobengröße von über 11.000 Personen, dass die Mehrheit der Befragten den Dienst kennt und neben MOIA auch diverse andere geteilte Mobilitätsangebote im Alltag nutzt. Somit können sich diese Personen besser in hypothetische Situationen hineinversetzen und realistische Antworten geben. Für die neuen geteilten Mobilitätsformen, und vor allem dem Studienschwerpunkt Ridepooling, kann dadurch die Datenbasis aufbauend auf der MiD 2017 deutlich verbessert werden. So konnte durch die Befragung die Soziodemographie der Nutzenden erfasst werden, und darauf basierend, das MOIA-Mitgliedschaftsmodell für mobiTopp erstellt werden. Zudem wurde deutlich, dass auch touristisch und geschäftlich Reisende sowie

Bewohnerinnen und Bewohner der erweiterten Metropolregion einen relevanten Anteil der MOIA-Kundschaft ausmachen und somit in das Modell integriert werden müssen, um die Nachfrage vollständig abbilden zu können. Des Weiteren ergänzen die Daten des Choice-Experiments die MiD 2017 hinsichtlich der Nutzung neuer, geteilter Mobilitätsangebote, so dass diese in der Verkehrsmittelwahl adäquat berücksichtigt werden können.

Um die verkehrlichen Wirkungen beurteilen zu können, es ein Verkehrsnachfragemodell nötig, das das Verkehrssystem als Ganzes abbildet. Der Vorteil der agentenbasierten Modellierung liegt insbesondere auf der Maßnahmensensitivität durch die Integration vielseitiger Einflussfaktoren in die Entscheidungsmodelle. Da jedoch Fahrteigenschaften bei der Nutzung von Ridepooling stark von der aktuellen Nachfrage und dem Flottenzustand abhängen, wurde das Verkehrsnachfragemodell mobiTopp um eine realitätsgetreue Darstellung der Ridepooling-Flotte erweitert, in der die Bewegungen und Zustände der Flottenfahrzeuge sowie das Pooling von Fahrgästen agentenbasiert abgebildet und durch ein intelligentes Betriebssystem gesteuert werden. Durch die Kopplung von mobiTopp und FleetPy ist es möglich, die gegenseitigen Einflüsse von Angebot und Nachfrage im Detail abzubilden. Auf der einen Seite bekommen Reisende in mobiTopp nur dann ein Ridepooling-Angebot, wenn sich ihre Start- und Zielpunkte im Betriebsgebiet befinden und es die Flottensimulation ermöglicht, die potenziellen neuen Fahrgäste in die aktuell geplanten Routen aufzunehmen. Auf der anderen Seite bestimmen die Eigenschaften der Reisenden zusammen mit der Qualität des Angebots, ob die Entscheidung für Ridepooling oder ein anderes Verkehrsmittel getroffen wird: längere Umwege oder Wartezeiten senken die Auswahlwahrscheinlichkeit von MOIA.

Zur Abbildung der Verkehrsmittelwahl wurde hierbei ein Cross-Nested Logit Modell gewählt, welches Ridepooling sowohl in den Nestern für ÖV, neue geteilte Angebote als auch dem Pkw verortet. Die Parameter dieses Modells konnten aufgrund der großen Datenbasis mit der Online-Befragung sehr gut geschätzt werden. Zur Kalibrierung des Gesamtmodells (mobiTopp und FleetPy) konnten weiterhin Buchungsdaten und aggregierte Flottendaten des

MOIA-Dienstes genutzt werden. Dadurch wurde sichergestellt, dass die Flotte den realen Betrieb in wichtigen Kenngrößen wie den durchschnittlichen Kundenwartezeiten, Umwegen, Leerkilometern und dem Besetzungsgrad im Status quo abbildet. Bisherige Simulationsstudien mussten hierfür viele Annahmen treffen.

Die Ergebnisse dieses Simulationsframeworks sind für Wissenschaft und Praxis aufgrund des gekoppelten Ansatzes und der Untersuchung eines etablierten Dienstes von hoher Relevanz. Bei Studien mit Fokus auf den Ridepooling-Betrieb wurde meist eine konstante Nachfrage angenommen (z.B. Alonso-Mora et al. 2017b; Engelhardt et al. 2019) und bei Studien mit Nachfragemodell mussten vereinfachende Annahmen zum Betrieb der Ridepooling-Flotte und dem Verhalten der Agenten getroffen werden. Im Gegensatz dazu baut dieses Projekt auf einer integrierten Angebot-Nachfrage-Modellierung und einer realen Datenbasis auf und kann dadurch besonders belastbare Aussagen treffen.

Obwohl die in diesem Projekt entwickelte Methodik einen essenziellen Schritt für die Modellierung von Ridepooling im Gesamtverkehr geleistet hat, gibt es noch Weiterentwicklungspotenzial bei künftigen Projekten. Die derzeit größte Herausforderung ist eine Reduzierung der Rechenzeit, die für gekoppelte Simulationen benötigt wird, insbesondere wenn Ridepooling für sehr viele Agenten in Frage kommt. Aktuell entstehen für jede einzelne Anfrage drei Nachrichten über die mobiTopp-FleetPy-Schnittstelle. Weiterhin wird es vor allem in Szenarien mit großem Verlagerungspotenzial sinnvoll, das Routing in das Framework zu integrieren. Dadurch können politische Maßnahmen (z. B. gezielte Fahrbahnreduktionen oder Straßensperrungen) genauer modelliert und evaluiert werden.

Die hier vorgestellte Methodik zur Integration neuer Mobilitätsdienste und vor allem von Ridepooling in kombinierten Simulationsmodellen liefert einen wichtigen Beitrag für die politische und verkehrsplanerische Diskussion zur Bewertung der Wirkungen neuer Mobilitätsdienste auf das Gesamtverkehrssystem. Durch die Integration zahlreicher Mobilitätsoptionen wurde

deutlich, dass die Wirkungen auf das Verkehrssystem ein Resultat des Zusammenwirkens von vielen Bausteinen sind. Dazu gehören Angebots-optimierungen und -veränderungen genauso wie regulatorische Maßnahmen, die sich gegenseitig bedingen bzw. ergänzen. Entsprechend sind die Wirkungen von einzelnen Verkehrsangebotsveränderungen nicht singulär zu betrachten, sondern immer im Gesamtzusammenhang zu sehen. Nur eine gesamthafte Betrachtung aller Verkehrsmittel und veränderten Rahmenbedingungen ermöglicht die Bewertung der wechselseitigen Auswirkungen.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass Ridepooling einen Beitrag zur Verkehrswende in Hamburg liefert, regulatorische Maßnahmen im Pkw-Verkehr aber zudem notwendig sind, um größere Effekte zu erzielen.

Literaturverzeichnis

- Alonso-Mora, J.; S. Samaranayake; A. Wallar; E. Frazzoli; D. Rus (2017a): On-Demand High-Capacity Ride-Sharing via Dynamic Trip-Vehicle Assignment. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114 (3), S. 462–467.
- Alonso-Mora, Javier; Samaranayake, Samitha; Wallar, Alex; Frazzoli, Emilio; Rus, Daniela (2017b): On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 114 (3), S. 462–467. DOI: 10.1073/pnas.1611675114.
- Briem, Lars; Mallig, Nicolai; Vortisch, Peter (2019): Creating an integrated agent-based travel demand model by combining mobiTopp and MATSim. In: *Procedia Computer Science* 151, S. 776–781. DOI: 10.1016/j.procs.2019.04.105.
- ChoiceMetrics (2018): Ngene 1.1.1 User Manual & Reference Guide. Australien.
- Ecke, Lisa; Chlond, Bastian; Magdolen, Miriam; Vortisch, Peter (2020): Deutsches Mobilitätspanel 1994-2019 - Grundfile. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.
- Engelhardt, Roman; Dandl, Florian; Bilali, Aledia; Bogenberger, Klaus (2019): Quantifying the Benefits of Autonomous On-Demand Ride-Pooling: A Simulation Study for Munich, Germany. In: 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference - ITSC. Auckland, New Zealand, 27.10.2019 - 30.10.2019: IEEE, S. 2992–2997.
- Engelhardt, Roman; Dandl, Florian; Bogenberger, Klaus (2020): Speed-up Heuristic for an On-Demand Ride-Pooling Algorithm. Online verfügbar unter <http://arxiv.org/pdf/2007.14877v1>.

- Foljanty, Lukas (2020): Mapping the Global On-Demand Ridepooling Market. Online verfügbar unter <https://lukas-foljanty.medium.com/mapping-the-global-on-demand-ridepooling-market-f8318de1c030>, zuletzt aktualisiert am Nov 2020, zuletzt geprüft am 17.12.2021.
- Henao, Alejandro; Marshall, Wesley E. (2019): The impact of ride-hailing on vehicle miles traveled. In: *Transportation* 46 (6), S. 2173–2194. DOI: 10.1007/s11116-018-9923-2.
- Hess, Stephane; Palma, David (2019): Apollo: A flexible, powerful and customisable freeware package for choice model estimation and application. In: *Journal of Choice Modelling* 32, S. 100170. DOI: 10.1016/j.jocm.2019.100170.
- Hilgert, Tim (2019): Erstellung von Wochenaktivitätenplänen für Verkehrsnachfragemodelle.
- Hunecke, Marcel; Haustein, Sonja; Grischkat, Sylvie; Böhler, Susanne (2007): Psychological, sociodemographic, and infrastructural factors as determinants of ecological impact caused by mobility behavior. In: *Journal of Environmental Psychology* 27 (4), S. 277–292. DOI: 10.1016/j.jenvp.2007.08.001.
- Kagerbauer, Martin; Kistorz, Nadine; Wilkes, Gabriel; Dandl, Florian; Engelhardt, Roman; Glöckl, Ulrich et al. (2021): Ridepooling in Hamburg auf dem Weg in die Zukunft. Hg. v. MOIA. Berlin. Online verfügbar unter https://www.moia.io/news-center/downloads/211207_MOIA_Ergebnisbericht_Begleitforschung.pdf.
- Klinkhardt, Christian; Woerle, Tim; Briem, Lars; Heilig, Michael; Kagerbauer, Martin; Vortisch, Peter (2021): Using OpenStreetMap as a Data Source for Attractiveness in Travel Demand Models. In: *Transportation Research Record* 2675 (8), S. 294–303. DOI: 10.1177/0361198121997415.
- Kistorz, Nadine; Fraedrich, Eva; Kagerbauer, Martin (2021): Usage and User Characteristics—Insights from MOIA, Europe’s Largest Ridepooling Service. In: *Sustainability* 13 (2), S. 958. DOI: 10.3390/su13020958.
- Mallig, Nicolai (2019): Modellierung der Stabilität bei der Verkehrsmittelwahl in einem mikroskopischen Verkehrsnachfragemodell. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. Institut für Verkehrswesen.

- Mallig, Nicolai; Kagerbauer, Martin; Vortisch, Peter (2013): mobiTopp – A Modular Agent-based Travel Demand Modelling Framework. In: *Procedia Computer Science* 19, S. 854–859. DOI: 10.1016/j.procs.2013.06.114.
- Mallig, Nicolai; Vortisch, Peter (2017): Modeling travel demand over a period of one week: The mobiTopp model. Online verfügbar unter <http://arxiv.org/pdf/1707.05050v1>.
- Mayring, Philipp (2015): Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken. 12., überarb. Aufl. Weinheim: Beltz. Online verfügbar unter http://ebooks.ciando.com/book/index.cfm/bok_id/1875625.
- Nobis, Claudia; Kuhnimhof, Tobias (2018): Mobilität in Deutschland - MID Ergebnisbericht. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur. Bonn, Berlin. Online verfügbar unter www.mobilitaet-in-deutschland.de.
- Pavone; Smith; Frazzoli; Rus (2012): Robotic load balancing for mobility-on-demand systems. In: *The International Journal of Robotics Research* 31 (7), S. 839–854. DOI: 10.1177/0278364912444766.
- Schaller, Bruce (2021): Can sharing a ride make for less traffic? Evidence from Uber and Lyft and implications for cities. In: *Transport Policy* 102, S. 1–10. DOI: 10.1016/j.tranpol.2020.12.015.
- Taddicken, Monika (2013): Online-Befragung. In: Wiebke Möhring und Daniela Schlütz (Hg.): Handbuch standardisierte Erhebungsverfahren in der Kommunikationswissenschaft. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 201–217.
- Ulrich, Janna; Wilkes, Gabriel; Kostorz, Nadine; Briem, Lars; Kagerbauer, Martin; Vortisch, Peter (2022): Modeling Private and Business Travelers in an Agent-Based Travel Demand Model. In: Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D.C.
- Wilkes, Gabriel; Engelhardt, Roman; Briem, Lars; Dandl, Florian; Vortisch, Peter; Bogenberger, Klaus; Kagerbauer, Martin (2021): Self-Regulating Demand and Supply Equilibrium in Joint Simulation of Travel Demand and a Ride-Pooling Service. In: *Transportation Research Record* 2675 (8), S. 226–239. DOI: 10.1177/0361198121997140.

Wörle, Tim; Briem, Lars; Heilig, Michael; Kagerbauer, Martin; Vortisch, Peter (2021): Modeling intermodal travel behavior in an agent-based travel demand model. In: *Procedia Computer Science* 184, S. 202–209. DOI: 10.1016/j.procs.2021.04.020.
