

Publizierbarer Endbericht

Gilt für Studien aus der Programmlinie Forschung

A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
Kurztitel:	SimSAEV
Langtitel:	Simulating the environmental and socio-economic effects of shared autonomous electric vehicles: the case of Vienna
Zitiervorschlag:	Simulating the environmental and socio-economic effects of shared autonomous electric vehicles for Vienna
Programm inkl. Jahr:	ACRP 10. Ausschreibung 2017
Dauer:	01.05.2018 bis 31.10.2021
KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:	Stefanie Peer, PhD
Kontaktperson Name:	Stefanie Peer, PhD
Kontaktperson Adresse:	Welthandelsplatz 1, D4 2.2.34 1020 Wien
Kontaktperson Telefon:	+43-1-313 36-5602
Kontaktperson E-Mail:	stefanie.peer@wu.ac.at
Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):	Austrian Institute of Technology (AIT), Wien International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Niederösterreich
Schlagwörter:	Mobilität, Mikrosimulation, Selbstfahrende Autos, E-Autos, Car- & Ride-Sharing, Synergien, Trade-offs
Projektgesamtkosten:	213.315 €
Fördersumme:	213.315 €
Klimafonds-Nr:	KR17AC0K13731
Erstellt am:	31.01.2022

B) Projektübersicht

1 Kurzfassung

Projektüberblick

Es wird erwartet, dass selbstfahrende Elektrofahrzeuge mit Car- & Ride- Sharing-Optionen (shared autonomous electric vehicles: SAEVs) in den kommenden Jahrzehnten schrittweise auf den Markt kommen werden, was möglicherweise zu gravierenden Veränderungen im Mobilitätssektor mit starken ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen führen wird. SimSAEV simuliert die potenziellen Auswirkungen von SAEVs in Wien unter verschiedenen Szenarien, von denen Maßnahmen zur Maximierung der ökologischen und wirtschaftlichen Vorteile der neuen Technologie abgeleitet werden können, während gleichzeitig das Verkehrssystem effizient und sozial gerecht bleibt.

Methodisch haben wir zunächst die vorhandene Literatur zu den sozioökonomischen, umwelt- und mobilitätsbezogenen Auswirkungen von SAEVs gesichtet und zusammengefasst. Das Kernstück des Projekts waren jedoch die Simulationen, für die wir ein agentenbasiertes Modell (ABM) verwendet haben, das in der Lage ist, die komplexen Wechselwirkungen zwischen dem Verkehrssystem, sozioökonomischen Faktoren und Umweltfaktoren darzustellen. Durch einen aktiven Stakeholder-Beteiligungsprozess haben wir sichergestellt, dass politische EntscheidungsträgerInnen und andere relevante Stakeholder sowohl in die Gestaltung der politischen Szenarien als auch in die Verbreitung der Ergebnisse einbezogen wurden.

Erkenntnisse aus der bestehenden Literatur

Auf der Grundlage unserer Literatursammlung von mehr als 400 Fachartikeln stellten wir fest, dass die meisten vorhandenen Studien darauf hindeuten, dass ohne weitere Maßnahmen, die die Nutzung von SAEVs einschränken (z. B. Straßenbenutzungsgebühren, eingeschränkte Betriebsbereiche), die Nachfrage nach Fahrten erheblich steigen wird. Die Ergebnisse in Bezug auf Umweltindikatoren sind weniger eindeutig - auch E-Fahrzeuge produzieren erhebliche Mengen an lokalen Schadstoffen. Wenn die Einführung von SAEVs bedeutet, dass Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren ersetzt werden, werden die CO₂-Emissionen sinken. Wie unterschiedliche sozioökonomische Gruppen von der Einführung von SAEVs betroffen sind, wurde bisher nur wenig untersucht.

Die Auswirkungen von SAEVs auf die öffentlichen Finanzen sind potenziell groß. In den OECD-Ländern stammen derzeit 5-12 % der staatlichen und bis zu 30 % der lokalen Steuereinnahmen aus der Kraftstoff- und Fahrzeugbesteuerung. Mit dem Aufkommen von SAEVs ist ein erheblicher Rückgang der Steuereinnahmen aus Verbrennungskraftstoffen und Zulassungssteuern zu erwarten. Dies wird wahrscheinlich zur Einführung von Straßenbenutzungsgebühren nach dem Nutzer- und Verursacherprinzip führen, die nicht nur die entgangenen Steuereinnahmen

kompensieren, sondern auch zur Verringerung der Verkehrsüberlastung beitragen werden. Darüber hinaus wird die Innovation von Steuersystemen, die sich an die veränderten technologischen Gegebenheiten anpassen, wahrscheinlich zu einer Machtverschiebung hin zu den lokalen, insbesondere städtischen Regierungsebenen führen, nicht zuletzt deshalb, weil Car- und Ride-Sharing aufgrund von Preisvorteilen durch Skaleneffekte voraussichtlich vor allem in Städten attraktiv sein wird.

Ergebnisse auf der Grundlage der Simulationen

Bei Simulation verschiedener SAEV-Flottengrößen (von 100 bis 2500 Fahrzeugen in einer Simulation mit 12,5% der Bevölkerung) und Preisniveaus (von 0,00 bis 0,50 EUR/Min.), stellen wir - wenig überraschend - fest, dass der SAEV-Modal-Split (der Anteil an SAEVs in der Wahl des Transportmittels einer bestimmten Gruppe) mit einer größeren Verfügbarkeit von Fahrzeugen und niedrigeren Preisen steigt. Während der Anteil bei 100 Fahrzeugen 0,5% beträgt, steigt er bei 2500 Fahrzeugen auf bis zu 14%. Bei einer großen SAEV-Flotte steigen etwa 10-15% der Fußgänger, 10-22% der Radfahrer, 8% der Autofahrer und 17% der Nutzer öffentlicher Verkehrsmittel auf SAEVs um. Je höher der Preis und je größer die Flotte, desto wahrscheinlicher ist es, dass die Agenten vom Fahrrad oder zu Fuß auf SAEVs umsteigen. Dies liegt daran, dass bei höheren Fahrpreisen eher kürzere Wege mit einem SAEV unternommen werden als in den Szenarien mit einem niedrigerem Tarif.

Weiters untersuchen wir die mögliche Rolle von SAEVs für die erste und letzte Meile. Zu diesem Zweck beschränken wir das Einsatzgebiet der SAEVs auf bestimmte Zonen in den Außenbezirken von Wien. Für alle Kombinationen von hoher und niedriger SAEV-Flottengröße und hohen und niedrigen Fahrpreisen stellen wir fest, dass ein relativ kleiner Anteil der Autofahrten von Bewohnern dieser Zonen (7-14%) durch SAEVs ersetzt wird, was zu CO₂-Emissionsreduktionen von 5-11% führt. Im Gegensatz dazu werden 23-35% der mit aktiven Verkehrsmitteln (zu Fuß, mit dem Fahrrad) unternommenen Fahrten durch SAEVs ersetzt, und 10-20 % der Fahrten mit öffentlichen Verkehrsmitteln. Das Potenzial von SAEVs, den Modal Split von Privatfahrzeugen zu senken, wird etwas größer, wenn die Nutzung und/oder der Besitz von Privatfahrzeugen teurer wird (was dazu führt, dass 17-20% der Autofahrten durch SAEVs ersetzt werden und die CO₂-Emissionen um bis zu 32% sinken).

Bei der Untersuchung der Auswirkungen von SAEVs auf die Pkw-Emissionen und die Emissionsbelastung individueller Agenten ermöglicht es das Simulationsmodell, die Belastung der Agenten über die Tageszeit, verschiedene Orte und Aktivitäten hinweg zu verfolgen. Unsere Ergebnisse zeigen eine interessante räumliche Verteilung. Personen, die in der Nähe des Stadtzentrums leben oder arbeiten, sind den Emissionen wesentlich stärker ausgesetzt und verzeichnen daher während der Einführung von SAEVs den stärksten Rückgang der Feinstaubkonzentration in ihrem Lebensumfeld .

2 Executive Summary

Project overview

Shared autonomous electric vehicles (SAEVs) are expected to be gradually released to the market in upcoming decades, potentially leading to disruptive changes in the mobility sector with strong environmental and socioeconomic implications. The typically strong path dependency in transport policies calls for near-term policy action.

SimSAEV simulates the potential effects of SAEVs in Vienna under different scenarios, in particular regarding SAEV fleet size, fares, and geographical zones in which SAEVs are allowed to operate in. Also scenarios in which not only SAEVs were introduced, but also the usage and/or ownership of private cars is assumed to become more expensive, were investigated. The outcomes of these simulations yield advice to policy makers on how to maximize the environmental and economic gains of the new technology, while keeping the transport system efficient and socially inclusive.

Methodologically, we first conducted a review of the existing literature on the socioeconomic, environmental, and mobility-related effects of SAEVs, with a specific emphasis on the public finance implications of SAEVs, which have so far been widely ignored. The core of the project, however, were the simulations, for which we used a mesoscopic agent-based model that is able to represent the complex interactions between the transportation system, socioeconomic factors and environmental factors. It builds on a recently developed, state-of-the-art transport model for the Greater Vienna Area. An active stakeholder involvement process ensured that policy-makers and other relevant stakeholders were included in the design of the policy scenarios as well in the dissemination of the results. Several scientific papers were developed based on the literature review, the simulation setup, and the simulated policy scenarios, two of which have already been published in scientific journals and one in conference proceedings.

Findings based on existing literature

Based on our literature collection of more than 400 papers, we find that most existing studies suggest that without further measures that limit the usage of SAEVs (e.g. road tolls, restricted operating areas) demand for travel will increase substantially. The findings related to environmental indicators are less clear – even e-vehicles produce substantial amounts of local pollutants, which are roughly proportional to the kilometers driven. If introducing SAEVs implies that vehicles with combustion engines are replaced, CO₂ emissions are likely to decline. Social indicators related to SAEV adoption have only obtained little attention so far in the literature.

The public finance implications of SAEVs are potentially large. In OECD countries, 5-12% of federal and up to 30% of local tax revenue are currently from fuel and vehicle taxation. A substantial decrease in tax revenues from combustion fuels and

registration taxes can be expected with the advent of SAEVs. This will likely lead to the introduction of road tolls in line with 'user pays' and 'polluter pays' principles, which will not only compensate for the forgone fiscal revenues but also help reduce congestion. Moreover, innovation in taxation schemes to fit the changing technological circumstances is likely to shift power towards local, in particular urban, governmental levels, not at least because car- and ride-sharing are predicted to be predominantly attractive in urban settings due to price advantages from economies of scale.

Findings based on simulations

When we simulate different SAEV fleet sizes (ranging from 100 to 2500 vehicles in a 12.5% population simulation) and fare levels (ranging from 0.00 to 0.50 EUR/min), we find – not surprisingly – that the SAEV modal split increases with greater availability of vehicles and lower fares. While the share is 0.5% for 100 vehicles, it increases up to 14% for 2500 vehicles. For a large SAEV fleet, about 10-15% of pedestrians, 10-22% of bicyclists, 8% of car drivers, and 17% of public transit users switch to SAEVs. The higher the price and the larger the fleet, the more likely agents are to switch from bicycling or walking to SAEVs. This observation can be explained by the fact that SAEV trips tend to be shorter when prices increase. With higher SAEV fees, switching from cars or public transportation becomes less attractive.

We further investigate the potential role of SAEVs for first- and last-mile. For this purpose, we constrain the operation area of the SAEVs to specific zones in the outskirts of Vienna, which contain at least one subway/railway station. For all combinations of high and low SAEV fleet size and high and low fares, we find that a relatively small share of car trips by residents of these zones (7–14%) are replaced by SAEVs, generating CO₂ emissions reductions of 5–11%. In contrast, 23–35% of trips undertaken with active modes (walking, cycling) are replaced by SAEVs, and 10–20% of public transport trips. The potential of SAEVs to lower the modal split of private cars becomes somewhat larger when the usage and/or ownership of private cars become more expensive (leading to 17–20% of car trips being replaced by SAEVs and generating CO₂ emissions reductions of up to 32%).

When we explore the impact of SAEVs on car emissions and emission exposure of agents, the simulation model allows us to track the exposure of agents over time of the day, across different locations and activities. Our results indicate an interesting spatial distribution. Agents living or working near the city center (inside the ring road) have a much higher exposure to emissions by during the introduction of SAEVs, they see highest decline in PM concentration around their facilities.

Finally, we generally find, that when SAEV users are broken down by socioeconomic characteristics, there are little significant differences from the general population pattern.

3 Hintergrund und Zielsetzung

Der Verkehrssektor war 2019 für rund 30 % der CO₂-Emissionen in Österreich verantwortlich, 63 % davon entfallen auf den Personenverkehr auf der Straße. Im Gegensatz zu den meisten anderen Sektoren steigen die Emissionen des Verkehrssektors weiter an. Um die ehrgeizigen Ziele des Pariser Abkommens zu erreichen und im Einklang mit den Zielen für nachhaltige Entwicklung (SDGs) zu handeln, müssen diese Emissionen deutlich gesenkt werden. Drei wichtige Entwicklungen haben das Potenzial, den Übergang zu einem nachhaltigeren Verkehrssystem zu fördern:

Der Verkehrssektor war 2019 für rund 30 % der CO₂-Emissionen in Österreich verantwortlich, 63 % davon entfallen auf den Personenverkehr auf der Straße. Im Gegensatz zu den meisten anderen Sektoren steigen die Emissionen des Verkehrssektors weiter an. Um die ambitionierten Ziele des Pariser Abkommens zu erreichen und im Einklang mit den Zielen für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals SDGs) zu handeln, müssen diese Emissionen deutlich gesenkt werden. Drei wichtige Entwicklungen haben das Potenzial, den Übergang zu einem nachhaltigeren Verkehrssystem zu fördern:

- (1) Elektrifizierung, die Elektrofahrzeuge (EVs) ermöglicht
- (2) Automatisierung, die autonome (selbstfahrende) Fahrzeuge (AV) ermöglicht
- (3) Digitalisierung, die Car- und Ride-Sharing (SVs) ermöglicht

Zwar bietet jede dieser Entwicklungen einen Weg zur Verringerung der CO₂-Emissionen, doch die gegenseitige Verstärkung dieser Entwicklungen zu gemeinsam genutzten autonomen Elektrofahrzeugen (SAEV) birgt das größte Potenzial für die Umwandlung des derzeitigen Verkehrssystems in ein System, das vollständig auf erneuerbare Energiequellen setzt und gleichzeitig aufgrund des Übergangs vom individuellen Autobesitz zu Car- und Ridesharing-Systemen viel weniger Autos benötigt. Dies gilt insbesondere für städtische Gebiete, wo der Skaleneffekt solcher Systeme am größten ist und der durch eine effizientere Nutzung der Infrastruktur überflüssig gewordene Platz am wertvollsten ist.

Zwar bietet jede dieser Entwicklungen einen Weg zur Verringerung der CO₂-Emissionen, doch birgt die gegenseitige Verstärkung dieser Entwicklungen hinzu gemeinsam genutzten autonomen Elektrofahrzeugen (shared autonomous electric vehicles: SAEVs) das größte Potenzial für die Umwandlung des derzeitigen Verkehrssystems in ein System, das vollständig auf erneuerbare Energiequellen setzt und gleichzeitig aufgrund des Übergangs vom individuellen Autobesitz zu Car- und Ridesharing-Systemen viel weniger Autos benötigt. Dies gilt insbesondere für städtische Gebiete, wo der Skaleneffekt solcher Systeme am größten ist und der durch eine effizientere Nutzung der Infrastruktur überflüssig gewordene Platz am wertvollsten ist.

Es wird erwartet, dass SAEVs in den kommenden Jahrzehnten schrittweise auf den Markt kommen werden, wobei ein breiter Konsens darüber besteht, dass bis 2040 die Mehrheit der Fahrzeuge gemeinsam genutzt, autonom und elektrisch sein wird. Die Vorreiter dieser Entwicklung sind bereits sichtbar und werden in der Öffentlichkeit breit diskutiert. Es handelt sich dabei um große Taxi- und Ride-Sharing-Dienste wie Uber und Lyft, Car-Sharing-Anbieter wie Car2Go sowie Technologieführer wie Tesla, aber auch um kleinere, oft öffentlich finanzierte Projekte wie die selbstfahrenden Busse, die in den letzten Jahren in der Seestadt Aspern (Wien) eingesetzt wurden.

SAEVs werden voraussichtlich in den kommenden Jahrzehnten schrittweise auf den Markt kommen, wobei man davon ausgeht, dass bis 2040 die Mehrheit der Fahrzeuge gemeinsam genutzt, autonom und elektrisch sein wird. Die Vorreiter dieser Entwicklung sind bereits sichtbar und werden in der Öffentlichkeit breit diskutiert. Es handelt sich dabei um große Taxi- und Ride-Sharing-Dienste wie Uber und Lyft, Car-Sharing-Anbieter wie Car2Go sowie Marktführer wie Tesla, aber auch um kleinere, oft öffentlich finanzierte Projekte wie die selbstfahrenden Busse, die in den letzten Jahren in der Seestadt Aspern (Wien) eingesetzt wurden.

Es liegt in den Händen der politischen Entscheidungsträger, die Politik so zu gestalten, dass SAEVs die Umweltvorteile maximieren und gleichzeitig das Verkehrssystem effizient und sozial integrativ bleibt. Die starken Pfadabhängigkeiten, die mit verkehrsbezogenen Maßnahmen verbunden sind, erfordern kurzfristige politische Maßnahmen. Im Rahmen des Projekts wurden daher verschiedene Politiksznarien für eine Vielzahl von Annahmen simuliert, die dann die Ableitung von ökologischen und sozioökonomischen Indikatoren für jedes der Szenarien sowie deren Wechselbeziehungen im Hinblick auf Synergien und Kompromisse ermöglichten. Wir haben ein agentenbasiertes Modell verwendet, das in der Lage ist, die komplexen Wechselwirkungen zwischen dem Verkehrssystem, sozioökonomischen Faktoren und Umweltfaktoren darzustellen. Es baut auf einem modernen Verkehrsmodell für Wien auf (basierend auf der MATSim-Software).

Politische EntscheidungsträgerInnen haben es in der Hand, die Maßnahmen so zu gestalten, dass SAEVs die Umweltvorteile maximieren und das Verkehrssystem effizient und zugleich sozial integrativ bleibt. Starke Pfadabhängigkeiten, die mit verkehrsbezogenen Maßnahmen verbunden sind, erfordern kurzfristige politische Maßnahmen. Im Rahmen des Projekts wurden daher verschiedene Politiksznarien für eine Reihe von Annahmen simuliert, aus denen ökologische und sozioökonomische Indikatoren für jedes der Szenarien sowie deren Wechselbeziehungen im Hinblick auf Synergien und Kompromisse abgeleitet werden konnten. Im Rahmen dieses Projektes wurde ein agentenbasiertes Modell verwendet, das in der Lage ist, die komplexen Wechselwirkungen zwischen dem Verkehrssystem, sozioökonomischen Faktoren und Umweltfaktoren darzustellen. Das Verkehrsmodell für Wien, auf dem dieses Modell aufbaut, ist auf dem aktuellsten Stand der Technik. basierend auf der MATSim-Software).

Hinsichtlich der Umweltindikatoren lag unser Hauptaugenmerk auf der Verringerung der CO₂-Emissionen durch Elektrifizierung sowie Car- und Ride-Sharing, aber auch lokale Schadstoffe (z.B. PM 2,5) wurden berücksichtigt. Auf der sozioökonomischen Seite konzentrierten wir uns in erster Linie auf die Veränderungen in der Zugänglichkeit und Erschwinglichkeit von Mobilität aufgrund der Einführung von SAEVs für verschiedene sozioökonomische Gruppen.

Hinsichtlich der Umweltindikatoren lag unser Hauptaugenmerk auf der Verringerung der CO₂-Emissionen durch Elektrifizierung sowie Car- und Ride-Sharing, wobei zusätzlich auch lokale Schadstoffe (z.B. PM 2,5) berücksichtigt wurden. Bezüglich der sozioökonomischen Dimension konzentrierten wir uns in erster Linie auf die Veränderungen in der Zugänglichkeit und Bezahlbarkeit von Mobilität nach der Einführung von SAEVs für verschiedene sozioökonomische Gruppen.

Uns ist keine frühere Studie bekannt, die explizit Synergien und Kompromisse bei den ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen von SAEVs berücksichtigt hat. Während zahlreiche Studien die Umweltauswirkungen von SAEVs untersucht haben, haben sich nur sehr wenige Studien mit den sozioökonomischen Auswirkungen befasst.

Uns ist keine frühere Studie bekannt, die explizit Synergien und trade-offs bei den ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen von SAEVs berücksichtigt hat. Während zahlreiche Studien die Umweltauswirkungen von SAEVs untersucht haben, haben sich nur sehr wenige Studien mit den Auswirkungen aus sozioökonomischer Sicht befasst.

Die **Ziele von SimSAEV** sind dreifach und umfassen Aspekte, die den Fortschritt wissenschaftlicher Erkenntnisse, die internationale und nationale Politik sowie die lokale Entscheidungsfindung betreffen: (1) Identifizierung der ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen von SAEVs sowie von Synergien und Kompromissen zwischen ihnen. (2) Erweiterung eines agentenbasierten Modells (ABM) des Wiener Verkehrssystems um ein Modul, das die Simulation von Szenarien im Zusammenhang mit SAEVs ermöglicht. (3) Unterstützung bei der Gestaltung von Verkehrspolitiken, die zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen führen und gleichzeitig ein effizientes und integratives Verkehrssystem aufrechterhalten.

Im Rahmen des SimSAEV Projekts wurden drei Ziele festgelegt, die sich auf den Fortschritt wissenschaftlicher Erkenntnisse, die internationale und nationale Politik sowie die lokale Entscheidungsfindung beziehen: (1) Identifizierung der ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen von SAEVs sowie von Synergien und trade-offs zwischen ihnen. (2) Erweiterung eines agentenbasierten Modells (ABM) des Wiener Verkehrssystems um ein Modul, das die Simulation von Szenarien im Zusammenhang mit SAEVs ermöglicht. (3) Unterstützung bei der Gestaltung von Verkehrspolitiken, die zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen führen und gleichzeitig ein effizientes und integratives Verkehrssystem aufrechterhalten.

4 Projektinhalt und Ergebnis(se)

Projektziele

Die drei Ziele von SimSAEV umfassten Aspekte des wissenschaftlichen Fortschritts, der internationalen und nationalen Politik sowie der lokalen Entscheidungsfindung:

(1) Identifizierung der ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen von SAEVs sowie von Synergien und trade-offs zwischen ihnen.

Wir überprüfen die relevante Literatur, die grundsätzlich interdisziplinär ist, unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden Annahmen bezüglich der SAEV-Technologie, der SAEV-Markt- und Eigentumsstruktur, der Verbraucherpräferenzen gegenüber SAEVs sowie gegenüber Car- und Ride-Sharing und der politischen und institutionellen Rahmenbedingungen. Besonderes Augenmerk wurde auf die Rolle der Staatsfinanzen gelegt.

(2) Erweiterung eines agentenbasierten Modells (ABM) des Wiener Verkehrssystems um ein Modul, das die Simulation von Szenarien im Zusammenhang mit SAEVs ermöglicht.

Wir bauen auf einem groß angelegten agentenbasierten Verkehrsmodell (ABM) für Wien auf und fügen die Verfügbarkeit von SAEVs hinzu. Dies ermöglicht uns, eine große Anzahl verschiedener Szenarien zu simulieren, nicht nur in Bezug auf die Politik (Regulierung, Investitionen, Besteuerung), sondern auch in Bezug auf die Technologie, die Preisgestaltung für SAEVs und die Flottengröße sowie die Mobilitätspräferenzen der Bevölkerung. Neben den verkehrsbezogenen Auswirkungen (z. B. Veränderungen der Zugänglichkeit) liefern die Simulationen ökologische und sozioökonomische Indikatoren auf einem disaggregierten Level.

(3) Unterstützung bei der Gestaltung von Verkehrspolitiken, die zu einer Reduzierung der CO₂-Emissionen führen und gleichzeitig ein effizientes und integratives Verkehrssystem aufrechterhalten.

Die Simulationen liefern spezifische Empfehlungen für politische EntscheidungsträgerInnen auf allen Verwaltungsebenen hinsichtlich der ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen von SAEVs in verschiedenen Szenarien. Aufgrund der großen Anzahl von Simulationsläufen mit unterschiedlichen Annahmen können politischen EntscheidungsträgerInnen detaillierte Informationen über die Risiken und Unsicherheiten im Zusammenhang mit der Einführung von SAEVs sowie über entsprechenden politischen Maßnahmen, insbesondere hinsichtlich der sozioökonomischen Auswirkungen, einsehen. Solche Informationen sind besonders wertvoll, wenn die Unsicherheit groß und die Pfadabhängigkeit potenziell sehr hoch ist (z. B. bei großen Infrastrukturinvestitionen oder Änderungen der Steuersysteme). Das ABM übernimmt somit die Rolle eines systematischen Instruments, das geeignet ist, verschiedene politische Optionen abzuwägen, konkurrierende Ziele (insbesondere ökologische und sozioökonomische) zu berücksichtigen und die Festlegung von Prioritäten zu unterstützen.

Struktur des Projektes

Um die Ziele zu erreichen und die damit verbundenen zentralen Forschungsfragen zu beantworten, verfügte SimSAEV über eine zielorientierte Struktur, die aus fünf Arbeitspaketen besteht (siehe Abbildung 1). Alle Arbeitspakete sind eng miteinander verknüpft und in einer Reihenfolge angeordnet, die einen reibungslosen und logischen Arbeitsablauf gewährleistet. Jedes Arbeitspaket umfasst einen eigenen Satz von Methoden, um die erwarteten Ergebnisse des jeweiligen Arbeitspakets zu erreichen.

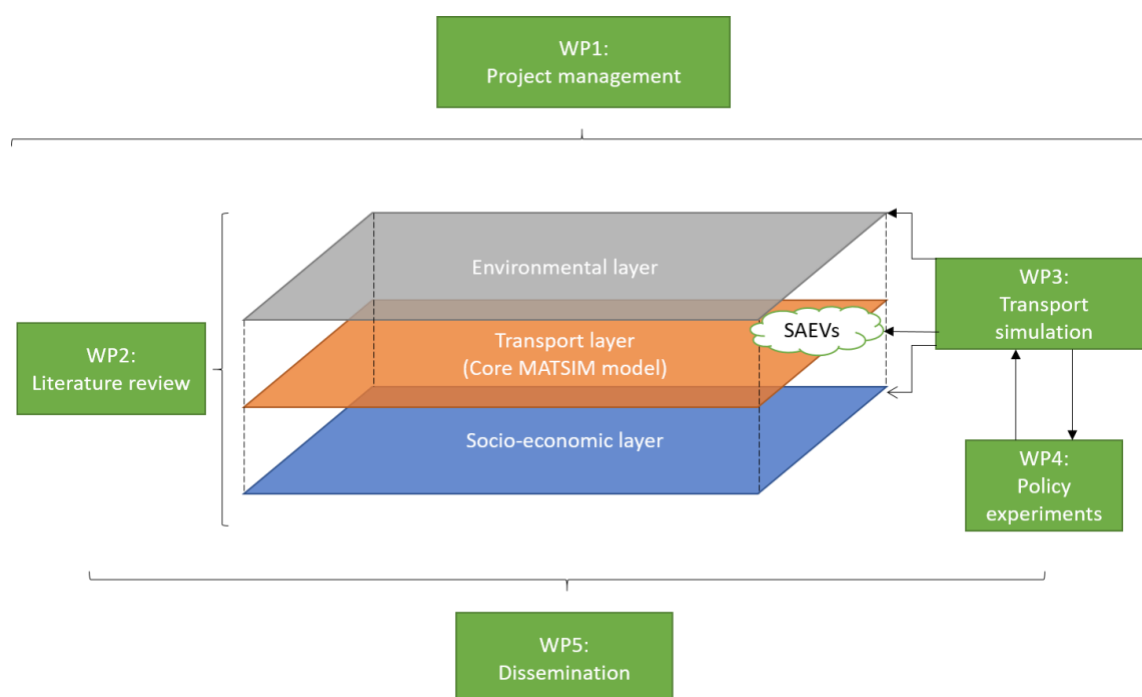


Abbildung 1: Projektübersicht

Aktivitäten (nach Arbeitspaketen)

Arbeitspaket 1: Projektmanagement

Verträge: Dazu gehörten die Ausarbeitung und Fertigstellung des Konsortialvertrags, der mehrmals überarbeitet werden musste, um den Anforderungen aller Partnereinrichtungen gerecht zu werden. Ebenfalls im Rahmen des Vertragsmanagements wurde eine Verlängerung des Projekts um ein Jahr beantragt.

Laufendes Projektmanagement und Gesamtkoordination des Konsortiums: Diese Aufgabe konzentrierte sich hauptsächlich auf die Organisation und Vorbereitung regelmäßiger persönlicher und virtueller Treffen zwischen den Konsortialpartnern sowie auf das Monitoring des Fortschritts der Arbeitspakete.

Finanzielles Controlling und Management der Berichterstattung: Diese Aufgaben wurden größtenteils nach dem Ende jedes Berichtszeitraums durchgeführt, was in drei Zwischenberichten und dem Abschlussbericht festgehalten wurde.

Qualitätssicherung und Projektrisikomanagement: Die Berichterstattung über den Fortschritt der Arbeitspakete erfolgte in der Regel im Rahmen regelmäßiger Projekttreffen. Die jeweiligen Leitern der Arbeitspakete berichteten über die seit der letzten Sitzung erzielten Fortschritte. Wenn Risiken festgestellt wurden, wurden mögliche Strategien zu deren Bewältigung erörtert und anschließend von den Arbeitspaketleitern umgesetzt.

Arbeitspaket 2: Literaturüberblick

Im Rahmen dieses Arbeitspakets haben wir eine große Anzahl relevanter Studien gesammelt, darunter veröffentlichte und unveröffentlichte wissenschaftliche Arbeiten, graue Literatur, politische Berichte und Gutachten. Diese Literatursammlung wurde ständig erweitert, da in den letzten Jahren eine große Anzahl von Artikeln über SAEVs und relevante Technologien veröffentlicht wurde. Am Ende des Projekts wurden etwa 400 Dokumente in der von den Projektpartnern gemeinsam genutzten Literaturlatenbank gespeichert und nach projektrelevanten Themen und Methoden strukturiert. Diese umfangreiche Datenbank erwies sich als sehr nützlich für die Erstellung der Literaturübersichten für die wissenschaftlichen Arbeiten in Zusammenhang mit den Simulationsergebnissen (siehe WP 5).

Das Kernstück des Arbeitspakets war die *Erstellung einer Literaturübersicht*, in der - basierend auf vorhandenen, oft interdisziplinären Erkenntnissen - erörtert wurde, inwieweit SAEVs zur Lösung urbaner Herausforderungen beitragen können und inwieweit sie diese auch verschärfen können. Wir betrachteten insbesondere Herausforderungen im Zusammenhang mit der Umwelt (CO₂, Luftverschmutzung, Lärm, Wärmeinseln), dem Verkehrssystem (SAEVs und ihre Komplementarität/Substituierbarkeit mit anderen Verkehrsträgern), dem öffentlichen Raum (alternative Nutzung von Straßen- und Parkraum), den Staatsfinanzen und der sozialen Ungleichheit (insbesondere hinsichtlich der Zugänglichkeit). Unser Ziel war es zu beleuchten, wie die Auswirkungen von SAEVs auf diese Aspekte von den zugrundeliegenden Annahmen bezüglich der SAEV-Technologie, der SAEV-Markt- und Eigentumsstruktur, der Verbraucherpräferenzen gegenüber SAEVs sowie gegenüber Car- und Ride-Sharing und den politischen und institutionellen Rahmenbedingungen abhängen.

Weiters haben wir eine zweite Arbeit verfasst (die nicht Teil des Projektantrags war), die einerseits eine Literaturübersicht und andererseits ein politikorientiertes Dokument über die Auswirkungen von SAEVs auf die Staatsfinanzen ist. Die oben erwähnte Literaturübersicht hat gezeigt, dass Auswirkungen von SAEVs auf die Staatsfinanzen ein bisher vernachlässigter Aspekt ist, obwohl diese potenziell groß sind. Daher wurde ein separates Paper veröffentlicht, das einen *Überblick über die potenziellen Auswirkungen von SAEVs auf die öffentlichen Finanzen sowohl auf*

Bundes- als auch auf lokaler Ebene gibt und darauf aufbauend Empfehlungen für politische Entscheidungsträger enthält.

Arbeitspaket 3: Simulationen

In WP3 wurde ein mesoskopisches Verkehrsmodell für die Stadt Wien entwickelt und mit SAEVs erweitert. Die verwendete Simulationsgrundlage MATSim ist ein Open-Source-Projekt, das bereits in vielen Städten auf der ganzen Welt eingesetzt wurde. Der Aufbau ist für jede neue Stadt herausfordernd, da die Erstellung der Bevölkerung, die Grundlage der agentenbasierten Simulation, immer an die national verfügbaren Daten angepasst werden muss (zum Beispiel wurden hier die Mobilitätsdaten aus „Österreich Unterwegs 2013/2014“¹ verwendet).

Die Simulation von SAEVs auf dem Straßennetz wurden unter Verwendung neu entwickelter Module für nachfrageorientierten Verkehr (drt – demand responsive transport) in Kombination mit dem dvrp-Modul (dynamic routing vehicle problem) durchgeführt. Diese beiden Module ermöglichen es den Agenten, (1) ein drt-Fahrzeug anzufordern und (2) einem Fahrzeug zugewiesen zu werden, wodurch Fahrgemeinschaften gebildet werden können. Die SAEV-Fahrzeuge wurden in der Simulation zunächst an zufälligen Orten platziert und hatten eine Kapazität von 4 Personen. Zusätzliche Tarife (Grundtarif, pro Minute oder pro Kilometer) können in den Simulationseinstellungen konfiguriert werden.

Für die Bewertung der Reisezeitersparnis (VTTS), der in der Simulation verwendet wird, um den (Un-)Nutzen des Agenten für die Nutzung eines Verkehrsmittels zu bestimmen, haben uns auf Studien aus der Literatur bezogen und den Wert auf 75% des VTTS der Fahrt mit einem herkömmlichen Auto festgelegt.

Weitere Details zur Methodik der Simulation sind in Kapitel 6 dieses Berichtes zu finden sowie auch in Müller et al. (2022).²

Arbeitspaket 4: Szenarien

Das Ziel von WP 4 war es, sich mit WP2 und WP3 und verschiedenen ExpertInnen der Interessensgruppen und der Industrie abzustimmen, um relevante Szenarien zu definieren. Szenarien wurden zum Beispiel anhand von Modellparametern wie Flottengröße, Bepreisung der SAEVs und räumliche Einschränkungen von SAEVs definiert. Da das MATSIM-Framework erfordert, dass diese Module aus anderen Quellen erstellt oder integriert werden, sind mehrere Iterationen der Simulationen erforderlich, um die Szenarien fertigzustellen. Da jede Simulation etwa einen Tag dauert und die Ergebnisse einen weiteren Tag für die Verarbeitung benötigen, kann

¹ Tomschy, R., Herry, M., Sammer, G., Klementsitz, R., Riegler, S., Follmer, R., Gruschwitz, D., Josef, F., Gensasz, S., Kirnbauer, R., & Spiegel, T. (2016). Österreich unterwegs 2013–2014: Ergebnisbericht zur österreichweiten Mobilitätshebung

² Müller, J., Straub, M., Richter, G., & Rudloff, C. (2022). Integration of Different Mobility Behaviors and Intermodal Trips in MATSim. *Sustainability*, 14(1), 428.

die Zusammenfassung einer Reihe von Szenarien mehrere Wochen in Anspruch nehmen.

Auf Basis dieser Szenarien-Definitionen wurden folgende Simulationen durchgeführt und in wissenschaftlichen Studien zusammengefasst:

Studie 1: Beschreibung des SAEV-Basismodells.

Studie 2: Analyse der Auswirkungen von SAEVs auf Randgebiete und deren Folgeemissionen.

Studie 3: Analyse der Emissionsbelastung auf der Ebene einzelner Einrichtungen, d. h. zu Hause, am Arbeitsplatz, in der Schule, in Einkaufszentren, bei Freizeitaktivitäten und an anderen Orten.

Darüber hinaus wurden die Zwischenergebnisse auf dem zweiten Stakeholder-Workshop vorgestellt und mit den TeilnehmerInnen diskutiert.

Arbeitspaket 5: Dissemination

Projekt-Website: Wir haben eine professionelle Website (www.SimSAEV.eu) entwickelt, die einen Überblick über das Projekt gibt und regelmäßig aktualisiert wurde, sobald neue Ergebnisse vorlagen.



Abbildung 2: Website (Startseite)

Zweiter Stakeholder-Workshop: Aufgrund der anhaltenden Pandemie wurde der zweite Stakeholder-Workshop im Oktober 2021 online organisiert. Der Schwerpunkt des Workshops lag auf der Vermittlung unserer Ergebnisse an relevante Stakeholder und auf der Diskussion der Auswirkungen unserer Ergebnisse für politische EntscheidungsträgerInnen und weitere Stakeholder.

Policy Briefs: Wir haben zwei Policy Briefs herausgegeben: einen über den Betrieb von SAEVs in bestimmten (suburbanen) Zonen und einen über die Veränderungen der Emissionsbelastung aufgrund der Einführung von SAEVs.

Zeitschriftenveröffentlichungen und Konferenzbeiträge: Im Rahmen von WP 2, WP 3 und WP 4 wurden mehrere wissenschaftliche Beiträge verfasst und bei einschlägigen Fachzeitschriften eingereicht.

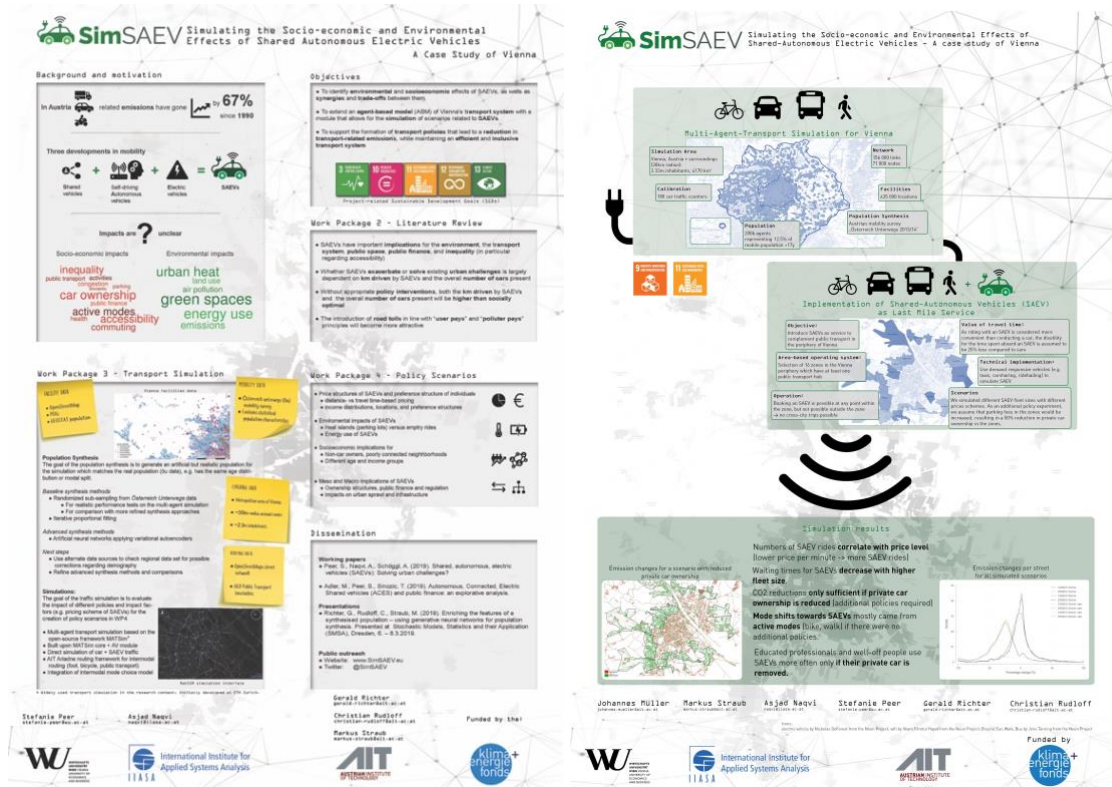


Abbildung 3: Posterpräsentation Klimatage 2019 & 2021

Zusammenfassung der Resultate (anhand der einzelnen Studien)

Naqvi, A., Peer, S., Schögl, A. (2019) Shared, autonomous, electric vehicles (SAEVs): solving urban challenges?

In dieser Studie haben wir die vorhandenen Erkenntnisse über die Auswirkungen von SAEVs auf verkehrsbezogene, soziale und ökologische Aspekte untersucht, die hauptsächlich auf bestehenden Simulationsstudien für verschiedene städtische Gebiete (u.a. Austin, Berlin, Zürich, Paris und Helsinki) basieren. Die meisten Studien konzentrieren sich auf verkehrsbezogene Ergebnisse und liefern schlüssige Beweise dafür, dass ohne weitere Maßnahmen, die die Nutzung von SAEVs einschränken (z. B. Straßenbenutzungsgebühren, eingeschränkte Betriebsbereiche), die Nachfrage nach Fahrten erheblich steigen wird. Die Ergebnisse in Bezug auf die Umweltindikatoren sind weniger eindeutig - auch ohne Verbrennungsmotor stoßen Autos erhebliche Mengen an lokalen Schadstoffen aus, die in etwa proportional zu den gefahrenen Kilometern sind. Die Auswirkungen auf die CO2-Emissionen hängen vom Basisszenario ab: Wenn die Einführung von SAEVs bedeutet, dass Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren ersetzt werden, werden die CO2-Emissionen wahrscheinlich sinken (es sei denn, der Strom zum Aufladen der Fahrzeuge stammt überwiegend aus fossilen Quellen). Die

Auswirkungen von SAEVs auf die Nutzung des öffentlichen Raums hängen weitgehend von den Annahmen in den Simulationsmodellen ab, ob die Fahrzeuge parken oder auf der Suche nach dem nächsten Kunden im Leerlauf bleiben. Soziale Indikatoren im Zusammenhang mit der Nutzung von SAEVs haben in der Literatur bisher nur wenig Beachtung gefunden, insbesondere im Zusammenhang mit personen-spezifischen Wohnorten. Studien, die die sozialen Auswirkungen von SAEVs untersuchen, betonen in der Regel Nutzergruppen, die derzeit von der Nutzung privater Autos ausgeschlossen sind (Kinder/Jugendliche, Behinderte), schenken aber anderen benachteiligten Gruppen wie Personen mit geringem Einkommen oder Menschen, die in relativ abgelegenen Gebieten leben, wenig Aufmerksamkeit. Insgesamt kommt die Studie (in Übereinstimmung mit anderen Studien) zu dem Ergebnis, dass Laissez-faire-Szenarien zu erheblichen negativen externen Effekten führen. Daher sind politische Maßnahmen erforderlich, um die nützliche Ergänzung der städtischen Verkehrssysteme durch SAEVs sicherzustellen.

Mit der Veröffentlichung neuer Literatur wurde diese Studie während der Laufzeit des Projekts mehrfach aktualisiert. Es ist derzeit als Working Paper verfügbar. Abbildung 4, die wir im Rahmen der Literaturrecherche und der Erstellung des Simulationsmodells auf Basis ein systemdynamischen Ansatzes erstellt haben, gibt einen Überblick darüber, wie komplex die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Effekten sind.

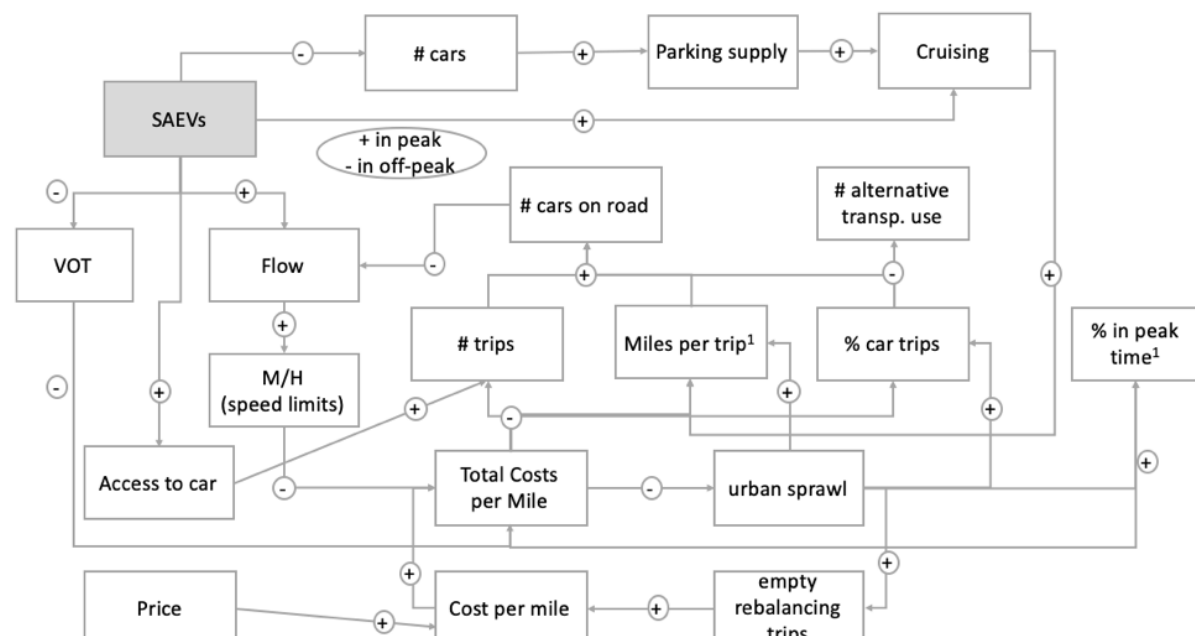


Abbildung 4: Auswirkungen von SAEVs (System Dynamics)

Adler, M. W., Peer, S., & Sinozic, T. (2019). *Autonomous, connected, electric shared vehicles (ACES) and public finance: An explorative analysis*. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2, 100038.

In den OECD-Ländern stammen derzeit 5-12 % der staatlichen und bis zu 30 % der lokalen Steuereinnahmen aus der Besteuerung von Kraftstoffen und Fahrzeugen. In diesem Paper argumentieren wir, dass mit dem Aufkommen von SAEVs ein erheblicher Rückgang der Steuereinnahmen aus Verbrennungskraftstoffen und Zulassungssteuern zu erwarten ist. Dies wird wahrscheinlich zur Einführung von Straßenbenutzungsgebühren nach dem Nutzer und Verursacherprinzip führen, die nicht nur die entgangenen Steuereinnahmen kompensieren, sondern auch zur Verringerung der Verkehrsüberlastung beitragen werden. Darüber hinaus argumentieren wir, dass die Innovation von Steuersystemen zur Anpassung an die sich verändernden technologischen Gegebenheiten wahrscheinlich zu einer Verlagerung der Macht auf die lokale, insbesondere städtische, Regierungsebene führen wird. Das Paper enthält auch eine Zusammenfassung von 24 Prognoseszenarien zur Verbreitung von SAEV bis 2050 (siehe Abbildung 5). Den Prognosen zufolge werden SAEVs in den nächsten zwei Jahrzehnten mehr als 50% des Marktes erobern und bis Mitte des Jahrhunderts fast den gesamten Markt. Car- und Ride-Sharing werden aufgrund von Preisvorteilen durch Skaleneffekte vor allem in städtischen Gebieten attraktiv sein.

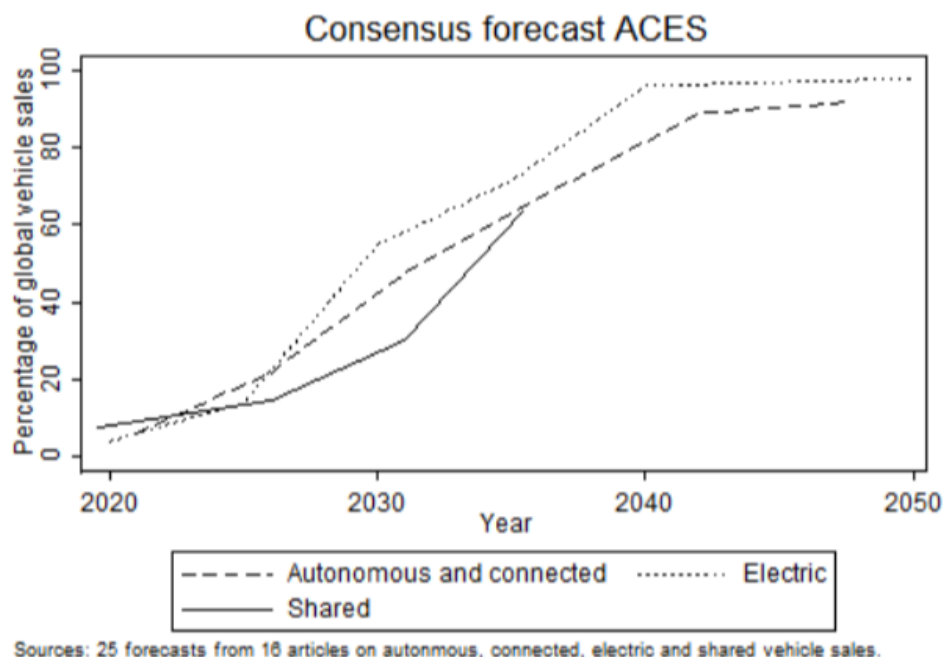


Abbildung 5: Consensus Forecast Einführung SAEVs (aus Adler et al., 2019)

Daher kommen wir in diesen ersten beiden Arbeiten zu dem Schluss, dass aufgrund von Pfadabhängigkeiten und dem Risiko von Lock-in-Effekten in suboptimalen Szenarien kurzfristige politische Maßnahmen in Bezug auf SAEVs erforderlich sind. Diese Erkenntnis steht auch in Zusammenhang mit einer der Hauptmotivationen von SimSAEV, den politischen EntscheidungsträgerInnen bereits jetzt Empfehlungen zu geben, auch wenn die Technologie noch nicht in größerem Maßstab verfügbar ist.

Müller, J., Straub, M., Naqvi, A., Richter, G., Peer, S., & Rudloff, C. (2021). MATSim Model Vienna: Analyzing the Socioeconomic Impacts for Different Fleet Sizes and Pricing Schemes of Shared Autonomous Electric Vehicles.

Dieses Paper beschreibt das von AIT entwickelte MATSim ABM-Modell einschließlich der Bevölkerungssynthese und der Verkehrsmittelmodule. Es wurde bereits im Vorfeld der 100TRB Jahrestagung, das im Januar 2021 online stattfand, veröffentlicht. Es beinhaltet verschiedene Kombinationen von unterschiedlichen SAEV-Preisstrategien und Flottengrößenszenarien für die Stadt Wien. Da die SAEVs gemeinsam genutzt werden, besteht das Ziel dieser Simulationen darin, die Kombination aus Preis und Flottengröße zu ermitteln, die zu einer Verringerung des Verkehrsaufkommens und der Emissionen führt, ohne dass die Mobilität der Menschen in Bezug auf die zurückgelegte Strecke und die Zeit erheblich beeinträchtigt wird. Darüber hinaus werden die unterschiedlichen Auswirkungen von SAEVs auf verschiedene sozioökonomische Gruppen, insbesondere hinsichtlich der Zugänglichkeit, hervorgehoben.

Der Gesamtgrenznutzen der Reisezeit für ein SAEV wurde vorhandener Literatur ermittelt und daher mit 0,75 des Grenznutzens der Reisezeit eines Pkw angenommen. Zusätzlich zu diesem Parameter erlaubt MATSim den Agenten eine direkte Abrechnung für jede Minute, in der der SAEV-Dienst genutzt wurde. In den politischen Experimenten reichen die Tarife von einem stark subventionierten Tarif (0,00 EUR/Min) bis zu einem teuren Tarif (0,50 EUR/Min). Die Flottengröße variierte von einer sehr kleinen Größe (100 Fahrzeuge in einer Simulation mit 12,5% der Bevölkerung) bis hin zu einem sehr großen Angebot an Fahrzeugen (2500 Fahrzeuge in einer Simulation mit 12,5% der Bevölkerung).

Ein Ergebnis der Experimente war, dass der SAEV-Modal-Split mit einer größeren Verfügbarkeit von Fahrzeugen und niedrigeren Fahrpreisen zunimmt. Während der Anteil bei 100 Fahrzeugen 0,5% betrug, stieg er bei 2500 Fahrzeugen auf bis zu 14%. Bei einer großen SAEV-Flotte stiegen etwa 10-15% der FußgängerInnen, 10-22% der RadfahrerInnen, 8% der AutofahrerInnen und 17% der NutzerInnen öffentlicher Verkehrsmittel auf SAEVs um. Je höher der Preis und je größer die Flotte, desto wahrscheinlicher war es, dass die Agenten vom Fahrrad oder zu Fuß auf SAEVs umsteigen. Diese Beobachtung lässt sich dadurch erklären, dass SAEV-Fahrten tendenziell kürzer sind, wenn die Preise steigen. Je höher die SAEV-Gebühren sind, desto weniger attraktiv ist der Umstieg vom Auto auf öffentliche Verkehrsmittel.

Wird die Zahl der SAEV-Fahrten nach Geschlecht aufgeschlüsselt, ergeben sich keine signifikanten Unterschiede zum allgemeinen Muster. Es zeigt sich jedoch, dass Frauen diesen Dienst etwas häufiger nutzen als Männer. Der Grund dafür liegt vermutlich in der unterschiedlichen Verfügbarkeit von Autos. Der SAEV-Dienst war vor allem für Bedienstete ohne eigenes Auto eine attraktive Option. Bei niedrigeren SAEV-Tarifen war die durchschnittliche Dauer einer SAEV-Fahrt deutlich kürzer, für Agenten, die kein Auto besaßen. Bei höheren Tarifen verschwand dieser

Unterschied. Folglich machen niedrigere SAEV-Tarife kürzere Fahrten auch für Nicht-AutobesitzerInnen attraktiv.

Die Gesamteinsparungen bei der Reisezeit sind marginal, werden aber deutlich, wenn SAEV-Fahrten mit der Reisezeit des Basisszenario verglichen werden. Bei diesen Fahrten kann die Reisezeit um bis zu 15 Minuten reduziert werden, während die Gesamtreisezeit nur um 0,5 Minuten sinkt.

Peer, S., Müller, J., Naqvi, A., & Straub, M. (2022). Accessibility, socioeconomic and climate impacts of zone-based shared, electric, autonomous vehicles (SAEVs): simulating the case of Vienna

In diesem Paper werden die Auswirkungen auf Reisezeiten, CO₂-Emissionen und verschiedene sozioökonomische Gruppen untersucht, als Folge der Einführung von SAEVs in das öffentliche Verkehrssystem am Rande einer Stadt (Wien, Österreich). Das Wiener System des Öffentlichen Personen- und Nahverkehrs (ÖPNV) ist im Allgemeinen von sehr hoher Qualität, wird aber, wie in den meisten Städten, mit zunehmender Entfernung vom Stadtzentrum deutlich ausgedünnt. In diesem Paper beschränken wir das Einsatzgebiet der SAEVs auf bestimmte Zonen am Stadtrand, in denen aufgrund der geringeren Bevölkerungsdichte die Bereitstellung eines flächendeckenden konventionellen (fahrplanmäßigen, leistungsfähigen) öffentlichen Verkehrs ineffizient ist, die aber dennoch mindestens eine gut bediente U-Bahn- oder Eisenbahnstation enthalten. Es wird davon ausgegangen, dass SAEVs Teil oder Ergänzung des öffentlichen Verkehrssystems sind und als bedarfsgesteuerte Fahrzeuge mit Mehrfachbelegungsoptionen fungieren. Die Karte in Abbildung 6 zeigt die definierten Zonen in den Außenbezirken der Stadt Wien.

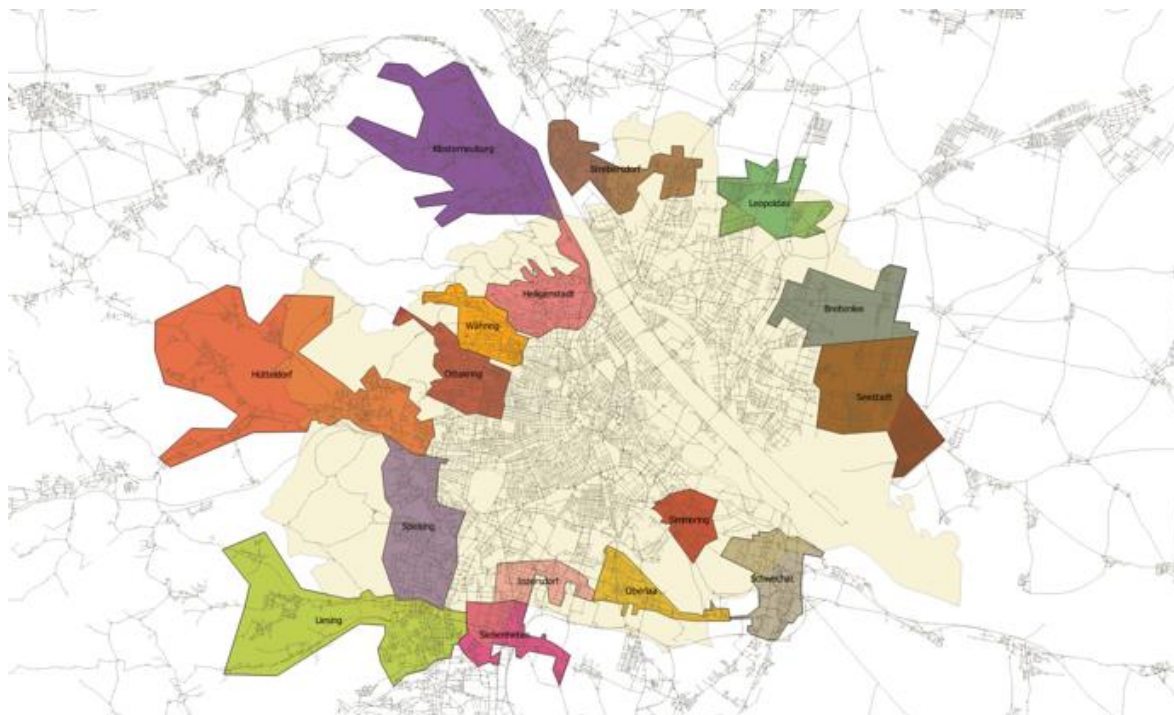


Abbildung 6: Betriebsgebiete der SAEVs

Bei den SAEVs wurden zwei unterschiedlichen Flottengrößen (1118 bzw. 2338 SAEVs bei einer Simulation von 12.5% der Bevölkerung, das einer Anzahl von 12 bzw. 25 SAEVs pro 1000 Orten für die Ausübung einer Aktivität entspricht) sowie drei unterschiedlichen SAEV Tarife (0 EUR/min, 0.1 EUR/min, 0.3 EUR/min) simuliert. Neben den Kombinationen aus unterschiedlichen Flottengrößen und Preisen, wurden darüber hinaus Szenarien analysiert, in denen sich Besitz bzw. die Nutzung von privaten Autos verteuert. Letzteres sollte die AutonutzerInnen vermehrt dazu veranlassen, alternative Optionen zu prüfen, einschließlich des Umstiegs auf SAEVs.

Für alle Kombinationen von hoher und niedriger SAEV-Flottengröße und Tarifen stellen wir fest, dass ein relativ kleiner Anteil der Autofahrten von BewohnerInnen dieser Zonen (7-14%) durch SAEVs ersetzt wird, was zu CO₂-Emissionsreduktionen von 5-11% führt. Im Gegensatz dazu werden 23-35% der mit aktiven Verkehrsmitteln (zu Fuß, mit dem Fahrrad) unternommenen Fahrten durch SAEVs ersetzt, und 10-20% der Fahrten mit öffentlichen Verkehrsmitteln. Das Potenzial von SAEVs, zu einer geringeren Nutzung und einem geringeren Besitz von Privatfahrzeugen in Vorstädten zu führen, scheint daher begrenzt zu sein. Das Potenzial wird etwas größer, wenn die Nutzung und der Besitz von Privatfahrzeugen teurer werden, was dazu führt, dass 17-20% der Autofahrten durch SAEVs ersetzt werden und die CO₂-Emissionen um bis zu 32% sinken. Während der Umstieg von aktiven Verkehrsoptionen und öffentlichen Verkehrsmitteln auf SAEVs in der Regel mit einer Verkürzung der Fahrtzeit einhergeht, ist bei Fahrten, die ursprünglich mit dem Auto unternommen wurden, das Gegenteil der Fall.

Aus einem sozioökonomischen Blickwinkel können wir feststellen, dass SAEV-Nutzer etwas seltener männlich und alleinstehend sind und häufiger Kinder haben als der Bevölkerungsdurchschnitt. Darüber hinaus haben sie seltener ein Auto oder eine Fahrkarte für öffentliche Verkehrsmittel.

Naqvi, A., Peer, S., Müller, J., & Straub, M. (2022). The spatial-temporal distribution of exposure to traffic-related PM emissions and the role of SAEVs: A case study of Vienna

Das dritte Paper in diesem Arbeitspaket baut auf den Szenarien der ersten beiden Papiere auf. Hierbei werden die Auswirkungen von SAEVs auf die Pkw-Emissionen und die Emissionsbelastung der VerkehrsteilnehmerInnen sowohl während der Fahrt als auch an verschiedenen Orten untersucht. In diesem Paper wird die räumliche Verteilung der VerkehrsteilnehmerInnen nach verschiedenen sozioökonomischen Merkmalen in der Stadt Wien untersucht.

In der Literatur gibt es ausreichend Belege dafür, dass schädlichen Schadstoffe, die von Autos erzeugt werden, insbesondere Feinstaub (*particulate matter* PM), für die menschliche Gesundheit sehr schädlich sind. Die Konzentration dieser Schadstoffe ist in der Nähe von Hauptverkehrsstraßen und Autobahnen hoch und kann sich auf nahegelegene Einrichtungen wie Wohnhäuser, Schulen und Arbeitsplätze usw. ausbreiten, insbesondere in einem Umkreis von 150 bis 200 Metern. In der Literatur wird zwar ausführlich über die Exposition gegenüber Emissionen in Abhängigkeit von der Nähe zu verschiedenen Straßenverbindungen und dem sozioökonomischen Status gesprochen, doch gibt es nur sehr wenige Hinweise auf die zeitlichen Schwankungen dieser Exposition im Laufe eines Tages. Dazu ein Beispiel: Ein Bürger, der in einem grünen Außenbezirk von Wien wohnt, ist vielleicht nur sehr geringen Emissionen ausgesetzt. Wenn er jedoch in die inneren Bezirke pendelt und dort arbeitet, wo ein hohes Verkehrsaufkommen herrscht, dann ist die Belastung am Arbeitsplatz hoch. Ein wichtiger Grund dafür ist, dass tatsächliche Emissionsdaten und tatsächliche Reisemuster bei einer so feinen Auflösung nur schwer miteinander verknüpft werden können.

Da uns das MATSIM-Modell eine genaue Simulation der Stadt Wien für eine repräsentative Gruppe von Agenten liefert, können wir mit dem Emissionsmodul die von Autos verursachten Emissionen auf Straßenebene berechnen und ziemlich genau bestimmen, welche Einrichtungen in welchem Zeitraum von Schadstoffbelastung betroffen sind.

Abbildung 7 unten zeigt die Gesamtverteilung der Emissionen auf Straßenebene. Die linke Abbildung zeigt die PM-Emissionen mit hohen Konzentrationen um Hauptverkehrsstraßen. Die rechte Abbildung zoomt auf ein bestimmtes Gebiet und zeigt die Verteilung der Emissionen, die sich auf nahe gelegene Einrichtungen auswirken.

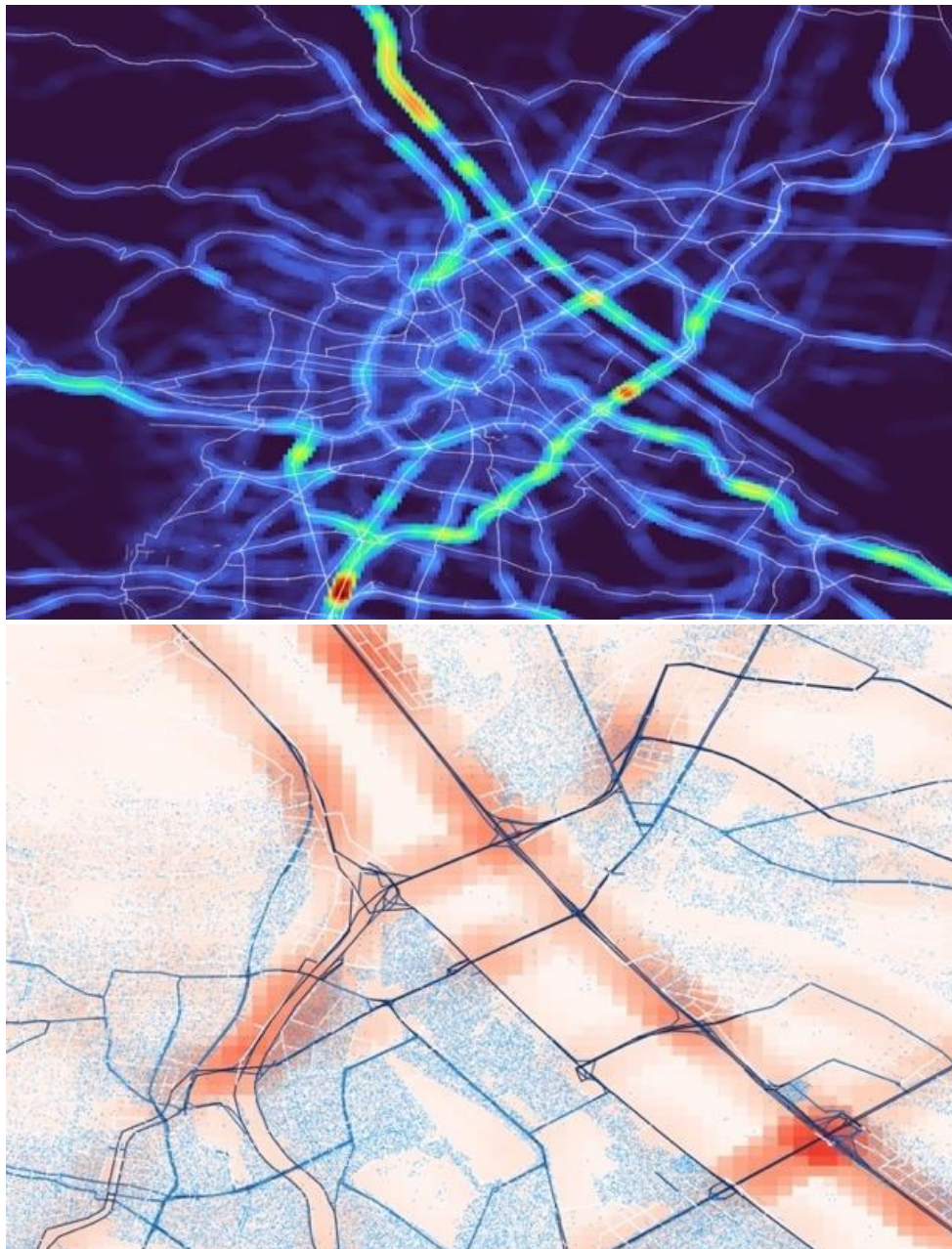


Abbildung 7: Geographische Visualisierung der Emissionen (Beispiele)

Die Abbildungen 8 und 9 zeigen, wie diese Emissionen je nach Tageszeit sowohl während der Reisezeit als auch an verschiedenen Einrichtungen variieren. Die durchgezogene Linie stellt das Basisszenario dar, während die gepunktete Linie die SAEV-Simulation mit der höchsten Flottengröße (2500 SAEVs) zeigt. Die zeitlichen Trends zeigen, dass die Emissionen während der Hauptverkehrszeiten hoch sind. Außerdem gibt es beträchtliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Standorten. Nach 6 Uhr morgens beispielsweise ist der größte Teil der Belastung an Arbeitsplätzen und Bildungseinrichtungen zu verzeichnen. Am Nachmittag nimmt die Exposition an Wohnorten zu. In ähnlicher Weise ist die Feinstaubbelastung während der Reisezeit am höchsten, wenn man zu Fuß geht. Obwohl Autos im Vergleich zum Gehen eine relativ geringere Exposition gegenüber

Emissionen aufweisen, bedeutet ein hohes Autoaufkommen, dass die kumulative Exposition gegenüber Emissionen in Autos ebenfalls relativ hoch ist.

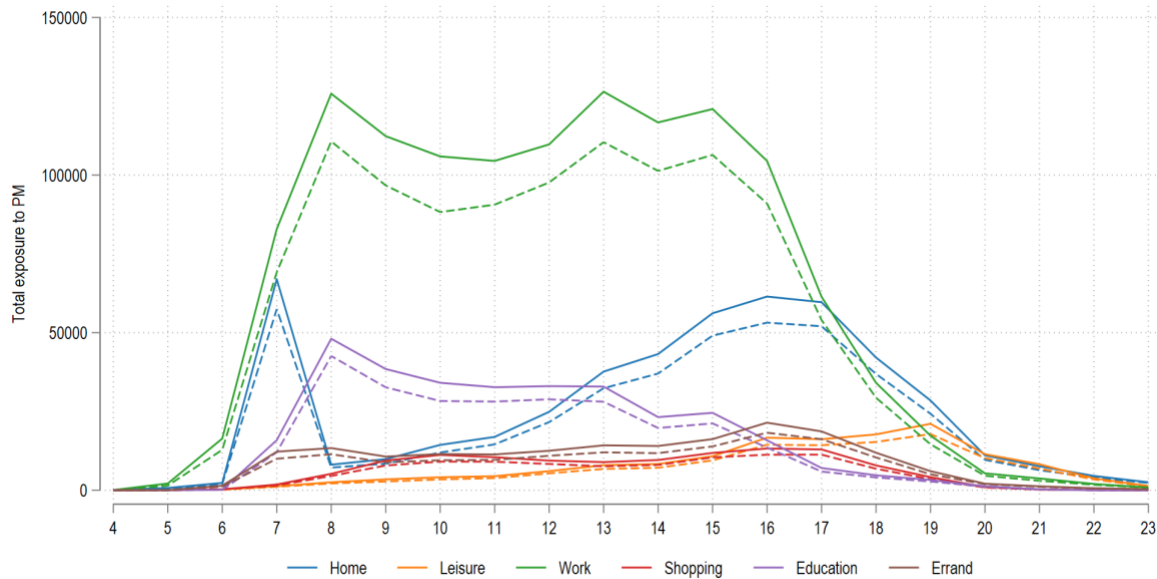


Abbildung 8: Zeitliche Verteilung der Emissionen nach Standort

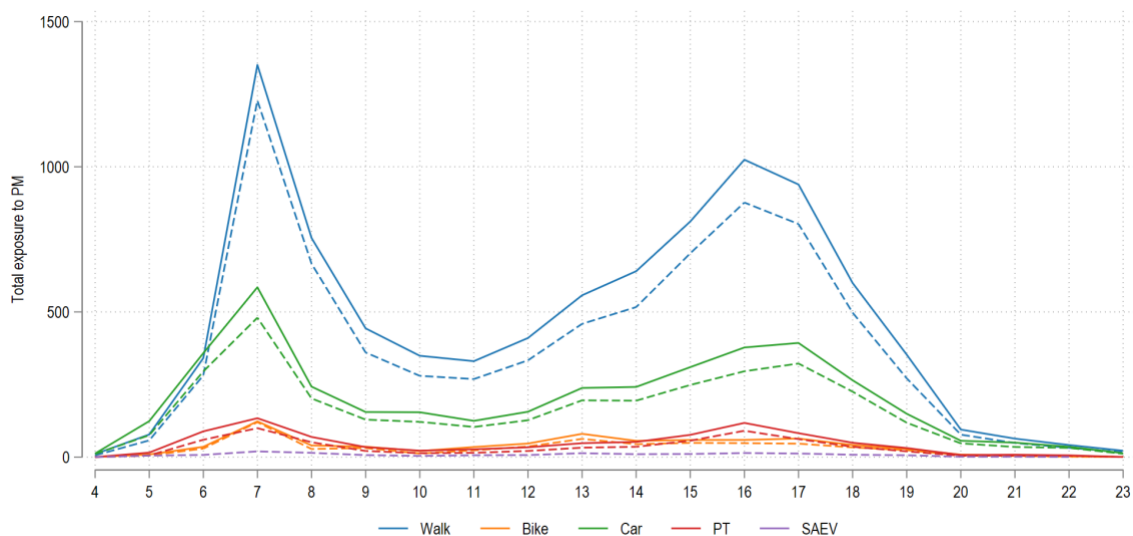


Abbildung 9: Zeitliche Verteilung der Emissionen nach Verkehrsmittel

Zusätzlich dazu zeigen die Ergebnisse auch eine interessante räumliche Verteilung. Agenten, die in der Nähe des Stadtzentrums (innerhalb der Ringstraße) wohnen oder arbeiten, sind den Emissionen viel stärker ausgesetzt, da sie während der Einführung der SAEVs den stärksten Rückgang der Feinstaubkonzentration in der Umgebung ihrer Einrichtungen verzeichnen.

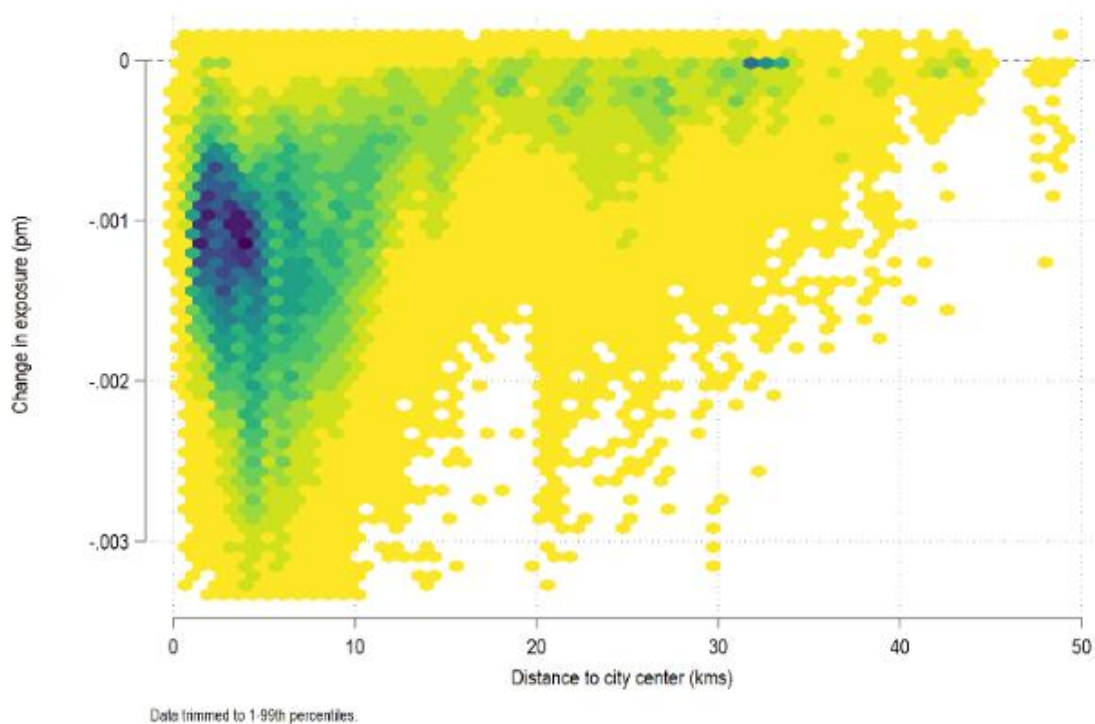


Abbildung 10: Feinstaubbelastung nach Wohnort

Diese Informationen können auch nach soziodemografischen Indikatoren wie Alter, Geschlecht, Familienzusammensetzung und Einkommensniveau aufgeschlüsselt werden, um eine sehr umfassende Verteilungsanalyse zu erhalten.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Inhaltliche Schlussfolgerungen

Synergien und trade-offs zwischen sozioökonomischen, umwelt- und verkehrsbezogenen Auswirkungen von SAEVs (basierend auf der einschlägigen Literatur)

Ausgangspunkt dieses Projekts war die Untersuchung der umweltbezogenen, sozioökonomischen und verkehrsbezogenen Aspekte von gemeinsam genutzten, autonomen Elektrofahrzeugen mit besonderem Augenmerk auf Synergien und Zielkonflikte zwischen diesen Auswirkungen. Der Literaturüberblick ergab eine große Heterogenität der Auswirkungen von SAEVs, je nachdem, welche Annahmen in den zugrunde liegenden Modellen verwendet wurden. Da SAEVs heutzutage noch nicht existieren, ist es schwierig festzustellen, welche Annahmen näher an der Realität sind als andere, und die Abhängigkeit von unterschiedlichen Annahmen erschwert auch den Vergleich spezifischer Effekte zwischen verschiedenen Studien. Bei unserer Literaturrecherche stellte sich heraus, dass Car- und Ride-Sharing eine der wichtigsten Annahmen ist: Die Bereitschaft zum Teilen bestimmt in hohem Maße die Anzahl der Autos auf der Straße, die

Preisgestaltung, die Flottengröße und andere Parameter, die sich wiederum auf die ökologischen, sozioökonomischen und verkehrsbezogenen Auswirkungen von SAEVs auswirken. Ohne die endgültige Verbreitungsrate sowie die Technologie auf dem Markt zu kennen, ist es schwierig, die Qualität der verschiedenen Annahmen zu bewerten.

Eine wichtige Erkenntnis aus der Literaturrecherche, die auch für die Politik von großer Bedeutung ist, besteht darin, dass Laissez-faire-Szenarien, bei denen SAEVs nicht reguliert werden, tendenziell zu negativen Ergebnissen in allen Dimensionen führen. Eine weitere wichtige Erkenntnis, die aus den meisten Studien hervor ging, ist die Zunahme der gefahrenen Fahrzeugkilometer, die jedoch nicht unbedingt auf den Umstieg von AutobesitzerInnen/-nutzerInnen auf SAEVs zurückzuführen ist, sondern zu einem großen Teil auf den Umstieg von ehemaligen NutzerInnen öffentlicher aktiver Verkehrsmittel auf SAEVs.

Implikationen von SAEVs für die Staatsfinanzen

Da andere Auswirkungen von SAEVs bereits in verschiedenen Beiträgen untersucht wurden, haben wir uns auf ein spezielles Thema konzentriert, das bisher vernachlässigt wurde, obwohl es starke Auswirkungen auf die Gesellschaft haben könnte: die Staatsfinanzen. Wir liefern eine explorative Analyse, die für mehrere europäische Länder zeigt, dass sich die Steuereinnahmen im Zusammenhang mit Autos auf 5-10 % der gesamten Steuereinnahmen belaufen. Auf lokaler Ebene kann der Anteil sogar noch höher sein und stammt hauptsächlich aus Parkgebühren und verkehrsbezogenen Bußgeldern. Wir haben verschiedene Gründe ermittelt, warum diese öffentlichen Einnahmen mit der Einführung von SAEVs voraussichtlich sinken werden. Ein Grund ist, dass ein großer Teil der Staatseinnahmen auf die Besteuerung fossiler Brennstoffe (und damit verbundenen Mehrwertsteuern) zurückzuführen ist. Diese fallen jedoch mit den Elektrofahrzeugen weg. Eine entsprechende Erhöhung der Steuern auf Elektrizität zum Ausgleich dieses Effekts ist nicht realistisch. SAEVs können auch leicht Parkgebühren - indem sie außerhalb von bewirtschafteten Parkzonen parken - und Bußgelder - indem sie so programmiert werden - vermeiden. Auf Seiten der Steuerausgaben könnten, zumindest vorübergehend, Investitionen für spezielle/zusätzliche Infrastruktur erforderlich sein, sobald SAEVs auf den Markt kommen (z. B. 5G-Abdeckung). Aus den geringeren Steuereinnahmen in Verbindung mit dem Anstieg der Ausgaben lässt sich ein starkes Argument für die Einführung zusätzlicher Preisinstrumente ableiten. Solche Preisinstrumente können zeitlich und räumlich stark differenziert sein, so dass die externen Effekte (Treibhausgas- und lokale Emissionen, Staus, Lärm) internalisiert werden. Die Hürden für ein solches Preisinstrument sind wahrscheinlich niedriger als beim Status quo, da autonome Fahrzeuge in jedem Fall rückverfolgt werden müssen (daher spielen hier zusätzliche Datenschutzbedenken kaum eine Rolle) und der Preis eher implizit sein könnte (z. B. ähnlich wie beim „Surge Pricing“, das derzeit bereits von Unternehmen wie Uber eingesetzt wird). Wir argumentieren in diesem

Papier, dass Städte bei der Umsetzung solcher Preisinstrumente eine dominante Rolle spielen könnten, da hier die negativen externen Effekte von SAEVs wahrscheinlich stärker ins Gewicht fallen (zusätzliche Staus usw.). Diese Ergebnisse haben starke Auswirkungen auf zukünftige politische Maßnahmen auf lokaler und staatlicher Ebene.

Implikationen von SAEVs auf Basis der Simulationsstudien

In diesem ersten simulationsbasierten Paper wurden mehrere Szenarien für SAEV-Flotten im Großraum Wien vorgestellt. Verschiedene Flottengrößen und Preissysteme wurden im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf die Verkehrsverlagerung, die Reisezeit und die Nutzung durch verschiedene sozioökonomische Gruppen analysiert. Es ist wenig überraschend, dass der SAEV-Modal-Split mit einer größeren Verfügbarkeit von Fahrzeugen und niedrigeren Tarifen steigt. Bei einer großen SAEV-Flotte steigen etwa 10-15% der FußgängerInnen, 10-22% der RadfahrerInnen und 17% der NutzerInnen öffentlicher Verkehrsmittel, aber nur 8% der AutofahrerInnen auf SAEVs um. Diese Szenarien deuten also darauf hin, dass die Erweiterung des Mobilitätsangebots um SAEVs für die meisten AutofahrerInnen (die in unseren Simulationen die einzigen sind, die CO₂-Emissionen verursachen) keinen ausreichenden Anreiz zum Umstieg bietet, insbesondere weil die Nutzung von SAEVs für AutofahrerInnen fast immer mit längeren Fahrzeiten einhergeht. Auch wenn sich die Reisezeiten für die meisten FußgängerInnen, RadfahrerInnen und NutzerInnen öffentlicher Verkehrsmittel verkürzen, wenn sie auf SAEVs umsteigen, müssen diese individuellen Vorteile den potenziellen negativen gesellschaftlichen Folgen gegenübergestellt werden, einschließlich negativer Auswirkungen auf die öffentliche Gesundheit, eines höheren (öffentlichen) Platzbedarfs und des Mohring-Effekts, der zur Folge hat, dass sich die öffentlichen Verkehrsdienste tendenziell verschlechtern, wenn sich die NutzerInnenbasis verkleinert.

Im zweiten Paper werden SAEVs nur in bestimmten Zonen am Stadtrand von Wien zugelassen, die mit einem schienengebundenen öffentlichen Verkehrsmittel verbunden sind. Unsere Ergebnisse ähneln denen der ersten Studie insofern, als auch hier die Mehrheit der SAEV-NutzerInnen aus Personen besteht, die im Basisszenario öffentliche oder aktive Verkehrsmittel genutzt haben. Dies ist wiederum darauf zurückzuführen, dass diese Personen durch den Umstieg auf SAEVs von kürzeren Fahrzeiten profitieren, während SAEVs für Personen, die im Basisszenario ihren Privatwagen nutzen, in der Regel längere Fahrzeiten bedeuten. Große Reduzierungen der CO₂-Emissionen (bis zu 35%) können nur mit großen SAEV-Flotten, sehr niedrigen Tarifen (0 EUR/km) und ergänzenden Maßnahmen, die die Nutzung und den Besitz von Privatfahrzeugen verteuern, erreicht werden.

Im dritten Paper wird die Rolle von SAEVs bei der Verringerung der Emissionsbelastung erörtert. Dieses Papier hat wichtige politische Implikationen, insbesondere in Bezug auf die Emissionsbelastung nach Tageszeit, Reisemodus und Aufenthaltsdauer vor Ort. Die Ergebnisse dieser Studie können dazu

beitragen, gezieltere politische Maßnahmen zur Verringerung der Emissionen in verschiedenen Teilen der Städte und in verschiedenen Zeitzonen zu entwickeln. So könnten beispielsweise SAEVs zu bestimmten Zeiten in Bereiche mit hoher Belastung umgeleitet werden, z. B. zu Schulen. Diese Analyse kann auch helfen, die sozioökonomischen und demografischen Unterschiede besser zu verstehen, die bestimmte Gruppen stärker belasten könnten als andere. Unsere Analyse zeigt beispielsweise, dass ältere Menschen und einkommensschwächere Gruppen, die in der Nähe größerer Straßen leben, sowohl zu Hause als auch am Arbeitsplatz einer viel höheren Belastung ausgesetzt sind.

Wenn die Anzahl der SAEV-Fahrten nach sozioökonomischen Merkmalen aufgeschlüsselt wird, ergeben sich im Allgemeinen keine signifikanten Unterschiede zum allgemeinen Bevölkerungsmuster. Es zeigt sich lediglich, dass Frauen diesen Dienst etwas häufiger nutzen als Männer. Als Grund hierfür werden Unterschiede in der Verfügbarkeit von Autos vermutet. Der SAEV-Dienst war insbesondere für Personen ohne eigenes Auto eine attraktive Option.

Zielgruppen-spezifische Empfehlungen & Implikationen:

Wir haben mehrere Zielgruppen für unsere Erkenntnisse identifiziert:

Wissenschaft:

Die Forschung über SAEVs hat in den letzten Jahren stark zugenommen, und unsere Ergebnisse tragen zu dieser umfangreichen Literatur bei. Unsere Forschungsergebnisse wurden auf Konferenzen gut aufgenommen, und die bereits veröffentlichten Paper haben, gemessen an den Zitaten, ebenfalls Interesse erweckt (zum Beispiel hatte die Publikation über die Auswirkungen von SAEVs auf die Staatsfinanzen (2019) bis Ende 2021 26 Zitate auf Google Scholar). Die Entwicklung des MATSim-Modells für Wien, das in der Literatur, auf Github und bei den jährlichen MATSim-Nutzertreffen vorgestellt wurde, führte ebenfalls zu einer größeren Bekanntheit in der technischen Forschungsgemeinschaft.

Politische EntscheidungsträgerInnen:

Sowohl die Literaturlauswertungen (zu den Auswirkungen von SAEVs im Allgemeinen und zu den Auswirkungen auf die Staatsfinanzen) als auch unsere Simulationsergebnisse deuten stark darauf hin, dass politische EntscheidungsträgerInnen auf lokaler und nationaler Ebene eine aktive Rolle bei der Einführung von SAEVs als Verkehrsmittel übernehmen müssen. Laissez-faire-Politiken sind in der Regel nicht erfolgreich, insbesondere im Hinblick auf die Verkehrsüberlastung. Im Rahmen dieses Projekts haben wir mehrere Arten von Maßnahmen untersucht. Wir haben verschiedene Preisgestaltungsmaßnahmen sowohl für SAEVs als auch für herkömmliche Privatfahrzeuge (die ihre Nutzung und/oder ihren Besitz verteuern), die Beschränkung des Einsatzgebiets von SAEVs auf die Außenbezirke von Wien und verschiedene Flottengrößen untersucht.

Während die Regulierung von Flottengrößen und Einsatzgebieten wahrscheinlich der lokalen Verwaltungsebene (z.B. der Stadt Wien) zugewiesen werden würde, können Preisinstrumente auf lokaler und/oder nationaler Ebene implementiert werden. Die Verwaltungsebene, die den Preis als erste festlegt, könnte von einem First-Mover-Vorteil profitieren, indem sie die Finanzströme für sich nutzen und die Gebühren (aus ihrer Sicht) optimal festlegen kann.

Öffentliche Verkehrsbetriebe:

SAEVs können beträchtliche Auswirkungen auf öffentliche Verkehrsnetze haben, entweder als Ersatz oder als Ergänzung. Indem wir verschiedene SAEV-Preise simulieren, können wir implizit auch Rückschlüsse auf verschiedene Eigentumsstrukturen ziehen. Ein Preis von 0 Cent/SAEV-Fahrt wird z.B. nur dann zustande kommen, wenn SAEVs Teil des (subventionierten) öffentlichen Verkehrs sind und Personen, die eine Jahreskarte für den öffentlichen Verkehr besitzen, keine Grenzkosten für eine zusätzliche Fahrt haben. Insbesondere die Ergebnisse unserer Studie über die Nutzung von SAEVs in den Außenbezirken der Städte, könnten daher für öffentliche Verkehrsbetriebe von großer Bedeutung sein.

Nichtregierungsorganisationen (NGOs) (z. B. im Zusammenhang mit städtischem Wandel und nachhaltiger Mobilität):

Unsere Ergebnisse könnten für verschiedene NGOs relevant sein, z.B. für jene, die sich mit nachhaltiger Mobilität (z.B. Verkehrsclub Österreich (VCO)), städtischer Raumnutzung (z.B. "Platz für Wien") oder Verkehr im Allgemeinen (z.B. Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV)) beschäftigen.

Private Unternehmen

Wie die Teilnahme von Vertretern privater Unternehmen an unserem Workshop gezeigt hat, können einige unserer Modellierungsbemühungen und -ergebnisse auch für die Entwicklung/Verbesserung des Geschäftsmodells privater Unternehmen, die Dienstleistungen und Produkte im Zusammenhang mit Carsharing, autonomem Fahren und E-Fahrzeugen anbieten (oder dies planen), von Relevanz sein.

EndnutzerInnen und BürgerInnen im Allgemeinen

Für einige Gruppen von EndnutzerInnen werden SAEVs eine zusätzliche erschwingliche und bequeme Verkehrsmittelwahlalternative darstellen und damit die Notwendigkeit verringern, ein herkömmliches Auto (und einen Parkplatz) zu besitzen. Weitere positive Effekte, die den BürgerInnen unabhängig von der Nutzung von SAEVs zugutekommen, sind eine geringere Belastung durch Schadstoffe (z. B. PM_{2,5}-Feinstaub) sowie eine verbesserte Qualität des

öffentlichen Raums, wenn frei werdende Parkplätze in Grünflächen, Spielplätze oder Fahrradwege umgewandelt werden.

C) Projektdetails

6 Methodik

Die zentrale Methode dieses Projekts basiert auf einem **mesoskopischen Verkehrsmodell für die Stadt Wien**. Das verwendete Simulationsgrundlage **MATSim** ist ein Open-Source-Projekt, das bereits in vielen Städten auf der ganzen Welt eingesetzt wurde. Der Aufbau ist für jede neue Stadt herausfordernd, da, die Grundlage der agentenbasierten Simulation immer an die national verfügbaren Daten angepasst werden muss. Im Rahmen von SimSAEV wurden SAEVs zum mesoskopischen Verkehrsmodell hinzugefügt und verschiedene Szenarien simuliert, um ein besseres Verständnis der verkehrsbezogenen, ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen von SAEVs zu erhalten.

SAEVs wurden bereits in mehreren anderen MATSim-Modellen anderer Städte berücksichtigt. Im Gegensatz zu den bestehenden Studien, die SAEVs berücksichtigen und eher ingenieurwissenschaftlich orientiert sind, legen wir den Schwerpunkt auf die sozioökonomischen und ökologischen Auswirkungen von SAEVs.

Agentenbasierte Verkehrsmodellierung ist der höchste Standard für eine Verkehrssimulation. In MATSim werden die ersten drei Schritte des Vierstufenmodells der Verkehrsplanung (d.h. die Verkehrserzeugung, die Verkehrszielwahl und die Verkehrsaufteilung (Verkehrsmittelwahl)) zusammen gedacht und in der Population der Agenten abgebildet. Die Populationserzeugung lässt sich mit vorhandenen Erhebungen wie Österreich Unterwegs 2013/14 gut durchführen und gewährt in Kombination mit dem Verkehrsnetz die bestmögliche und präziseste Verkehrsumlegung.

Die Verkehrsumlegung, die in hoher Präzision auf räumlicher und zeitlicher Ebene in MATSim abgebildet werden kann, ermöglicht eine genaue Zuordnung von Emissionen sowohl auf das Straßennetzwerk, als auch auf Agenten. Nur dadurch ist eine Charakterisierung der für die Emissionserzeugung verantwortlichen Agenten, sowie eine genaue räumliche Beschreibung der Auswirkungen der Emissionen möglich.

Andere mesoskopische Simulationsplattformen (z.B. PTV Visum) sind kommerziell und mit sehr hohen jährlichen Kosten verbunden. Die Modelle sind nicht eigenständig beliebig konfigurierbar und beschränken sich in der Modularität auf den Erweiterungen des Herstellers. Somit wäre z.B. das modular angeschlossene

Ariadne-Routing in unserem MATSim-Modell nicht anwendbar in Verbindung mit kommerziellen Modellen.

Die für die Modellierung der SAEV notwendigen Module sind neueste Entwicklungen der MATSim-Community und im Gegensatz zu kommerzieller Software in der Fachliteratur dokumentiert.

Hintergrund Simulationsmodell

Das MATSim Modell wird in den nächsten Abschnitten kurz dargestellt. Eine detailliertere Darstellung ist in Müller et al. (2022)³ zu finden.

Agentenpopulation und geographische Verortung

Grundlage für die Agentenpopulation (d.h. die simulierte Bevölkerung im Modell) in Wien ist die nationale Mobilitätsstudie "Österreich Unterwegs 2013/2014"⁴, das repräsentative Daten zum Verkehrsverhalten enthält. In den Daten werden neben den soziodemografischen Merkmalen der Befragten auch Herkunft, Ziel und Zweck der Fahrten vermerkt.

MATSim erfordert eine punktgenaue Bestimmung von Reisezielen und -ursprüngen. Da diese Daten in der nationalen Mobilitätsstudie nur auf Kreisebene erhoben wurden, musste eine Disaggregation vorgenommen werden. Dazu wurden zunächst mit Hilfe von Bevölkerungsdaten, OpenStreetMap-Daten und Daten der Wirtschaftskammer alle möglichen Orte zur Ausübung einer Tätigkeit, so genannte Einrichtungen, lokalisiert. Diese wurden dann zu Einrichtungsclustern zusammengefasst.

Routing

Routing beschreibt die Routenplanung von Individuen unter Berücksichtigung verfügbarer Optionen. Das am AIT entwickelte Routing-Framework Ariadne wurde verwendet, um eine Cluster-OD-Matrix der Reisezeiten für alle relevanten Verkehrsträger (zu Fuß, mit dem Fahrrad, mit öffentlichen Verkehrsmitteln und mit dem Auto) zu berechnen. Anhand dieser Cluster-OD-Matrix konnte ein Optimierungsalgorithmus das am besten passende Herkunfts- und Zielcluster ermitteln, das der in der Umfrage angegebenen Reisezeit entspricht.

Ariadne wurde auch als Routing-Framework für die eigentliche Simulation verwendet und ist besonders für intermodales Routing geeignet. Dies spielte bei der Simulation der Maßnahmen mit SAEV eine große Rolle, da die Fahrzeuge auch intermodal mit dem öffentlichen Nahverkehr eingesetzt werden sollten. Abbildung 11 zeigt den Schritt in der Iteration der Simulation, in der Ariadne verwendet wird, um den Agenten mit Alternativen zu versorgen. Bei den Alternativen handelt es

³ Müller, J., Straub, M., Richter, G., & Rudloff, C. (2022). Integration of Different Mobility Behaviors and Intermodal Trips in MATSim. *Sustainability*, 14(1), 428.

⁴ Tomschy, R., Herry, M., Sammer, G., Klementsitz, R., Riegler, S., Follmer, R., Gruschwitz, D., Josef, F., Gensasz, S., Kirnbauer, R., & Spiegel, T. (2016). Österreich unterwegs 2013–2014: Ergebnisbericht zur österreichweiten Mobilitätsstudie.

sich entweder um alternative Autorouten auf dem Netz (ReRoute) oder um alternative Routen mit einem anderen Verkehrsmittel (AriadneReRoute).

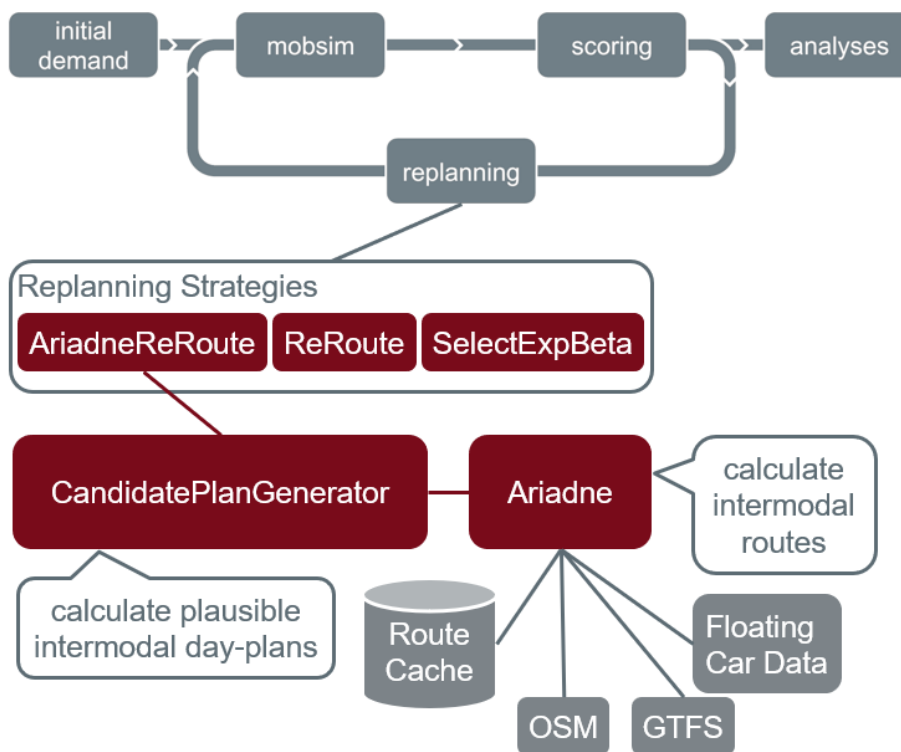


Abbildung 11: Erweiterung der MATSim-Standardschleife mit intermodaler Planerstellung

Kalibrierung

Für die Kalibrierung wurde der Modal Split der Stadt Wien als Hauptreferenz genommen. Gleichzeitig wurden die Verkehrsmengen auf bestimmten Strecken mit Zähldaten der ASFINAG und der Stadt Wien kalibriert. Für die Spitzenstunden ergibt das Modell einen normierten mittleren relativen Fehler an den Zählstellen in Wien von 34,2% in der morgendlichen und 33,0% in der abendlichen Rushhour. Die Summe der relativen Fehler beträgt -5,9% in der Früh und -14,2% am Abend.

In der Validierungsphase wurden verschiedene Statistiken mit den Originaldaten von „Österreich Unterwegs 2013/2014“ verglichen. Abbildung 12 zeigt die prozentualen Verteilungen der gemeldeten und simulierten Fahrtstrecken. Die Verteilungen stimmen weitgehend überein, mit Abweichungen bei sehr kurzen und sehr langen Strecken; mittlere Strecken von 1 bis 2,5 km sind überrepräsentiert. Es wird vermutet, dass die Unterrepräsentation kurzer Entfernungen auf die Tatsache zurückzuführen ist, dass Ausgangs- und Zielort einer Fahrt nicht im selben Cluster liegen. Daher sind sehr kurze Fahrten von weniger als 500 m nicht angemessen vertreten. Die durchschnittliche Gesamtentfernung in der Simulation beträgt 7,5 km und ist damit etwas geringer als die gemeldete Entfernung von 8,3 km. Eine Erklärung dafür ist, dass erhobene Ausreißer (z. B. Fahrten >50 km) den Durchschnitt der gemeldeten Fahrtstrecken stark verzerren können.

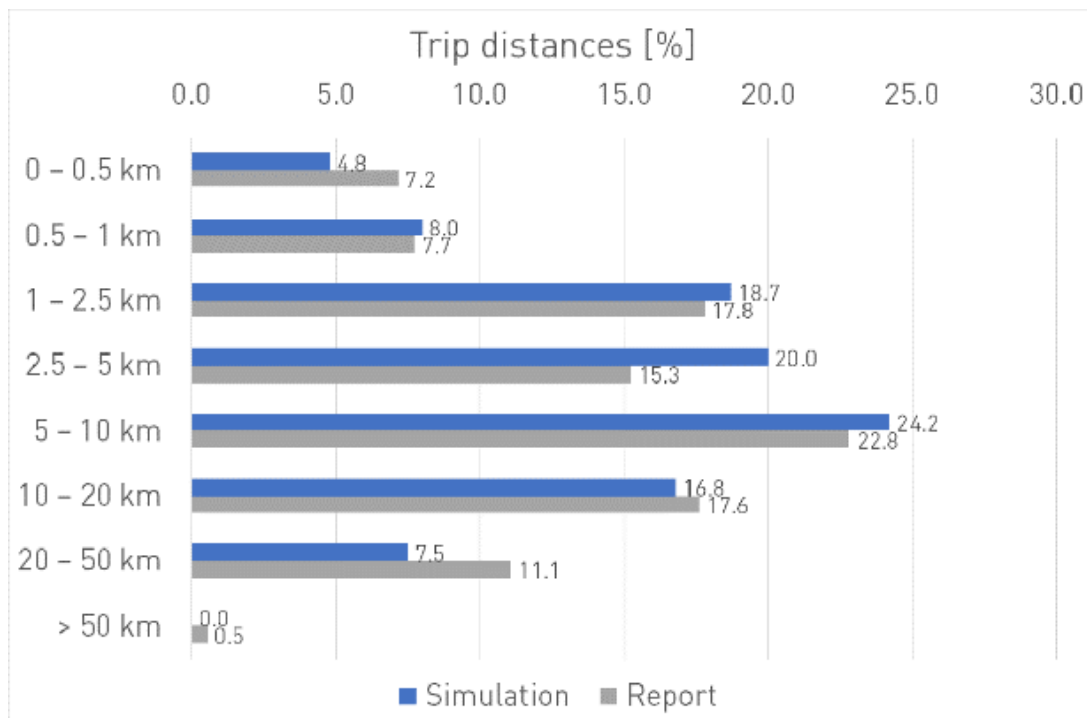


Abbildung 12: Verteilung der Fahrtstrecken in der Simulation (blau) und im Bericht (grau)

Abbildung 13 zeigt die durchschnittliche Reisedistanz pro Hauptverkehrsmittel, die für alle Verkehrsmittel außer dem Auto recht korrekt simuliert wird. Der Modal Split pro Entfernungskategorie, wie in Abbildung 14 dargestellt, zeigt ein korrektes Muster für alle Verkehrsträger. Nur Fußwege zwischen 1-2,5 km sind in der Simulation überrepräsentiert. Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Fahrtdauer.

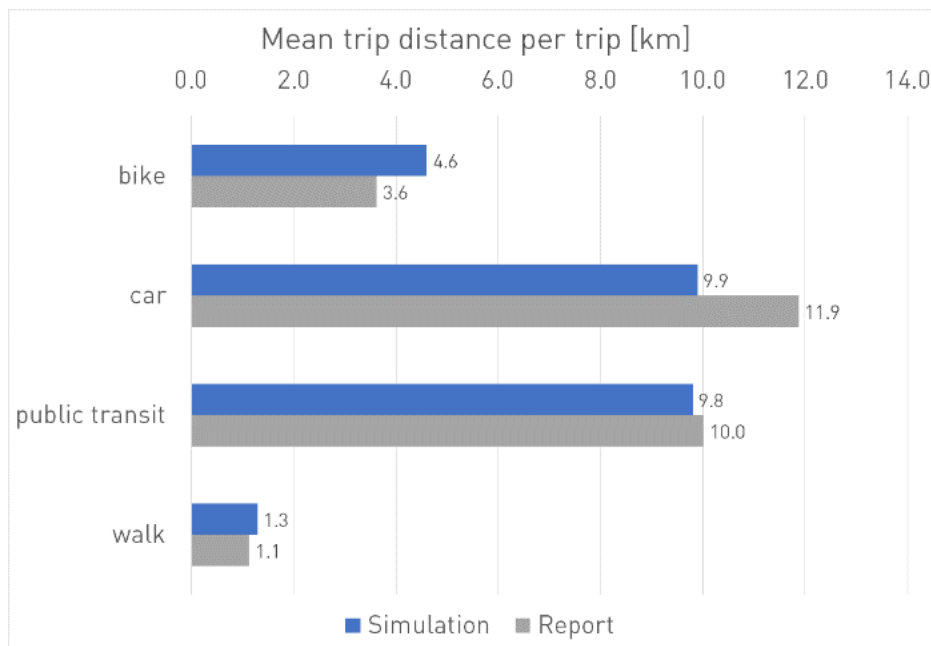


Abbildung 13: Verteilung der durchschnittlichen Fahrtstrecken nach Hauptverkehrsmittel in der Simulation (blau) und im Bericht (grau)

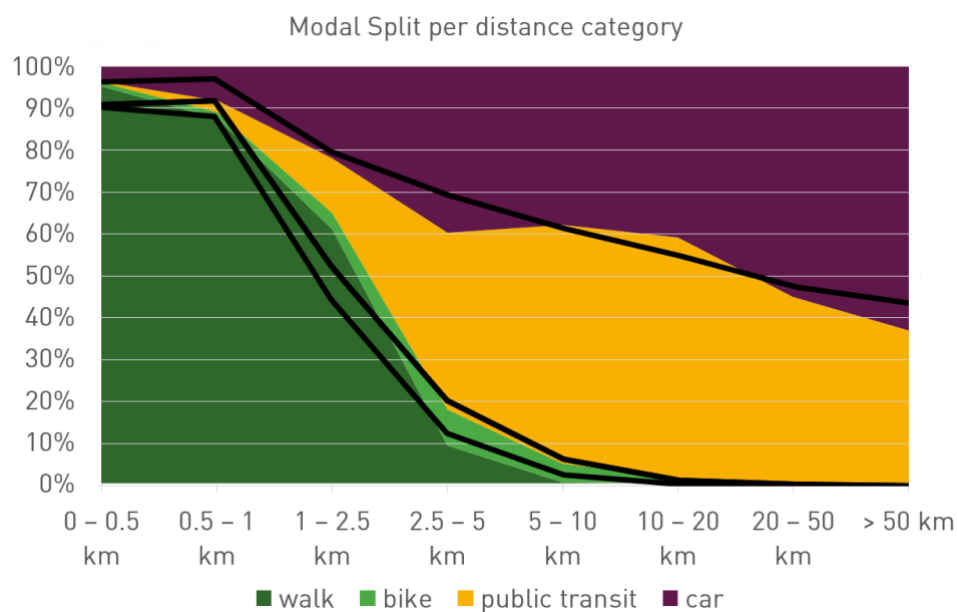


Abbildung 14: Modal Split pro Hauptverkehrsträger für jede Entfernungskategorie. Die gemeldeten Werte sind als schwarze Linien markiert.

Die Validierung der Fahrtzwecke zeigte ebenfalls eine gute Modellierung in der Verkehrssimulation. Die Verteilung der gemeldeten Werte stimmte sehr gut mit den simulierten Werten überein (Abbildung 15).

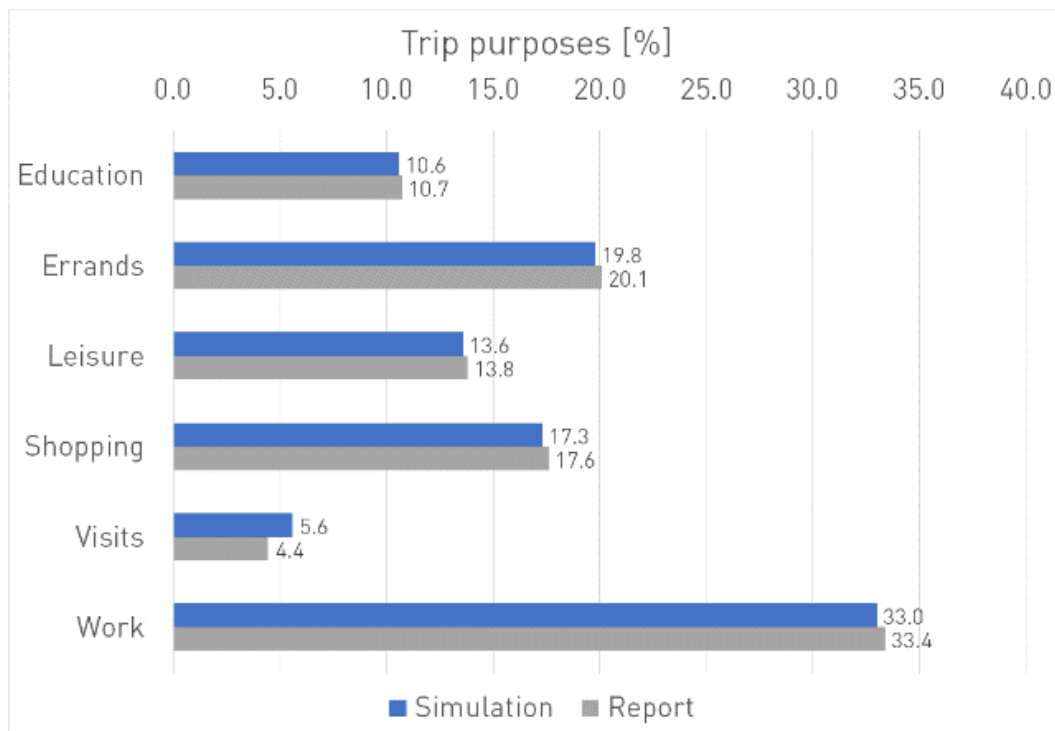


Abbildung 15: Verteilung der Reisezwecke in der Simulation (blau) und im Bericht (grau).

Ein Vergleich der Verteilung der wichtigsten Verkehrsträger nach Reisezweck in Abbildung 16 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung für alle Reisezwecke. Abbildung 17 beschreibt die Verteilung der Entfernungskategorie nach Fahrtzweck. Arbeitswege und Besuche weisen nur geringe Unterschiede zwischen den gemeldeten und den simulierten Verteilungen auf. Während Freizeitaktivitäten, Bildungsreisen und Besorgungen weitgehend übereinstimmen, gibt es eine Unterschätzung der sehr kurzen Entfernungen - und einen daraus resultierenden leichten Überschuss an längeren Reisen. Dieser Unterschied ist bei den Einkaufsaktivitäten noch ausgeprägter. Fast jede fünfte Einkaufsfahrt wird mit weniger als einem halben Kilometer angegeben, während diese Fahrten in den Simulationen eher länger sind. Die bereits erwähnte Einschränkung, Fahrten innerhalb eines Clusters zu zeichnen, ist vermutlich die Ursache für die Inkonsistenz.

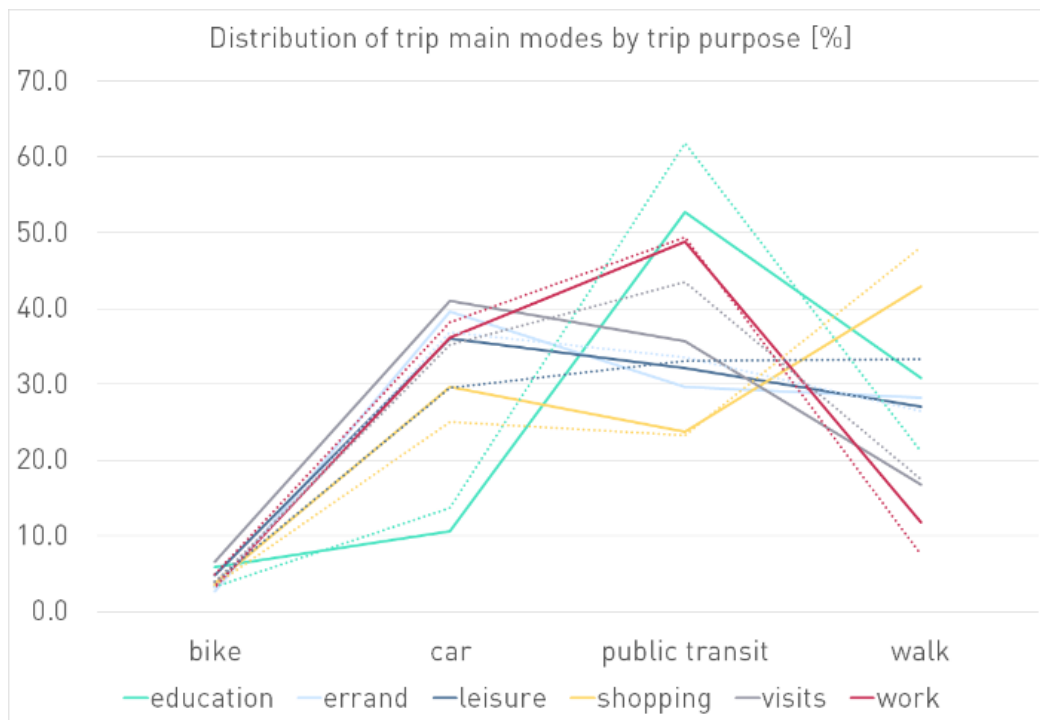


Abbildung 16: Verteilung der Hauptverkehrsträger nach Reisezwecken. Die berichteten Werte sind als gestrichelte Linien markiert.

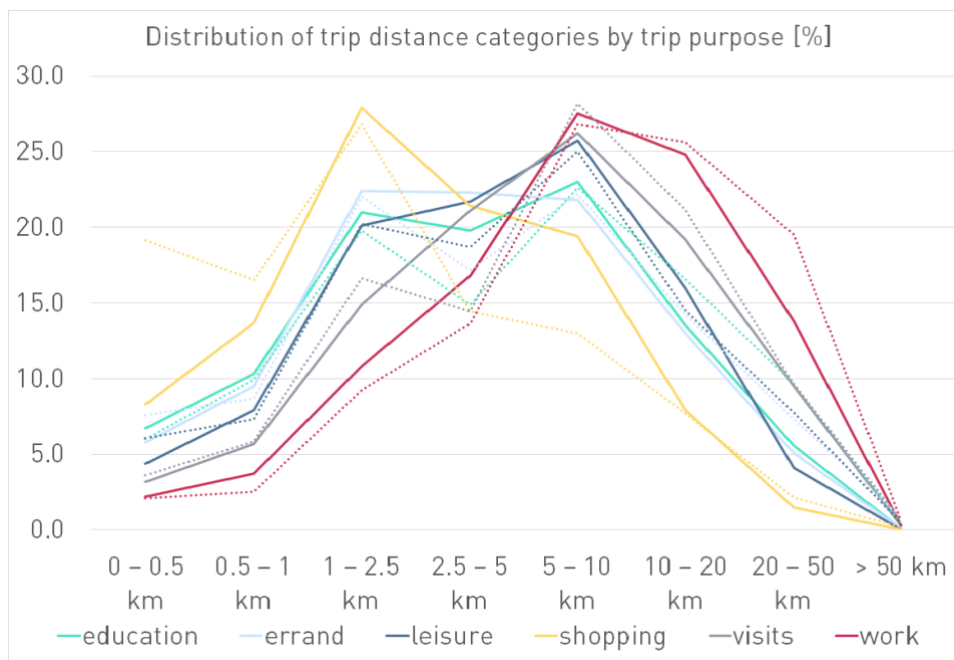


Abbildung 17: Verteilung der Fahrtentfernungskategorien nach Reisezwecken. Die gemeldeten Werte sind als gestrichelte Linien gekennzeichnet.

Verkehrsmittelwahlmodell und Präferenzstrukturen

Ein weiteres Highlight des entwickelten MATSim-Modells für Wien ist die Differenzierung der Nutzenfunktion für verschiedene soziale Gruppen. Diese basiert auf einer vereinfachten Version der von Schmid et al. (2019) veröffentlichten Schätzungen unter Verwendung einer repräsentativen Zeitbudget- und Reiseerhebung der Universität für Bodenkultur (BOKU). Der Schätzungsansatz basiert auf einem latenten Klassenmodell mit 2 Klassen, mit dem jedem Agenten mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit einer Klasse zugeordnet wird. Diese Zuordnungswahrscheinlichkeiten wurden in zehn gleich große Gruppen aufgeteilt, die in der Simulation die zehn Subpopulationen bilden. Jeder dieser Teilpopulationen wurden unterschiedliche Werte in der Nutzenfunktion für die Verkehrsmittel auf der Grundlage der Klassenzuordnungswahrscheinlichkeit der Teilpopulation und der verschiedenen Klassen im Verkehrsmittelwahlmodell zugeteilt. Das Schema der Methoden ist in Abbildung 18 dargestellt.

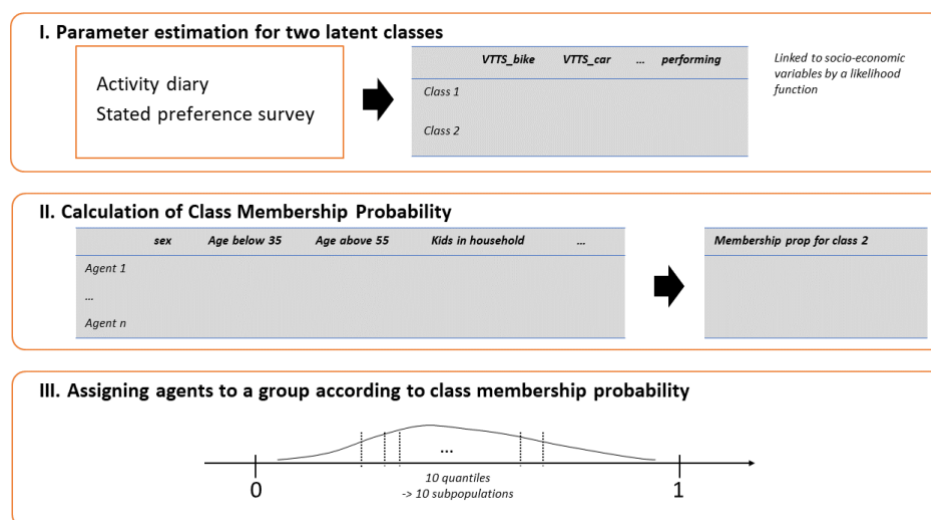


Abbildung 18: Übersicht über das latente Klassenmodell für das Verkehrsmittelwahlmodell und die Ableitung von Teilpopulationen.

Die Simulation von SAEVs auf dem Straßennetz wurden unter Verwendung neu entwickelter Module für nachfrageorientierten Verkehr (drt – demand responsive transport) in Kombination mit dem dvrp-Modul (dynamic routing vehicle problem) durchgeführt. Diese beiden Module ermöglichen es den Agenten, (1) ein drt-Fahrzeug anzufordern und (2) einem Fahrzeug zugewiesen zu werden, wodurch Fahrgemeinschaften gebildet werden können. Die SAEV-Fahrzeuge wurden in der Simulation zunächst an zufälligen Orten platziert und hatten eine Kapazität von 4 Personen. Zusätzliche Tarife (Grundtarif, pro Minute oder pro Kilometer) können in den Simulationseinstellungen konfiguriert werden. Eine wichtige Frage ist, wie man den Wert der Reisezeitersparnis (VTTS) schätzt, der in der Simulation verwendet wird, um den (Un-)Nutzen des Agenten für die Nutzung eines Verkehrsmittels zu bestimmen. Wir haben uns auf Studien aus der Literatur bezogen und den Wert auf 75 % des VTTS der Fahrt mit einem herkömmlichen Auto festgelegt.

Ein weiteres Highlight des entwickelten MATSim-Modells für Wien ist die Differenzierung der Nutzenfunktion für verschiedene soziale Gruppen. Bei der Schätzung des Verkehrsmittelwahlmodells für zwei Klassen wurde ein latentes Klassenmodell verwendet, um jeden Agenten mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit einer Klasse zuzuordnen. Diese Zuordnungswahrscheinlichkeiten wurden in zehn gleich große Gruppen aufgeteilt, die in der Simulation die zehn Subpopulationen bilden. Jede dieser Teilpopulationen hat unterschiedliche Werte der Nutzenfunktion für die Verkehrsmittel auf der Grundlage der Klassenzuordnungswahrscheinlichkeit der Teilpopulation und der verschiedenen Klassen im Verkehrsmittelwahlmodell. Das Schema der Methoden ist in der nachstehenden Abbildung dargestellt:

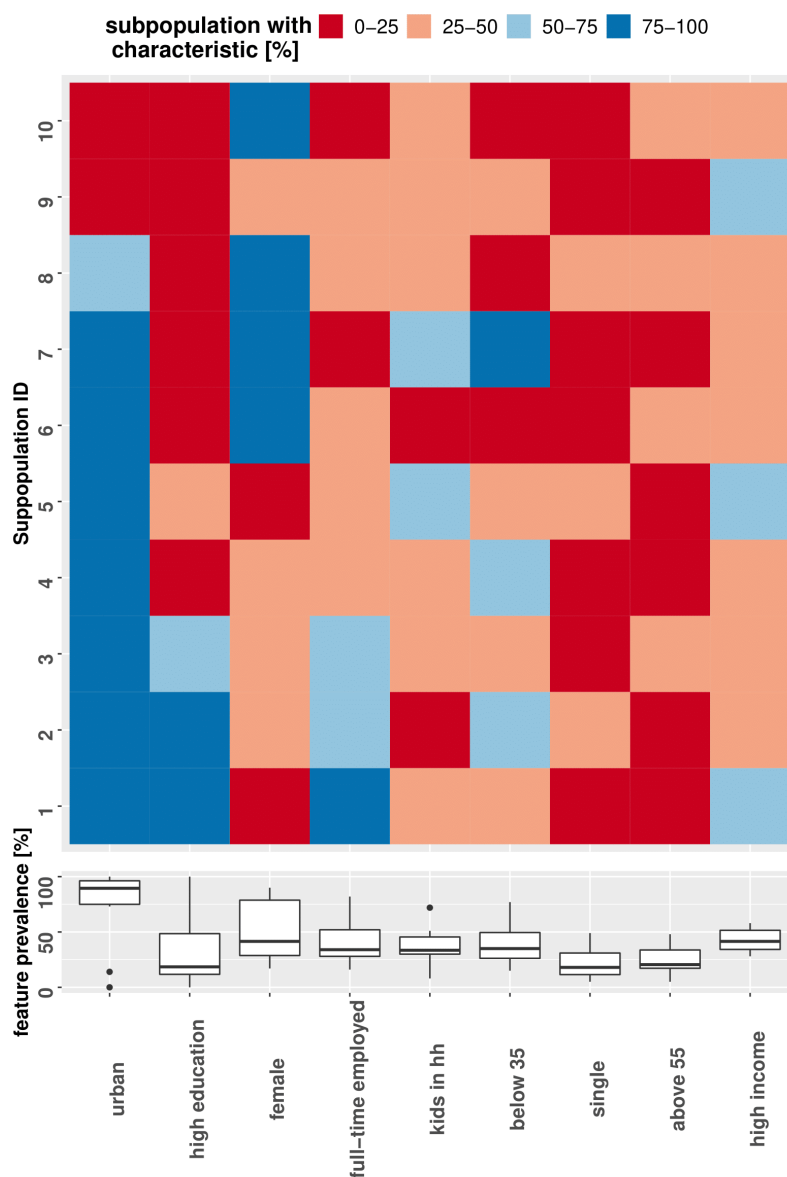


Abbildung 19: Charakteristiken der 10 Personengruppen (basierend auf einem Verkehrsmittelentscheidungsmodell mit zwei latenten Klassen).

Andere verwendete Methoden

Obwohl der MATSim-Simulationsrahmen in diesem Projekt in methodischer Hinsicht im Mittelpunkt stand, wurden auch andere Methoden eingesetzt. Die wichtigsten davon werden hier kurz beschrieben:

Literaturrecherche

Um die vorhandenen Erkenntnisse über die ökologischen, verkehrsbezogenen und sozioökonomischen Auswirkungen von SAEVs zusammenzufassen, wurden mehr als 400 wissenschaftliche und politikorientierte Studien gesichtet.

Szenario-Definition

Basierend auf den Ergebnissen der Literaturrecherche, den vorläufigen Simulationsergebnissen und dem Feedback der Stakeholder (insbesondere während des ersten Stakeholder-Workshops) wurden verschiedene Szenarien definiert und mit dem MATSim-Modell simuliert.

Einbindung von Stakeholdern

Die Einbindung der Stakeholder war ein wichtiger Bestandteil dieses Projekts. Wir führten zwei Stakeholder-Workshops durch, wobei der erste darauf abzielte, Feedback einzuholen und weitere Ideen für Szenariodefinitionen zu entwickeln, und der zweite darauf, unsere Ergebnisse zu verbreiten und sich mit ihren politischen Auswirkungen zu befassen.

7 Arbeits- und Zeitplan

Die ursprüngliche Planung auf der Grundlage des eingereichten Vorschlags lautete wie folgt:

Year	2018							2019										2020												
Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Month	5/18	6/18	7/18	8/18	9/18	10/18	11/18	12/18	1/19	2/19	3/19	4/19	5/19	6/19	7/19	8/19	9/19	10/19	11/19	12/19	1/20	2/20	3/20	4/20	5/20	6/20	7/20	8/20	9/20	10/20
WP1 Project management	[Shaded]																													
WP2 Literature review	[Shaded]																													
WP3 Transport simulation	[Shaded]																													
WP4 Policy experiments								[Shaded]																						
WP5 Dissemination									[Shaded]																					

Den tatsächlichen Arbeitsfortschritt zeigt dieses aktualisierte Diagramm:

Year	2018							2019							2020							2021																				
Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Month	5/18	6/18	7/18	8/18	9/18	10/18	11/18	12/18	1/19	2/19	3/19	4/19	5/19	6/19	7/19	8/19	9/19	10/19	11/19	12/19	1/20	2/20	3/20	4/20	5/20	6/20	7/20	8/20	9/20	10/20	11/20	12/20	1/21	2/21	3/21	4/21	5/21	6/21	7/21	8/21	9/21	10/21
WP1 Project management	[Gantt bar]																																									
WP2 Literature review	[Gantt bar]																																									
WP3 Transport simulation	[Gantt bar]																																									
WP4 Policy experiments	[Gantt bar]																																									
WP5 Dissemination	[Gantt bar]																																									

Bei den meisten Arbeitspaketen kam es zu Abweichungen, so dass wir auch eine Verlängerung der Projektlaufzeit von 30 auf 42 Monate beantragten. Das Projekt endete daher formell erst Ende Oktober 2021. Die Hauptursache für die Verzögerungen war, dass das Simulationsmodell für den Großraum Wien, anders als im Antrag vorgesehen, zu Projektbeginn noch nicht ganz fertig war. Auch die Populationssynthese (Erstellung einer repräsentativen Gruppe von Agenten) und das Hinzufügen von SAEVs zum Simulationsmodell waren eine größere Herausforderung als erwartet. Kleinere Verzögerungen ergaben sich aufgrund der begrenzten Rechenkapazität des Clusters, der gemeinsam mit anderen Kollegen am AIT genutzt wird. Im weiteren Sinne sind einige Verzögerungen auch auf die COVID-19-Pandemie zurückzuführen, die fast die Hälfte der Projektlaufzeit andauerte, sowie auf mehrmonatige Elternkarenzen mehrerer Projektmitglieder.

8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

Publikationen (Journals & Conference Proceedings)

- Adler, M. W., Peer, S., & Sinozic, T. (2019). Autonomous, connected, electric shared vehicles (ACES) and public finance: An explorative analysis. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2, 100038.
- Müller, J., Straub, M., Naqvi, A., Richter, G., Peer, S., & Rudloff, C. (2021). MATSim Model Vienna: Analyzing the Socioeconomic Impacts for Different Fleet Sizes and Pricing Schemes of Shared Autonomous Electric Vehicles. Proceedings of the 100th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, 2021
- Müller, J., Straub, M., Richter, G., & Rudloff, C. (2022). Integration of Different Mobility Behaviors and Intermodal Trips in MATSim. *Sustainability*, 14(1), 428.

Working papers

- Peer, S., Schöggel, A. (2019) Shared, autonomous, electric vehicles (SAEVs): solving urban challenges?

- Peer, S., Müller, J., Naqvi, A., & Straub, M. (2022). Accessibility, socioeconomic and climate impacts of zone-based shared, electric, autonomous vehicles (SAEVs): simulating the case of Vienna
- Naqvi, A., Peer, S., Müller, J., & Straub, M. (2022). The spatial-temporal distribution of exposure to traffic-related PM emissions and the role of SAEVs: A case study of Vienna

Wissenschaftliche Präsentationen

2019

- G. Richter, C. Rudloff, M. Straub: Enriching the features of a synthesised population – using generative neural networks for population synthesis. Präsentation an der Konferenz Stochastic Models, Statistics and their Application (SMSA), Dresden
- Peer, S.: Environmental and socio-economic aspects of autonomous, connected, electric and shared vehicles (ACES). Präsentation am Ecological Economics Seminar (IEES) an der WU Wien
- Peer, S. SimSAEV Projektvorstellung. Poster Präsentation. Klimatage, Wien

2020⁵

- Müller, J.: SimSAEV Projektvorstellung am Lehrstuhl für Traffic Engineering and Control (Prof. Bogenberger) an der TU München

2021

- Müller, J.: MATSim Model Vienna: Analyzing the Socioeconomic Impacts for Different Fleet Sizes and Pricing Schemes of Shared Autonomous Electric Vehicles. Transportation Research Board, Poster Präsentation
- Müller, J.: Accessibility, Environmental, and Socioeconomic Impacts of Zone-based Shared, Electric, Autonomous Vehicles (SAEVs): A case study of Vienna. Online ECTRI Webinar series of the Traffic Management and Simulation working group
- Straub, M., J. Müller, G. Richter and C. Rudloff (2021): MATSim model Vienna. Video Präsentation am *MATSim User Meeting*, online. <https://www.ivt.ethz.ch/en/info/news/2021/03/22-matsim-user-meeting.html>
- Müller, J. Accessibility, Environmental, and Socioeconomic Impacts of Zone-based Shared, Electric, Autonomous Vehicles (SAEVs): A case study of Vienna. Klimatage, Posterpräsentation (online)

⁵ Mehrere Konferenzen zur Presentation unserer Beiträge wurden aufgrund von COVID-19 abgesagt..

- Peer, S.: Accessibility, Environmental, and Socioeconomic Impacts of Zone-based Shared, Electric, Autonomous Vehicles (SAEVs): A case study of Vienna. European Regional Science Association (ERSA) Conference (online)
- Peer S.: "The trade-off between equity and efficiency in climate mitigation policies in the transport sector", ECO-SOS Workshop on Economics and Sustainability (Reus, Spain). Keynote Präsentation
- Naqvi, A. Impact of (shared) autonomous electric vehicles (SAEVs) on emissions exposure in the city of Vienna. Präsentation am Ecological Economics Seminar (IEES) an der WU Wien

Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte sowie die barrierefreie Gestaltung der Projektbeschreibung, übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.

Die Fördernehmerin/der Fördernehmer erklärt mit Übermittlung der Projektbeschreibung ausdrücklich über die Rechte am bereitgestellten Bildmaterial frei zu verfügen und dem Klima- und Energiefonds das unentgeltliche, nicht exklusive, zeitlich und örtlich unbeschränkte sowie unwiderrufliche Recht einräumen zu können, das Bildmaterial auf jede bekannte und zukünftig bekanntwerdende Verwertungsart zu nutzen. Für den Fall einer Inanspruchnahme des Klima- und Energiefonds durch Dritte, die die Rechteinhaberschaft am Bildmaterial behaupten, verpflichtet sich die Fördernehmerin/der Fördernehmer den Klima- und Energiefonds vollumfänglich schad- und klaglos zu halten.