

AMD-OEPNV

Flexible und nachhaltige multimodale Tür-zu-Tür Mobilität: Synchronisierung von autonomen Mikromobilitätsdiensten mit ÖPNV

19F1099A

Sachbericht/ Schlussbericht

I. Kurzdarstellungen

1. Aufgabenstellung

Ziel dieses Projekts ist es, das Problem der ersten und letzten Meile des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) zu lösen, indem autonome Mikromobilitätsdienste (AMD) mit dem öffentlichen Verkehrsnetz synchronisiert werden und on-demand Fahrgästen an ihrer Haustür oder an der Haltestelle zur Verfügung stehen. Dies würde es uns ermöglichen, eine nachhaltige und wirtschaftliche Tür-zu-Tür-Mobilitätslösung anzubieten. Eine Mögliche Realisierung davon sind automatisierte (Lasten-) Fahrräder, wie sie z.B. in dem Projekt AuRa erforscht wurden.

Um einen on-demand Dienst mit automatisierten Mikromobilen auf der ersten und letzten Meile anbieten zu können, braucht es ein geeignetes Managementverfahren, welches sicherstellt, dass Kunden beim Ausstieg immer ein Fahrzeug vorfinden. Das Projekt AMD-OEPNV entwickelt dies auf Basis offener Daten und hat die folgenden Ziele:

1) Datenanalysestrategien: Entwicklung von Datenanalysealgorithmen zur Verarbeitung der gesammelten GTFS- und Statistikdaten. Das Hauptziel der Datenverarbeitung ist die Erstellung von Nachfrageszenarien für den öffentlichen Verkehrsdienst AMD.

2) Entwicklung und Bewertung eines Optimierungsalgorithmus: Die Vision unseres Projekts ist es, eine nahtlose und nachhaltige Tür-zu-Tür-Mobilitätslösung anzubieten. Durch die Entwicklung eines Optimierungsalgorithmus könnten wir die Synchronisation zwischen autonomen Mikromobilitätsdiensten (AMD) und dem öffentlichen Verkehrsnetz sicherstellen. Die Entwicklung des Optimierungsalgorithmus erfolgt in 3 Schritten mit steigender Komplexität:

- Umverteilungsalgorithmus: Der erste Schritt ist die Entwicklung eines Umverteilungsalgorithmus, der die Fahrräder im Netz entsprechend den Fahrplänen des öffentlichen Verkehrs verteilt. Anhand der Nachfrageszenarien können wir die Anzahl der Fahrgäste vorhersagen, die bereit sind, die autonomen Mikrofahrzeuge für ihre erste/letzte Meile für jede ÖPNV-Station zu nutzen. Auf der Grundlage dieser Vorhersage können wir die autonomen Mikrofahrzeuge verteilen, um die Nachfrage zu befriedigen.

- Flottenmanagement-Algorithmus: Der zweite Schritt besteht darin, den ersten Algorithmus zu optimieren, indem eine Start-/Ziel-Nachfrage (anstelle der Nachfrage an den ÖPNV-Stationen) berücksichtigt wird. Hier gehen wir davon aus, dass der Fahrgast der nächstgelegenen ÖPNV-Station zugewiesen wird (sowohl für den Start als auch für das Ziel). Der Algorithmus sollte sicherstellen, dass eine Fahrt zwischen den beiden ÖPNV-Stationen

existiert, die Ankunftszeit an der endgültigen (Ziel-)ÖPNV-Station entsprechend der genauen Dauer der Fahrt zwischen den beiden Stationen anpassen und die Verfügbarkeit eines Mikrofahrzeugs für die erste und letzte Meile sicherstellen.

- Multimodales Routing: Der dritte mögliche Schritt ist die Optimierung der gesamten Fahrt vom Standort des Kunden zum gewünschten Ziel. Dazu gehört die Wahl der ersten und letzten Haltestelle des öffentlichen Verkehrs (nicht unbedingt die nächstgelegene), um die Reisezeit für die gesamte Strecke (Kleinstfahrzeuge + öffentlicher Verkehr) zu verkürzen. Diese Funktion ist entscheidend für die Gestaltung der Verarbeitungskette, für die in diesem Projekt die Grundlagen geschaffen werden.

Die entwickelten Algorithmen sollen nach dem Projekt veröffentlicht werden um für andere Wissenschaftler:innen und Start-Ups eine Grundlage zur weiteren Umsetzung derartiger und analoger Mobilitätsdienste zu bieten. Zusätzlich soll untersucht werden, wie sich solch ein Service mit automatisierten Lastenrädern wirtschaftlich darstellen lässt.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt wurde vom Institut für Logistik und Materialflusstechnik (OVGU) durchgeführt. Es widmet sich Methoden für die Gestaltung von logistischen Prozessen und Systemen. Der Hauptforschungsansatz ist die Modellierung, Simulation und Gestaltung von Transportlogistiksystemen mit dem Schwerpunkt auf städtischen Logistiklösungen. Für die Erstellung von Nachfrageszenarien wurden offene Daten für den öffentlichen Nahverkehr (GTFS-Daten) sowie offene Daten für Bike-Sharing-Dienste verwendet.

Die Förderung des Projekts wurde im Rahmen der Förderlinie 1 des mFUND-Programms beantragt. Die Projektskizze wurde am 29.09.2021 eingereicht. Nach einer positiven Vorevaluierung wurde der Vollantrag Ende Dezember 2021 eingereicht.

Das Projekt kann auf Vorarbeiten des Projekts AuRa (2019-2022, <https://aura.ovgu.de/Vergangene+Projekte/Aura.html>) aufbauen, in dem ein Simulationsmodell für Bikesharing mit automatisierten Fahrrädern (ohne ÖPNV Integration) entwickelt wurde.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das AMD-OEPNV-Projekt folgte den vier in der Projektbeschreibung beschriebenen Arbeitspaketen:

- AP 1 Datenerfassung und -analyse
- AP 2 Implementierung des Simulationsmodells
- AP 3 Entwicklung von Synchronisationsalgorithmen
- AP 4 Test und Auswertung

Zum Zeitpunkt der Antragstellung war die Projektlaufzeit auf ein Jahr, vom 01.09.2022 bis 31.08.2023, ausgelegt. Aufgrund der späten Beendigung des Vorgängerprojektes bei der OVGU konnte das Projekt jedoch nicht vor dem 01.10.2022 begonnen werden. Daher wurde auch der Abschluss des AMD-OEPNV-Projekts um einen Monat verschoben.

Datum	Ereignisse
01.10.2023	Bearbeitungsstart des Projekts
13.10.2023	Das offizielle Kick-off Meeting fand als digitales Meeting statt
01.11.2023	Einstellung studentische Hilfskraft
Jan 23	Beitrag bei Deutschlandfunk Wissen über das Projekt
Feb 23	Entwicklung von ersten Nachfrageszenarien für einen Last-Mile-Service
Apr 23	Erster Prototyp des Simulationsmodells mit ersten Ergebnissen für einen Last-Mile-Service
Mai 23	Teilnahme am International Transportation Forum als Teil der deutschen Delegation zur Vertretung von mfund-Projekten
Aug 23	Integration des Problems der ersten Meile in die Simulation
Sep 23	Tests und Ergebnisdokumentation

4. wissenschaftlichem und technischem Stand,

4.1. Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden,

Bei der Durchführung dieses Projekts haben wir auf zwei Vorarbeiten zurückgegriffen.

- Datenerhebung und -verarbeitung: Wir haben die gleiche Methode wie im AuRa-Projekt verwendet, um die Nachfrageszenarien zu erstellen [Kania & Assmann, 2022]. Wir haben sie jedoch an unser spezifisches Problem angepasst, indem wir davon ausgingen, dass dieser neue Dienst vor allem Autonutzer anzieht und sie zum Umstieg auf öffentliche Verkehrsmittel veranlasst.

- Entwicklung des Synchronisationsalgorithmus und des Simulationsmodells: Unser Simulationsmodell für dieses Projekt basiert auf dem Simulationsmodell des AuRa-Projekts, da wir dort ein spezielles Modul für das autonome Lastenfahrrad entwickelt und die Routing- und Matching-Algorithmen (ohne ÖPNV) bereits implementiert haben [Vasu et al., 2022].

4.2. Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste,

In unser Simulationsmodell haben wir einen benutzerdefinierten Routenanbieter integriert, der die Graphhopper-Routing-Engine nutzt, um zwischen autonomem Routing und manuellem Routing des selbstfahrenden Lastenfahrrads zu unterscheiden. Graphhopper ist eine Open-Source-Java-Routing-Engine, die OpenStreetMap-Daten analysiert und die Berechnung des kürzesten Weges zwischen zwei Punkten ermöglicht [Graphhopper, 2023]. Sie ermöglicht auch die Erstellung verschiedener Fahrzeugprofile mit unterschiedlichen Spezifikationen (Geschwindigkeit, Fahrwege, ...). In unserem Fall haben wir zwei Fahrzeugprofile entwickelt, eines für den autonomen Modus und eines für den manuellen Modus, da sich die Routen und der Energieverbrauch zwischen den beiden Modi unterscheiden. Wir haben OpenStreetMap für die Kartendienste und die Visualisierung verwendet. Das Simulationsmodell wurde mit Anylogic erstellt.

Für die Erstellung der Nachfrageszenarien haben wir die historischen Bike-Sharing-Daten verwendet, die online als offene Daten verfügbar sind [DB, 2019]. Die Literaturrecherche wurde mit "Google Scholars" durchgeführt. Die verschiedenen Referenzen, die in unserer Arbeit verwendet wurden, sind in unserer Zeitschriftenveröffentlichung verfügbar.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

Im Rahmen des AMD-OEPNV-Projekts haben wir mit den folgenden Institutionen zusammengearbeitet:

- Stadt Magdeburg, Wirtschaftsförderung um Nachfragedaten im gewerblichen Sektor zu erlangen
- Magdeburger Verkehrsbetrieben (MVB) um die Bedeutung eines solchen Projekts für die Stadt Magdeburg zu bewerten und um Testdatensätze für Tagesganglinien an Haltestellen zu erhalten.
- Es erfolgte zudem ein intensiver Austausch mit weiteren Wissenschaftler:innen und mFUND-Projekten im Themenbereich. Dies sind u.a. Institut für Informatik an der Technischen Universität Freiberg, Hochschule Merseburg und Hochschule Anhalt mit den Projekten Ready for Smart City Robots und OPT-Micro.

II. Eingehende Darstellung

1. Erzielte Ergebnisse im Einzelnen

Wir können die Projektergebnisse anhand der beiden Hauptziele beschreiben, die zu Beginn des Projekts festgelegt wurden:

1.1. Datenanalyse:

Ziel dieses Teils ist es, fundierte Nachfrageszenarien für diesen neuen Dienst zu erstellen. Wir sind davon ausgegangen, dass vom ÖPNV-Netz nur das Straßenbahnnetz in dieser Studie berücksichtigt wird. Wir haben eine Methode definiert, bei der wir die GTFS-Daten und den Start-Ziel-Verkehr verwenden, um die Start-Ziel-Nachfrage mit den entsprechenden Straßenbahnhaltestellen zu erstellen, die genutzt werden sollen. Diese Methodik kann durch das Flussdiagramm in Abbildung 1 beschrieben werden.

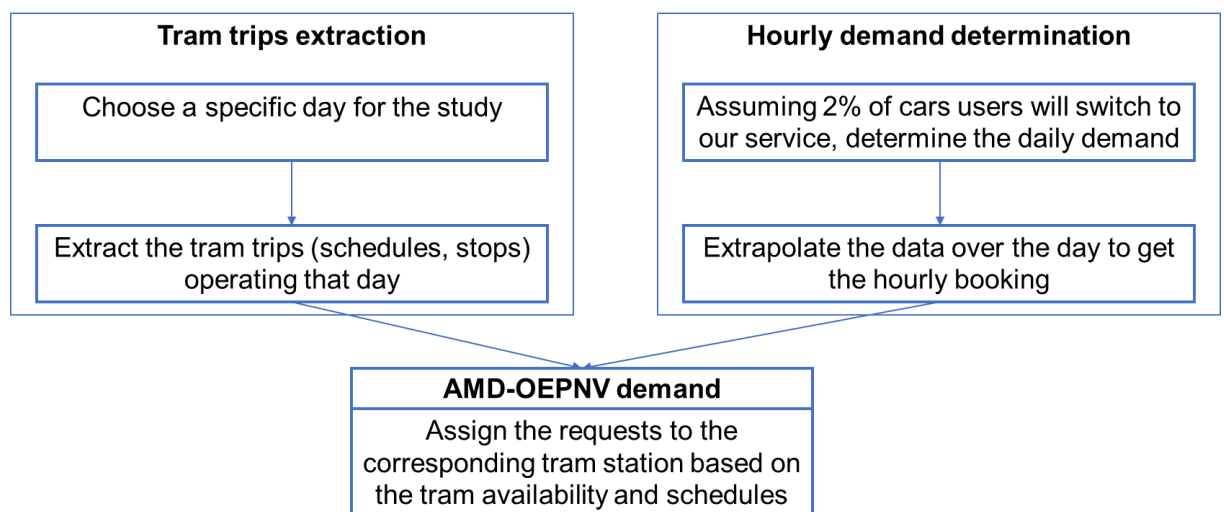


Abbildung 1: Die Methodik der Erstellung von Nachfrageszenarien

Für die Extraktion der Straßenbahnfahrten haben wir die GTFS-Daten für den Straßenbahnverkehr der Stadt Magdeburg verwendet. Wir haben einen Text-Mining-Algorithmus in Python entwickelt, der die Textdateien lesen und die benötigten Daten extrahieren kann. Wir folgten den in Abbildung 2 beschriebenen Schritten, um alle Fahrten zu extrahieren, die an einem bestimmten Tag stattfanden (ein zufälliger Donnerstag aus den in den GTFS-Daten verfügbaren Kalenderdaten). Wir haben uns dafür entschieden, die Ergebnisse des Algorithmus in Exceldateien zu speichern, da sie leicht in das Simulationsmodell zu integrieren sind. Wir haben zwei Exceltabellen erstellt. Die erste Tabelle enthält die Haltestellen-ID und ihre Standorte. Die zweite Tabelle enthält die Fahrten-ID, die Haltestellen jeder Fahrt sowie die Ankunfts- und Abfahrtszeit an jeder Haltestelle.

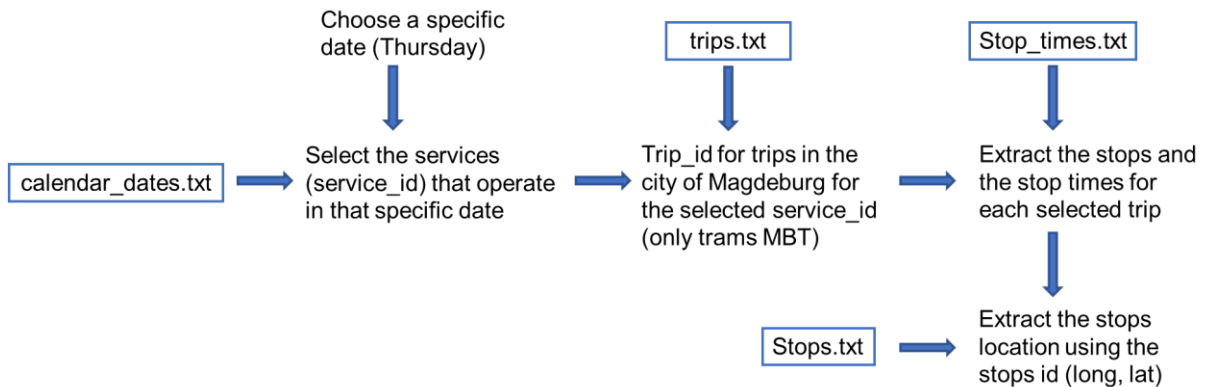


Abbildung 2: Schritte zur Extraktion von Straßenbahnfahrten aus GTFS-Daten

Für die stündliche Nachfrageverteilung haben wir die im AuRa-Projekt angewandte Methodik angepasst, wie in Abbildung 3 beschrieben.

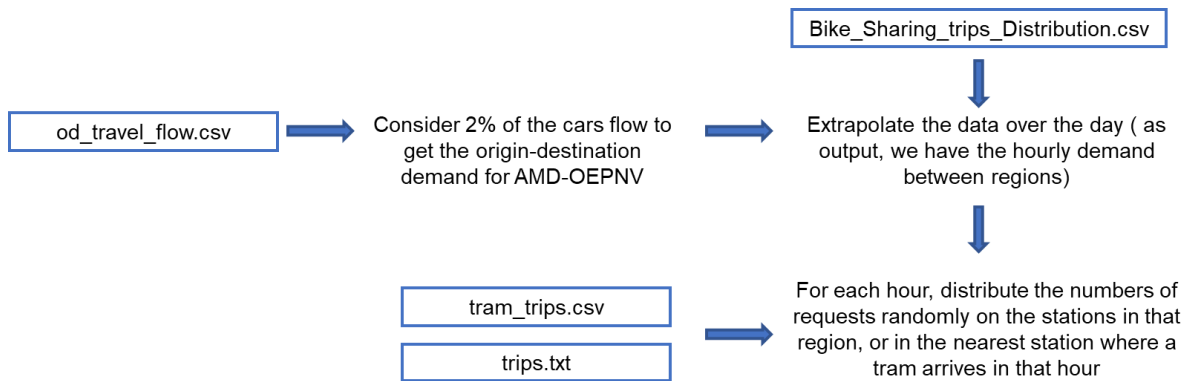


Abbildung 3: Schritte für die Nachfragegenerierung

Ausgangspunkt war die Herkunfts-Ziel-Stromtabelle, in der die Reiseströme zwischen den verschiedenen Regionen Magdeburgs für jedes Verkehrsmittel an einem statistischen Tag aufgeführt sind. Unter der Annahme, dass unser Service 2% der Autonutzer zum Umstieg auf unseren Service bewegen würde, berechneten wir die Anzahl unserer Kunden für jede Start- und Zielregion pro Tag. Ausgehend von der Verteilung der Fahrten im Bike-Sharing haben wir diese Nachfrage über den Tag extrapoliert, um die stündliche Buchung zu erhalten. Anhand der Straßenbahnfahrten, die wir im ersten Schritt generiert haben, verteilen wir die stündlichen Anfragen pro Region auf eine zufällige nächstgelegene Straßenbahnhaltestelle, an der in dieser Stunde eine Straßenbahn eintrifft. Wir unterscheiden zwischen zwei Fällen: die Nutzung unseres Dienstes nur für die letzte Meile oder für die erste und letzte Meile. Im Fall von erste+letzte Meile ist die Anzahl der Anfragen für unseren Service doppelt so hoch wie die Anzahl der Anfragen nur für die letzte Meile, da der Kunde unseren Service zweimal in Anspruch nimmt: erstens von seinem Ausgangsort zur Straßenbahnhaltestelle und zweitens von der Straßenbahnhaltestelle zum Endziel. Für diesen Fall haben wir auch die Fahrtdauer für den Fahrgast zwischen der Ausgangs- und der Zielregion mit Hilfe des Dijkstra-Algorithmus und unter Berücksichtigung der zu dieser Stunde verfügbaren Straßenbahnfahrten zwischen den beiden Stationen (Ausgangs- und Zielort) berechnet. Dies wurde getan, um sicherzustellen, dass wir die Anfrage für unseren Service in der endgültigen Straßenbahnhaltestelle zur passenden Zeit unter Berücksichtigung der Fahrtdauer zwischen der Ausgangs- und der Zielhaltestelle erstellen.

Als Ergebnis dieses Schritts haben wir zwei Excel-Tabellen erstellt: eine für die Ausgangsnachfrage, in der wir die Herkunftsregion der Kundenanfragen, die Anzahl der Kunden, die Kennung der Ausgangshaltestelle und die Ankunftszeit der Straßenbahn an der Ausgangshaltestelle angeben, und eine für die Zielnachfrage, in der wir die Zielregion der Kundenanfragen, die Anzahl der Kunden, die Kennung der Zielhaltestelle und die Ankunftszeit der Straßenbahn an der Zielhaltestelle angeben. Es sei darauf hingewiesen, dass die Zielhaltestelle nicht unbedingt in der Zielregion des Kunden liegen muss. Die Zielregion wird entsprechend dem Herkunfts-Ziel-Fluss definiert. Es ist die endgültige Region, in die der Kunde reisen möchte. In einigen Fällen gibt es in dieser Region keine Straßenbahnhaltestelle, oder die Straßenbahn verkehrt in dieser Stunde nicht in diese Region. Daher ordnen wir den Kunden der nächstgelegenen Straßenbahnhaltestelle zu, an der in dieser Stunde eine Straßenbahn verkehrt, und betrachten diese als Zielhaltestelle. Auch dies bestätigt die Bedeutung unseres Dienstes, da er es dem Fahrgast ermöglicht, öffentliche Verkehrsmittel zu nutzen, auch wenn es in der Region, in der er unterwegs ist, keine ÖPNV-Station gibt. Die gleiche Logik wurde auch für die Herkunftsregion und die Herkunftsbahnhöfe angewandt.

1.2. Entwicklung und Bewertung eines Optimierungsalgorithmus:

Die Vision unseres Projekts ist es, eine nahtlose und nachhaltige Tür-zu-Tür-Mobilitätslösung anzubieten. Während des Projekts haben wir einen Verteilungsalgorithmus entwickelt, um die Synchronisierung zwischen autonomen Mikromobilitätsdiensten (AMD) und dem öffentlichen Verkehrsnetz sicherzustellen. Der Algorithmus bewertet die anstehende Nachfrage an jeder Straßenbahnhaltestelle 15 Minuten vor Ankunft der Straßenbahn und berechnet das Ungleichgewicht. Wenn das Ungleichgewicht negativ ist und Fahrräder benötigt werden, werden die nächstgelegenen verfügbaren Fahrräder der Straßenbahnhaltestelle zugewiesen. Wenn kein Fahrrad verfügbar ist, wird die Suche nach einer Minute wiederholt, bis ein Fahrrad gefunden wird. Dieser Algorithmus wurde in ein Simulationsmodell integriert, in dem wir die Schlüsselemente dieses neuen Dienstes darstellen, einschließlich der Straßenbahnen, der autonomen Fahrräder, der Kunden und der Stationen. Als Ergebnis des Simulationsmodells bewerten wir das Serviceniveau, die Wartezeit und die Kostenverteilung. Wir haben den AMD_OEPNV-Dienst für zwei Szenarien untersucht: eines nur für die letzte Meile und eines für die "erste+letzte" Meile, bei dem wir auch die Straßenbahnverbindung zwischen der Ausgangs- und der Zielstation bewerten. Wir haben die Ergebnisse für die beiden Fälle mit dem im Rahmen des AuRa-Projekts entwickelten Standard-Fahrrad-Sharing-Service verglichen.

Nur letzte Meile:

In diesem Fall haben wir angenommen, dass alle Straßenbahnhaltestellen auch Fahrradstationen sind. Anhand der GTFS-Daten, die uns vorliegen, konnten wir 112 Stationen ermitteln, die an dem von uns gewählten Tag in Betrieb waren. Wir haben den Synchronisationsalgorithmus anhand eines Nachfrageszenarios für einen Tag mit 2202 Anfragen bewertet. Wir berechneten die minimale Anzahl von Fahrrädern, die ein 94%iges Serviceniveau für jede Stunde des Tages ermöglichen würde. Wir haben die Ergebnisse mit der Standard-AuRa-Konfiguration verglichen, bei der ein periodischer Ausgleich zu jeder Stunde und ein Ausgleich nach dem Verleih erfolgt und bei der die Wartestationen über die Stadt verteilt sind, wobei sich eine Station im Zentrum jeder Region befindet. Der Unterschied in der Stationsverteilung ist in Abbildung 4 dargestellt. In beiden Fällen wurde davon

ausgegangen, dass die Strecken frei befahrbar sind und die Höchstgeschwindigkeit der Fahrräder 25 km/h erreichen kann.

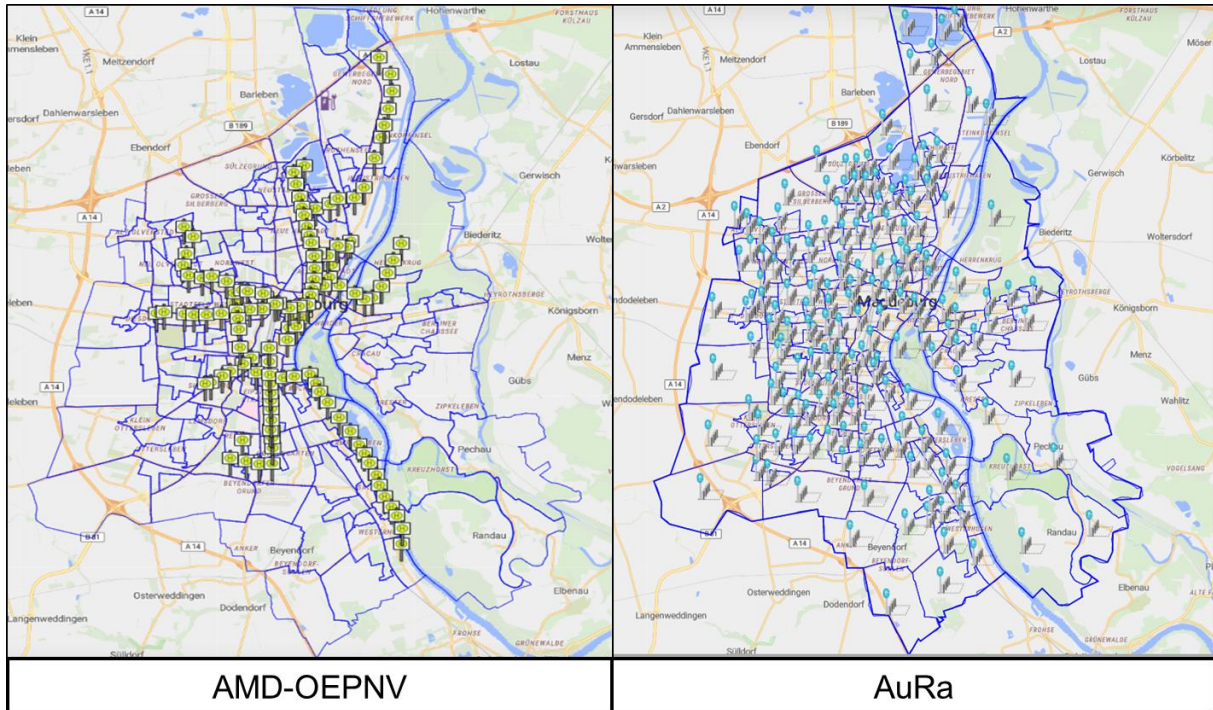


Abbildung 4: Vergleich der Stationsverteilung

Die Anzahl der für jedes System benötigten Fahrräder und die Anzahl der bedienten Anfragen sind in Tabelle 1 aufgeführt. In Abbildung 5 ist das stündliche Serviceniveau während des Tages für jeden Dienst dargestellt.

Tabelle 1: Vergleich der KPIs zwischen AMD-OEPNV und AuRa

	AMD-OEPNV System	AuRa System
Anfragen insgesamt	2202	2202
Bediente Kunden	2186	2168
Anzahl der Fahrräder	90	110

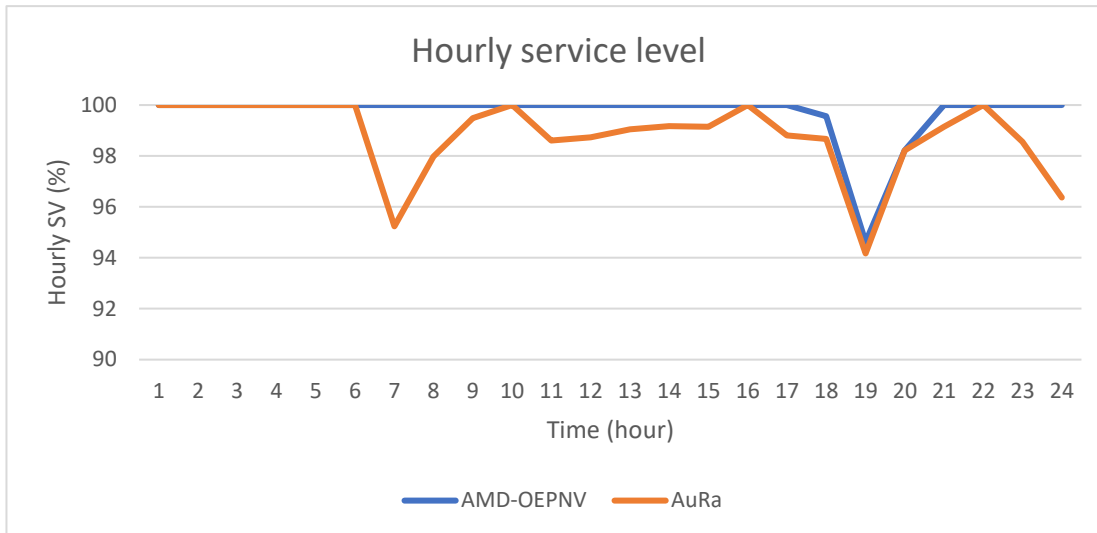


Abbildung 5: Stündlicher Servicelevel für AMD-OEPNV und AuRa

Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, ist die Anzahl der für das AMD-OEPNV-System benötigten Fahrräder im Vergleich zum AuRa-System um 18 % geringer. Selbst mit einer geringeren Anzahl von Fahrrädern ist AMD-OEPNV in der Lage, tagsüber ein höheres stündliches Serviceniveau anzubieten. Dies zeigt, dass das AMD-OEPNV-System besser und effizienter arbeitet als das AuRa-System. Um diese Ergebnisse zu bestätigen, vergleichen wir die Kostenverteilung für die beiden Systeme. Die für den Dienst angenommenen Investitions- und Wartungskosten sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Angenommene Kosten

Kosten	Kosten Fahrradinvestition (Abschreibung: 4 Jahre)	40000€
	Investition in die Ladestation (Abschreibung: 6 Jahre)	40490 €
	Wartung der Station	600 €/ Month
	Wartung des Fahrrads	500 €/ Month
	Energiekosten pro kWh	0,24 €

Bei diesen Kosten handelt es sich um vorläufige Kosten, die auf unserem derzeitigen Kenntnisstand und unseren ersten Gesprächen mit den Industriepartnern basieren. Wir weisen auch darauf hin, dass wir nur die Betriebskosten berücksichtigt haben, da es in diesem Stadium des Projekts schwierig ist, die Verwaltungs- und Kommunikationskosten zu schätzen. Die Ergebnisse der Kostenverteilung sind in Abbildung 6 dargestellt.

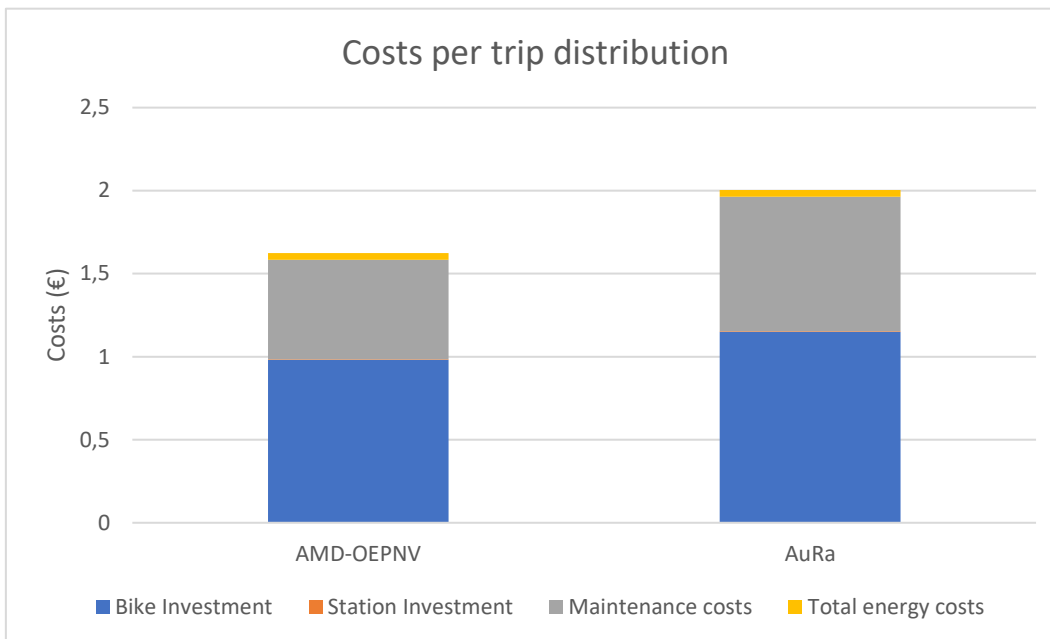


Abbildung 6: Kostenvergleich zwischen AMD-OEPNV und AuRa

Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, sinken die Dienstleistungskosten um 19 % von 2 € pro Fahrt auf 1,62 € pro Fahrt, wenn wir einen Synchronisationsalgorithmus implementieren und das AMD-OEPNV-System übernehmen. Diese Reduzierung ist hauptsächlich auf die Verringerung der Anzahl der Fahrräder im System zurückzuführen. Wie aus Abbildung 6 hervorgeht, machen die Investitionskosten für Fahrräder den größten Teil der Dienstleistungskosten aus. Danach folgen die Wartungskosten, die ebenfalls proportional zur Anzahl der Fahrräder im System sind. Daher ist es sehr wichtig, effiziente Verteilungsstrategien für einen solchen Dienst zu entwickeln, um die Gesamtkosten zu senken. Es ist auch wichtig zu beachten, dass bei einem AMD-OEPNV-Dienst die Fahrgäste nicht auf das Fahrrad an der Haltestelle warten müssen, da das Fahrrad bereits vorhanden ist, wenn der Kunde an der Straßenbahnhaltestelle ankommt. Bei einem AuRa-System hingegen kann die Wartezeit für die Fahrgäste bis zu 10 Minuten betragen. Daraus lässt sich schließen, dass der AMD-OEPNV den AuRa-Dienst übertrifft und eine praktikable Lösung für das Problem der letzten Meile darstellen könnte..

- Erste + Letzte Meile

Wir haben den Ansatz angewandt, um den AMD-OEPNV-Service für den Fall einer "ersten + letzten" Meile zu untersuchen. In diesem Szenario muss der Kunde bis zu 10 Minuten auf das Fahrrad warten, bis es an seinem Standort für die erste Meile ankommt, da der Ausgangsort des Kunden keine Straßenbahnhaltestelle ist. Beim AMD-OEPNV gibt es jedoch keine Wartezeit für die letzte Meile. Die Ergebnisse für die Anzahl der benötigten Fahrräder sind in Tabelle 3 dargestellt. Der Vergleich der stündlichen Fahrleistungen zwischen AMD-OEPNV und AuRa-System ist in Abbildung 7 dargestellt.

Tabelle 3: KPI-Vergleich zwischen AMD-OEPNV und AuRa für die erste und letzte Meile

AMD-OEPNV AuRa

	AMD-OEPNV	AuRa
Anfragen insgesamt	4404	4404
Bediente Kunden	4337	4321
Anzahl der Fahrräder	147	176

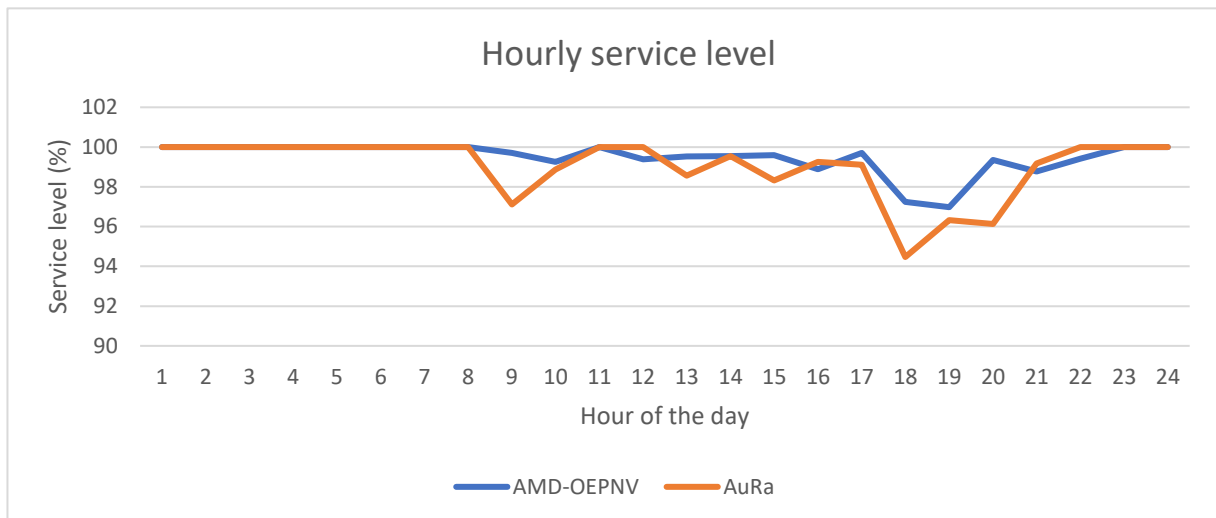


Abbildung 7: Der stündliche Servicelevel für das Szenario "erste + letzte Meile"

Wie wir für dieses Szenario sehen können, schneidet der AMD-OEPNV besser ab als AuRa und ermöglicht es uns, die Anzahl der im System benötigten Fahrräder um 16 % von 176 auf 147 Fahrräder zu reduzieren. Mit einer geringeren Anzahl von Fahrrädern ist der AMD-OEPNV auch in der Lage, ein besseres stündliches Serviceniveau zu bieten und mehr Anfragen zu erfüllen als der AuRa-Service. Dies wirkt sich auf die Fahrtkosten aus, wie in Abbildung 8 dargestellt.

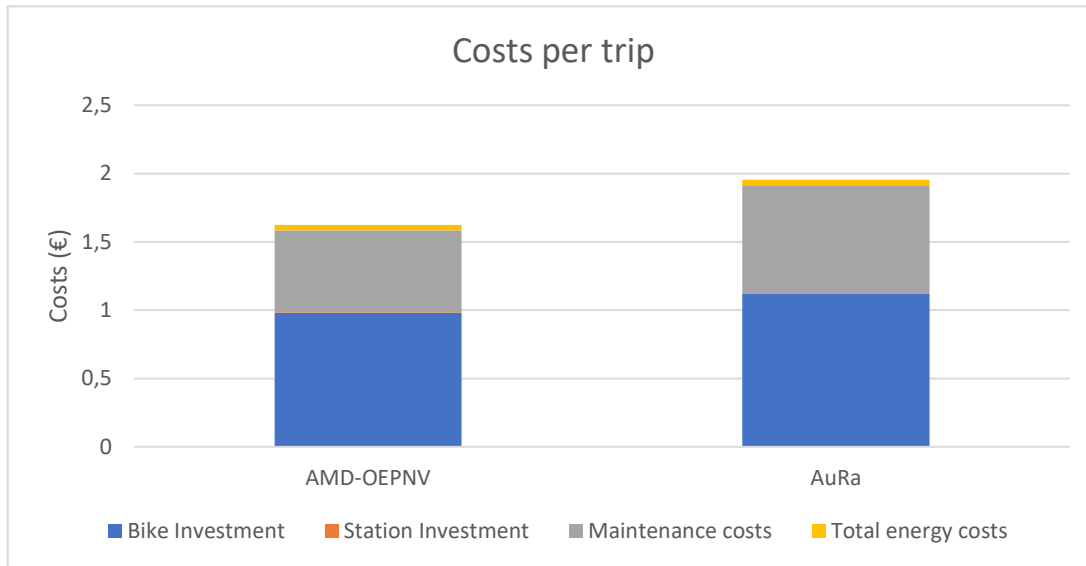


Abbildung 8: Analyse der Kosten pro Fahrt für den Fall "Erste + Letzte" Meile

Auch hier ist festzustellen, dass die Kosten pro Fahrt dank des Synchronisierungskonzepts deutlich um 17 % von 1,95 € auf 1,54 € gesunken sind. Diese Reduzierung ist auf die Verringerung der Anzahl der Fahrräder im System zurückzuführen. Obwohl wir die Ursprungsnachfrage integriert haben und die Verteilung der Haltestellen für den AMD-OEPNV auf der ersten Meile nicht optimal ist, da es nicht in jeder Region eine Straßenbahnhaltestelle gibt, schneidet der AMD_OEPNV dennoch besser ab als der AuRa-Fall. Diese Ergebnisse bestätigen, wie wichtig ein Synchronisationsalgorithmus für einen effizienten Service für die erste und letzte Meile ist.

Was die multimodale Lösung betrifft, so waren wir leider nicht in der Lage, sie zu entwickeln. Ein solcher Algorithmus benötigt mehr Zeit, da er einen sehr komplizierten Routing-Algorithmus von Grund auf aufbauen muss, bei dem wir die Fahrradrouten und die Routen des öffentlichen Verkehrs im selben Problem kombinieren. Der Algorithmus für den kürzesten Weg, den wir für die Routen des öffentlichen Verkehrs geschrieben haben, könnte als Grundlage dienen und weiterentwickelt werden, um die Fahrradrouten einzubeziehen und die beste globale Routing-Lösung zu finden.

2. Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Vorhaben AMD-OEPNV lief über 13 Monate, wobei die Bearbeitung um einen Monat verspätet begonnen hat. Die wichtigste Position im zahlenmäßigen Nachweis sind die Personalkosten inkl. anteiliger Jahressonderzahlung für die Projektmitarbeiterin. Weiterhin sind Kosten für studentische Hilfskräfte entstanden. Gering sind Kosten für Dienstreisen ausgefallen, die durch die Präsentation des Projekts beim International Transport Forum im Mai in Leipzig entstanden sind.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die zur Erreichung der Projektziele durchgeführten Forschungsarbeiten und die dafür verwendeten Personalressourcen waren angemessen und notwendig. So konnten in der Förderlaufzeit alle wesentlichen Inhalte entsprechend der Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung umgesetzt werden. Ohne die Drittmittel des mFund Programmes wäre die

Realisierung des Verbundprojektes weder in der vorliegenden thematischen Komplexität nicht möglich gewesen.

4. Verwertbarkeit der Ergebnisse

In diesem Projekt haben wir eine Methode entwickelt, um die Daten zu verarbeiten und fundierte Nachfrageszenarien für den AMD-OEPNV-Dienst zu erstellen. Diese Methodik könnte zur Erstellung von Nachfrageszenarien für jede beliebige Stadt verwendet werden, wenn alle als Input verwendeten Daten als offene Daten verfügbar sind. Andernfalls muss ein gewisser Aufwand betrieben werden, um diese Daten aus den bereits verfügbaren offenen Daten zu schätzen und die Methodik zur Erstellung der Nachfrageszenarien zu wiederholen.

Darüber hinaus könnten die Ergebnisse dieses Projekts wertvolle Erkenntnisse über die Realisierbarkeit eines solchen Dienstes liefern. Wir haben gezeigt, dass ein spezifischer und synchronisierter Fahrradservice das Problem der letzten Meile für viele Fahrgäste des öffentlichen Verkehrs lösen könnte. Die Kosten eines solchen Dienstes sind im Vergleich zu ähnlichen Diensten wie Scootern und E-Bike-Sharing recht günstig. Daher glauben wir, dass es möglich ist, einen Markt für diesen Dienst zu schaffen. Die Kosten pro Fahrt für AMD-OEPNV sind sogar sehr erschwinglich im Vergleich zu Carsharing-Lösungen, die in Berlin maximal 6 € für 2,5 km Fahrtstrecke kosten [Uber, 2023]. Darüber hinaus können wir die Kosten pro Fahrt senken, wenn wir die Bedingung einer stündlichen Auslastung von 94 % fallen lassen. Tatsächlich bedeutet eine solche Bedingung, dass wir mehr Fahrräder für die Abholstunde nutzen sollten, während das System eine solche Anzahl für den Rest des Tages nicht benötigt. Weitere Untersuchungen könnten durchgeführt werden, um die Kosten pro Fahrt zu senken und diesen Dienst erschwinglicher zu machen. Außerdem können wir die Möglichkeit einer Kostenteilung zwischen dem öffentlichen Verkehr und den autonomen Bike-Sharing-Diensten untersuchen. Durch die Lösung des Problems der ersten und letzten Meile dürfte der AMD-OEPNV-Dienst neue Nutzer für den öffentlichen Nahverkehr bringen. Wir können den zusätzlichen Gewinn bewerten und die Kosten zwischen den beiden Diensten aufteilen.

Die von uns entwickelten Algorithmen sind unter <https://github.com/lmenHS/AMD-OEPNV> öffentlich hinterlegt. Diese Algorithmen können jederzeit eingesetzt werden um derartige Untersuchungen in anderen Städten in Deutschland durchzuführen. Sie bilden darüber hinaus einen wertvollen Beitrag zur Entwicklung von Optimierungsalgorithmen für ÖPNV-integrierte on-demand Dienste.

Die von uns dargestellten Ergebnisse sind entsprechend Kapitel 6 wissenschaftlich verwertet. Zusätzlich erfolgte die Verwertung über die Einbindung in die Lehre an der OVGU. Als weitere Verwertung ist angestrebt den Transfer der Verfahren auf andere, besonders auch suburbane und ländliche Regionen, durchzuführen um dort ebenso die Einsatzpotentiale von automatisierten und autonomen on-demand Verkehren für die erste und letzte Meile zu untersuchen.

5. Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Entwicklung von automatisierten und autonomen Fahrzeugen findet weltweit statt. In dem Bereich der Mikromobile sind auf der technischen Seite verschiedene Fortschritte zu

verzeichnen. So werden um die Projekte Helios (<https://helios-project.de/>) sowie Aura-Hirn (<https://aura.ovgu.de/Projekte/AuRa+Hirn.html>) automatisierte Fahrfunktionen für (Lasten-) Räder entwickelt und zeigen ihre Eignung prototypisch auf. Ebenso für andere Fahrzeugtypen wie e-Scooter finden vergleichbare Entwicklungen statt (<https://www.ist.uni-stuttgart.de/de/forschung/gruppe-von-frank-allgoewer/autonomer-e-scooter/>) und zeigen einen Pfad von der Grundlagenforschung zum Praxiseinsatz auf. Dass dies ökologisch sinnvoll ist, demonstrieren Umweltanalysen des MIT (Sanchez et al. 2022).

Auf der Ebene der Verfahren zum Betrieb und des Managements von automatisierten und autonomen Mikromobilen im Sharingeinsatz sind nur begrenzt weitere Arbeiten bekannt. Teile der Forschung untersuchen hier, inwieweit Städte überhaupt für diese Angebote bereit sind (Plank et al. 2022). Ein Projekt unter dem Titel "Eaasy System" untersucht den Einsatz von autonomen Kleinstfahrzeugen für die Zustellung auf der letzten Meile (<https://www.aura.ovgu.de/Projekte/EAASY+System.html>). Es gibt jedoch kein Projekt, das die Integration von autonomen Mikrofahrzeugen in den öffentlichen Verkehr untersucht. In einem breiteren Kontext haben wir eine aktuelle Studie gefunden, die die Integration autonomer Fahrzeuge in den öffentlichen Verkehr untersucht (Feng et al., 2022). Darin wird ein zentralisierter Algorithmus auf der Grundlage von Reinforcement Learning vorgeschlagen, der auf Kundenanfragen hin ungenutzte Fahrzeuge disponiert und feststellt, ob den Fahrgästen eine Kombination aus Carsharing und öffentlichen Verkehrsmitteln empfohlen werden sollte oder nicht. Autonome Mikromobile und deren Management ist jedoch nicht betrachtet.

6. Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses.

Im Rahmen dieses Projekts erfolgten diverse Präsentationen und Publikationen:

- DLF Nova: Ein kurzer Überblick über unser Projekt wurde in den Wissensnachrichten am 02.01.2023 gegeben.
- Volksstimme Magdeburg: Wenn das Lastenrad an der Haltestelle auf den Fahrgast wartet, Dienstag 03. Januar 2023
- Verband Deutscher Wirtschaftsingenieure: Bikesharing: Eine App für autonome Lastenräder, 10. Januar 2023, <https://vwi.org/2023/01/bikesharing-eine-app-fuer-autonome-lastenraeder/>
- International Transport Forum (ITF): Wir haben am ITF, das am 24-25.05.2023 in der Leipziger Messe stattfand, mit einer Präsentation teilgenommen, die die ersten Ergebnisse des AMD-OEPNV-Projekts beinhaltet.
- Github: Wir haben die verschiedenen entwickelten Algorithmen als Open Source in Github unter diesem Link verfügbar gemacht: (zum Hinzufügen von <https://github.com/ImenHS/AMD-OEPNV>).
- Nachwuchssymposium Autonome Fahrzeuge: 29.11.2023, Magdeburg; Posterpräsentation. https://aura.ovgu.de/Aktuelles/Save+the+Date_+Nachwuchsforscherevent-p-520.html.
- Mfund-Konferenz: 12.12.2023, Berlin: Vortrag in der Session „ÖPNV and beyond“.

Weitere Veröffentlichungen und Präsentationen sind ebenfalls geplant:

- Zeitschriftenartikel: Die Ergebnisse dieses Projekts sollen in einer Fachzeitschrift veröffentlicht werden. Der Artikel ist in Arbeit und wird bis Ende Dezember in der "Transportation Research Part A: Policy and Practice" unter dem Sonderthema "On-demand transportation, public transport, operation efficiency, policy and practice" eingereicht.

III. Literaturverzeichnis

Plank M, Lemardelé C, Assmann T, Zug S (2022) Ready for robots? Assessment of autonomous delivery robot operative accessibility in German cities. J Urban Mobil 2:100036. <https://doi.org/10.1016/j.urbmob.2022.100036>

Sanchez NC, Pastor LA, Larson K (2022) Can autonomy make bicycle-sharing systems more sustainable? Environmental impact analysis of an emerging mobility technology. Transp Res Part D 113:103489. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103489>

IV. Kontaktinformationen

Ausführende Stelle:

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Logistik und Materialflusstechnik
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg
www.ilm.ovgu.de

Projektbearbeitung

Imen Haj Salah (M. Sc.)
Imen.hajsalah@ovgu.de

Projektleiter:

Dr. Tom Assmann
tom.assmann@ovgu.de