

MCube

Münchner Cluster für die Zukunft
der Mobilität in Metropolregionen

DatSim

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Zukunftscluster MCube: Datenhub & Simulationsmodell (DatSim)

01.11.2021 – 31.10.2024

„Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03ZU1105LA gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.“

Zuwendungsempfängerin:

Technischen Universität München
Arcisstr. 21
80333 München
www.tum.de

Ausführende Stellen:

Prof. Dr. Markus Lienkamp
Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik
School of Engineering and Design

Prof. Dr.-Ing. Klaus Bogenberger
Lehrstuhl für Verkehrstechnik
School of Engineering and Design

Prof. Dr.-Ing. Rolf Moeckel
Professur für Verkehrsverhalten
School of Engineering and Design

Prof. Dr. Maximilian Schiffer
Professorship of Business Analytics & Intelligent Systems
School of Management



Teil I: Kurzbericht - Darstellung des Projektergebnisses

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Das Projekt "Datenhub und Simulationsmodell - DatSim" zielt darauf ab, eine zentrale digitale MCube-Repräsentation zu erstellen, bestehend aus einem umfassenden Simulationsmodell und einem zentralen Datenhub. Das Simulationsmodell integriert Teilmodelle der MCube Innovationsprojekte und ermöglicht eine gemeinsame Betrachtung von Maßnahmen und deren Auswirkungen. Der Datenhub standardisiert Datenaustauschformate und -zugriffe, sodass Daten während und nach dem Projekt einheitlich vorliegen. Zusammen bilden sie ein digitales Abbild des Zukunftsclusters, das die Projekte unterstützt und Wissen für Stakeholder zugänglich macht. Das Projekt DatSim baut auf dem aktuellen Stand der Technik und Forschung mit rein agentenbasierten Verkehrsmodellen auf, indem es ein agentenbasiertes Verkehrsmodell mit mehreren anderen Modellen kombiniert, um ein umfassendes Gesamtsimulationsmodell zu erstellen. Konkret wurde die Sensitivität der Agenten durch ein aktivitätenbasiertes Modell verbessert. Zudem wurde das Verkehrsmodell mit einem Flächennutzungsmodell und einem Machine-Learning-Modell kombiniert, um beispielsweise Verkehrszustände und Reisezeiten von Verkehrsteilnehmern zu prognostizieren.

1. Ablauf des Vorhabens

Entsprechend der Ziele und Leitlinien des Projektes wurden zu Anfang im Rahmen von Workshops und bilateralen Treffen Anforderungen an ein Gesamtsimulationsmodell und den Datenhub, sowie vorhandene Datensätze und für die Simulation verwertbare Daten innerhalb des MCUBE Clusterkonsortium identifiziert. Anschließend wurde durch die Kooperation zwischen TUM und SAP eine standardisierte Datenplattform aufgebaut, die das strukturierte Speichern mobilitätsrelevanter Daten unterschiedlichen Formates ermöglicht. Zudem wurde unter Berücksichtigung relevanter Mobilitätsmaßnahmen, die mittels Expertenumfragen identifiziert wurden, durch die TUM ein Gesamtsimulationsframework erstellt, das eine effiziente und einfache Ausführung von meso- (via MatSim) und mikroskopische Mobilitätssimulation (via SUMO) ermöglicht. Entsprechend der Vorhabensbeschreibung erlauben die offenen Schnittstellen des Datenhubs und die Erweiterungsmöglichkeiten der eingesetzten Open-Source Simulationsumgebungen (MatSim, SUMO) eine Kopplung der beiden Teilvorhaben Datenhub und Simulationsmodell. Diese Projektergebnisse wurden Ende des Jahres 2022 dem MCUBE Konsortium im Rahmen von Seminaren detailliert vorgestellt, kontinuierlich weiterentwickelt und stehen diesem in einer produktiven Version nun zur Verfügung. Die darauf aufbauende Ladeinfrastruktursimulation wurde für einen spezifischen, relevanten Anwendungsfall weiterentwickelt. Der Datenhub dient Stand 2024 clusterübergreifend und über den Projekthorizont hinaus als Austausch- und Archivierungswerkzeug für vorhandene und zukünftige Mobilitätsdaten. Neuartige Technologien wie eine KI-Simulation von Ladeaufkommen konnten prototypisch umgesetzt und evaluiert werden. Eine breite Evaluation von zukünftigen Mobilitätszenarien erfolgt innerhalb der zweiten Phase des auf 9 Jahre angelegten MCUBE Clusters durch die spezialisierten Partnerprojekte unter Berücksichtigung der bereits erarbeiteten Ergebnisse und Infrastruktur.

2. Wesentliche Ergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse des Projektes DatSim lassen sich in zwei Schlüsselbeiträge aufteilen: 1) die Entwicklung eines Datenhubs, und 2) die Entwicklung eines Gesamtsimulationsmodells. Im Folgenden gehen wir auf die wesentlichen Ergebnisse zur Erreichung der Schlüsselbeiträge ein.

Im Rahmen der Kommunikation und Standardisierung der Projekthinhalte wurden zunächst kontinuierlich Beiträge aus anderen MCube-Projekten gesammelt. Dabei wurden Daten, Szenarien, Modelle und Maßnahmen identifiziert, die in den zentralen Datenhub und das Gesamtsimulationsmodell integriert werden konnten. Ein konkretes Beispiel ist eine Expertenumfrage, in der 26 verkehrspolitische Maßnahmen bewertet wurden, die die Verbesserung von Raum, Zeit und Luft zum Ziel haben. Basierend auf den diskutierten Szenarien wurden geeignete Simulationsmodellumgebungen bewertet und bereits

bestehende Simulationsumgebungen innerhalb des Konsortiums identifiziert. Im Rahmen der Standardisierung wurden relevante Datenformate und Simulationsstandards für das Gesamtsimulationsmodell bzw. für die Teilmodelle definiert und dokumentiert.

Das Datenhub dient als zentrale und digitale Repräsentation des Projektes DatSim und des gesamten Forschungsclusters. Dafür wurde eine zentrale Datehubinstanz, basierend auf dem Stand der Technik, aufgesetzt und an die spezifischen Projektbedürfnisse angepasst. Nach einer ausführlichen Anforderungsanalyse im Cluster sowie einer Bestandsaufnahme des Stands der Technik wurde das Framework *Invenium* für die Anwendung im Cluster, beispielsweise zur Verwendung als Policy-Datenbank mit eigener Nutzerschnittstelle, weiterentwickelt. Der Datenhub dient dem Cluster, die digitalen Inhalte, beispielsweise Präsentationen oder Simulationsdateien, welche in den unterschiedlichen Projekten erarbeitet wurden, mit Interessierten innerhalb und außerhalb des Clusters zu teilen. Die Diversität der Projekte innerhalb des Clusters erfordern unterschiedliche Simulationsmethoden, um simulative Fragestellungen effizient beantworten zu können. Aus diesem Grund wurde das Gesamtsimulationsmodell als hybrides Modell, bestehend aus einer mesoskopischen und einer mikroskopischen Ebene, entworfen. Während die mesoskopische Simulation die Wechselwirkung zwischen Angebot und Nachfrage simuliert, erlaubt die mikroskopische Simulation die Analyse der Verkehrsinteraktionen. Die Funktionalität des Modells wurde am Beispiel München - Schwabing dargestellt und validiert

Im Rahmen des Projekts wurde als Basis des Gesamtsimulationsmodells ein aktivitätsbasiertes Verkehrsnachfragemodell (ABIT) entwickelt. ABIT soll Aktivitäts- und Reisepläne von Einzelpersonen in der Metropolregion München generieren, die später in der Gesamtsimulation und in Szenarioanalysen für die anderen Cluster verwendet werden. Das ABIT-Modell wurde Ende 2023 fertiggestellt und anhand von Verkehrszählungsdaten validiert. ABIT wurde für zwei Simulationsszenarien verwendet: das Szenario mit Low-Emission Zonen und das Parkhaus-Szenario. Letzteres wurde gemeinsam mit dem AQT-Team entwickelt. Darüber hinaus wurden die Aktivitäts- und Reisepläne auch SASIM, MGeM, COMFFICIENTSHARE und einigen Doktorand:innen im Rahmen von MCube für ihre eigenen Anwendungen zur Verfügung gestellt.

Innerhalb der Entwicklung der Gesamtsimulation wurde ein Künstliche Intelligenz (KI) basierte Pipeline zur Vorhersage von Simulationsergebnissen implementiert. Die KI-Pipeline kann zum Einsatz kommen, wenn Entscheidungsträger viele verschiedenen Mobilitätsszenarien simulieren müssen, die Gesamtsimulation aufgrund der langen Laufzeit aber dafür nicht in Frage kommt. Die KI-Pipeline ist dann eine effiziente Alternative zur Approximation der Simulationsergebnisse mittels künstlicher Intelligenz. Die KI-Pipeline umfasst klassische Modelle wie neuronale Netze und graphenbasierte neuronale Netze, die mittels supervised learning aber auch durch structured learning trainiert werden. Structured learning ist eine neuartige Lernmethode die, im Rahmen von MCube, zum Lernen von Verkehrsströmen entwickelt wurde. Basierend auf existierenden Simulationsmodellen wurde eine agentenbasierte mesoskopische Verkehrsstimulation erstellt, die das Ladeverhalten einer realitätsnahen Population (aus dem im Projekt entwickelten Framework ABIT) mit Elektrofahrzeugen abbildet. Als in diesem Zusammenhang besonders relevante Fragestellung wurde der von der Bundesregierung geplante Aufbau von DC-Ladeinfrastruktur an existierenden Tankstellen identifiziert und verschiedene darauf basierende Maßnahmen analysiert. Die Agenten optimieren in Verhalten iterativ bezüglich Umweglänge und Wartezeit, wodurch ein realitätsnahes Ladeverhalten modelliert werden soll. Mit Hilfe der Simulation können Anhaltspunkte gesammelt werden, welche Folgen das geplante Gesetz für die unterschiedlichen Stakeholder (BEV-Fahrer, Tankstellenbetreiber, Städte & Kommunen) hat und durch welche Maßnahmen bestimmte Ziele (z.B. Profitabilität, Versorgungsqualität, ...) heute und zukünftig potentiell erreicht werden können.

Um die Anwendbarkeit der Gesamtsimulation innerhalb des Clusters zu steigern, wurde ein Nutzerinterface mit Integration in den Datenhub entwickelt und ein automatisierter Prozess zur kontinuierlichen Integration von Weiterentwicklungen des Modells aufgesetzt, bei dem durchgehende Nutzbarkeit garantiert ist.

Um die Partizipation der Bevölkerung am Projekt DatSim zu ermöglichen und den Dialog anzuregen, wurde ein interaktiver Datentisch entwickelt. Dieser wurde zunächst prototypisch zur IAA 2023 umgesetzt

(erreichbar unter datsim.iaa.ftm.ed.tum.de; user: *datsim* PW: *datsim.iaa*). Verschiedene Konzepte wurden erdacht und die vielversprechendsten umgesetzt und in einer Probandenstudie evaluiert. Der so entstandene finale Entwurf wurde auf der IAA eingesetzt und eröffnete Fachpublikum und interessierten Bürger:innen gleichermaßen Einblicke in das MCube Forschungscluster. Basierend auf dem Prototyp und den gesammelten Erfahrungen wurde das finale Exponat für die Dauerausstellung im Deutschen Museum entwickelt. Dort können Besucher:innen spielerisch Zukunftsszenarien der Mobilität in Abhängigkeit von Wirtschaft, Politik, Technikentwicklung und Gesellschaft erleben. Darüber hinaus informiert der Datentisch über den gesamten MCube-Cluster und kommuniziert die wissenschaftlichen Ergebnisse an die Öffentlichkeit. Dort besteht die Möglichkeit, Feedback an den DatenHub zurückspielen. Weiter wurde ein Sonderausstellungsbereich „Schaufenster in die Forschung“ eingerichtet, der das Projekt AQT präsentiert.



MCube

Münchner Cluster für die Zukunft
der Mobilität in Metropolregionen

DatSim

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Zukunftscluster MCube: Datenhub und Simulationsmodell (DatSim)

01.10.2021 – 31.10.2024

„Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03ZU1105LA gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.“

Zuwendungsempfängerin:

Technischen Universität München
Arcisstr. 21
80333 München
www.tum.de

Ausführende Stellen:

Prof. Dr. Markus Lienkamp
Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik
School of Engineering and Design

Prof. Dr.-Ing. Klaus Bogenberger
Lehrstuhl für Verkehrstechnik
School of Engineering and Design

Prof. Dr.-Ing. Rolf Moeckel
Professur für Verkehrsverhalten
School of Engineering and Design

Prof. Dr. Maximilian Schiffer
Professorship of Business Analytics & Intelligent Systems
School of Management



Teil II: Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung

Der Großteil der Förderung der dreijährigen ersten Umsetzungsphase wurde wie geplant für die Finanzierung von 5 wissenschaftlichen Stellen verwendet, die sich im Zeitraum von November 2021 bis Ende Oktober 2024 ausschließlich der erfolgreichen Durchführung des Projektes gewidmet haben. Die Mitarbeiter, die an 4 verschiedenen Lehrstühlen (Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Professur für Verkehrsverhalten, Professorship of Business Analytics and Intelligent Systems) der TU München angegliedert sind, haben ihre Expertisen zusammengetragen und so erfolgreiche einen Datenhub und ein Simulationsmodell aufgebaut. Die aufgewendeten Reisekosten wurden eingesetzt, um die Ergebnisse des Projekts auf nationalen und internationalen Konferenzen mit der Fachwelt zu teilen und zu diskutieren.

2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Im folgenden Abschnitt werden die geleisteten Projektarbeiten, sowie die erzielten Ergebnisse gegliedert nach den Arbeitspaketen beschrieben. Weiterführende Informationen und digitale Arbeitsergebnisse sind über Fußnoten verlinkt.

AP 1 – Projektvorbereitung: Daten-/Modellsammlung und Festlegung von Bewertungskriterien

In AP1 sollen bestehende Datenquellen und vorhandene Modelle identifiziert sowie Indikatoren zur Bewertung von Simulationsergebnissen definiert werden.

AP 1.1 – Datensammlung und AP 1.2 – Inventar der Modelle:

Im Rahmen der Projekte des M Cube-Clusters wurden im Jahr 2022 zwei Workshops sowie im Jahr 2023 eine schriftliche Befragung durchgeführt. Ziel war es, bestehende Datensätze zu erfassen und den Datenbedarf der einzelnen M Cube Projekte systematisch zu katalogisieren. Parallel dazu wurden vorhandene Simulationsmodelle erhoben und analysiert.

Die identifizierten Datenbedarfe und -anforderungen wurden im weiteren Projektverlauf kontinuierlich überprüft, miteinander in Beziehung gesetzt und bei Bedarf aktualisiert. Zudem erfolgte die schrittweise Integration zusätzlicher Datenquellen – etwa Verkehrszählungen zur Validierung der Simulationsmodelle. Die aus der ersten Befragung abgeleiteten Bedarfe der einzelnen M Cube-Projekte sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

	Testkreuzung	STEAM	SASIM	ComflientShare	Mgem	AQT	Benevit	COLTOC	TrEx
Typ	Tabellen	Tabellen	Tabellen	Tabellen	Tabellen	Tabellen	Tabellen	Tabellen	Textdokumente
	Geokodiert	Geokodiert	Geokodiert	Geokodiert	Geokodiert	Geokodiert	Geokodiert	Geokodiert	Geokodiert
	Videos/Bilder			Textdokumente		Textdokumente			Videos/Bilder
Daten	Trajektorien	Straßennetz	Straßennetz	Mobilitätsverhalten	OD-Matrix	Quartierspläne	Verkehrsnetz	Straßennetzwerk	Reallaborkarte
	Lidar-Objekte	GTFS	GTFS Daten		GTFS	Parkplätze	Nachfrage Personenverkehr	GTFS	Bilder von Experimenten
	Lidar-Punkte	OSM Daten	Daten Sharing	Umfragedaten	Emission	demographische Daten			Dokumentation Herausforderungen und Lösungsvorschläge Reallabore
	Videos	Fahrzeugdaten	Vollkosten	Strombedarf	OSM Daten	Umfrageergebnisse		Verkehrszählungen	Anleitung Szenarienprozess
	Lade-Daten	OD-Matrizen	Unfallstatistiken	OSM Daten	MID 2017	Simulationsergebnis			Perspektiven von Akteuren
	Interaktionsverhalten								

Tabelle 1: Datenbedarfe des M Cube Clusters

Zusätzlich zu den ermittelten Datenbedarfen der M Cube-Projekte wurden zwei weitere Sammlungen erstellt: eine zum bestehenden Datenbestand und eine zum vorhandenen Modellbestand. Diese Sammlungen sind zentral, um die verfügbaren Grundlagen für die spätere Modellentwicklung in einem folgenden Arbeitspaket systematisch nutzen zu können. Die Sammlung zum Datenbestand enthält eine Vielzahl relevanter Datensätze – darunter das Straßennetz für den motorisierten Individualverkehr und den öffentlichen Nahverkehr, Skim-Matrizen verschiedener Verkehrsmodi, Bevölkerungsdaten, Informationen zu Grundstücks- und Mietpreisen, Gebäudedaten sowie Angaben zum Reisebedarf von Personen und Gütern. Für jede Datenquelle wurden die räumliche Abdeckung, der zeitliche Bezug, der Eigentümer, die Zugangsmodalitäten, das Datenformat sowie eine Kurzbeschreibung dokumentiert. Diese und weitere Details sind online zusammengefasst ¹.

Die zweite Sammlung bietet eine strukturierte Übersicht über bestehende Modelle, darunter Flächennutzungsmodelle, Verkehrsnachfragemodelle für den Personen- und Güterverkehr sowie Verkehrssimulationsmodelle. Für jedes Modell wurden zentrale Informationen dokumentiert – darunter der Modelltyp, das Untersuchungsgebiet, die räumliche Auflösung, die Aggregationsebene, Eigentümer und Ansprechpartner, verwendete Eingabedaten, erzeugte Ausgabedaten sowie exemplarische Anwendungsszenarien. Diese Angaben wurden in einem Modellkatalog zur Flächennutzung und Verkehrsnachfrage gebündelt und systematisch aufbereitet ².

Darüber hinaus wurden weitere für AP3 relevante Daten erfasst, darunter Fahrzeugbestandsdaten, der Anteil an Elektrofahrzeugen (BEV, PHEV) sowie Nutzungsdaten der bestehenden öffentlichen Ladeinfrastruktur in München ³.

AP1.3 – Definition von Indikatoren:

In Zusammenarbeit mit dem M Cube-Integrationsprojekt SUE wurde ein KPI-Katalog entwickelt. Darin wurden verschiedene Kennzahlen identifiziert, die potenziell durch DatSim berechnet werden können. Dazu zählen unter anderem Reisezeit, Zugang zu Mobilitätsangeboten, Verkehrsfluss, Systemnutzung, Unfallzahlen, Flächeneffizienz, Energieeffizienz, CO₂-Emissionen, NO_x-Emissionen, PM-Emissionen sowie Lärmbelastung. Für die Umsetzung wurden die KPIs weiter differenziert – in statische Geoanalysen und dynamische KPIs, die aus den simulierten Verkehrsflüssen abgeleitet werden. Die Möglichkeit einer

¹ <https://collab.dvb.bayern/spaces/TUMmsmodels/pages/68527516/Databases>

² <https://collab.dvb.bayern/pages/viewpage.action?pageId=69114720>

³ <https://collab.dvb.bayern/pages/viewpage.action?pageId=69114720>

simulationsbasierten Analyse ist im SUE-Katalog vermerkt und wurde im Rahmen eines von SUE organisierten Workshops dem Cluster vorgestellt.

Für die KI-gestützte Vorhersage von KPIs wurde die KPI-Liste überarbeitet und die KPIs hinsichtlich deren Vorhersagbarkeit durch eine KI-Pipeline analysiert. Qualitative KPIs wie die "Akzeptanz" oder "Partizipation" wurden für die KI gestützte Analyse ausgeschlossen wohingegen quantitative KPIs wie "Emission" und "Lärm" aufgenommen wurden. Zudem wurde ein Anforderungsprofil für KPIs in der KI-Pipeline ausgearbeitet. In dem Anforderungsprofil wurden Anpassungsmöglichkeiten für die quantitativen KPIs von SUE beschrieben und Besonderheiten der einzelnen KPIs definiert. Das Anforderungsprofil wurde intern für die Implementierung der KI-Pipeline verwendet.

AP 2 – Prototyp Gesamtsimulation und Datenhub

Ziel des AP 2 ist die Umsetzung eines Prototyps für Datenhub und Gesamtsimulationsmodell inklusive des Austauschs zwischen den beiden Einheiten.

AP 2.1 – Anforderungsanalyse und Identifikation des Datenbedarfs:

Die funktionalen und technischen Anforderungen an den Datenhub wurden unter anderem mit partizipativer Beteiligung der Clusterprojekte in Form von Workshops gesammelt. (16.11.21 im Rahmen des Symposium Mobilitätsdaten der UnternehmerTUM, 21.01.22 M Cube Jahrestagung, 05.05.22 M Cube Summer Kick-off). Auf Basis der gesammelten Informationen wurden verschiedene Stakeholder identifiziert und die entsprechenden User Stories erarbeitet. Die identifizierten Stakeholder sind Data Owner, Data Consumer, Model Owner, Model Consumer, Administrator sowie die projektverantwortliche Person. Die identifizierten User Stories sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.



Abbildung 1: Definierte User-Stories basierend auf Anwender - Workshops

Die abgeleiteten Funktionalitäten des Datenhubs umfassen eine Vielzahl von Aspekten, die den Umgang mit Daten und Modellen erleichtern. Dazu gehören die Verwaltung der Nutzer und ihrer Rollen, die gezielte Suche nach relevanten Daten oder Modellen sowie das Einsehen von Metadaten, um Informationen über deren Inhalt und Eigenschaften zu erhalten. Zudem muss die Möglichkeit bestehen, neue Datensätze oder Modelle hochzuladen, Zugriffsrechte individuell zu vergeben und entsprechende Lizenzen festzulegen. Bestehende Datensätze sollen aktualisiert und weiterentwickelt werden können, während gleichzeitig eine strukturierte Verknüpfung zwischen Inputdaten, Modellen und Outputdaten ermöglicht wird. Darüber soll auch eine erleichterte Kontaktaufnahme mit den jeweiligen Autoren sowie die Option, Zugriffsberechtigungen für bestimmte Datensätze gezielt anzufordern, bestehen. Basierend auf den erforderlichen Funktionalitäten wurde zunächst der Stand der Technik recherchiert und mit den Anforderungen abgeglichen. Die abgeglichenen Softwarelösungen umfassen sowohl

akademische Beispiele wie MediaTUM, InvenioRDM, Dewey Data und SciLifeLab als auch allgemeine Open-Data-Plattformen wie den Open Data Space München und die Mobilitätsplattform Deutschland.

Die identifizierten Plattformen wurden bzgl. der zugrunde liegenden Architekturen, der aktiven Entwicklungscommunity und der Anwendbarkeit auf die M Cube Anforderungen bewertet. Sämtliche betrachtete Lösungen waren Cloud fähig und erlaubten auch datenbankbasierte Inhalte. Die weiteren Unterschiede sind in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet:

Lösung	Open Source	Aktualität	Zugriffsrechte	Open und Closed Data	Nachvollziehbarkeit (beliebige Querverweise)
MediaTUM	Ja	Nein (4 Jahre alt)	Nein	Nein	Ja
InvenioRDM	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Dewey Data	Nein	Ja	Nein	Nein	Eingeschränkt
SciLifeLab	Teilweise	Ja	Ja	Nein	Eingeschränkt
Open Data Space München	Nein	Ja	Ja	Ja	Eingeschränkt
Mobilitätsplattform Deutschland	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein

Tabelle 2: Analyse und Einordnung bestehender Softwarelösungen für die Datenverwaltung

Die Open Source Softwarelösung InvenioRDM erfüllt die Anforderungen am besten und wurde zur Realisierung des Datenhubs gewählt. Die Kernfunktionen von Invenio umfassen ein Daten-Repository, eine umfassende Metadatenverwaltung sowie ein flexibles Nutzer- und Rechtemanagement. Zudem ermöglichen sie die Organisation in Nutzergruppen (Communities) und bieten Optionen für Open Data oder Closed Data mit gezielten Freigaben innerhalb von Nutzergruppen oder per Link-Sharing. Weiterhin besteht die Möglichkeit, auf externe Ressourcen wie verlinkte Arbeiten oder Github zu verweisen. Eine API sowie ein anpassbares Web-Frontend runden die Funktionen ab.

In der nachfolgenden Tabelle ist die technische Umsetzung der Kernanforderungen aufgelistet:

Funktionale Anforderung aus dem Projektantrag	Features
Zugriffsrechteverwaltung	Open Data/Closed Data, Communities, Sharing per Link
Cloud fähig	Architektur vollständig Docker basiert
Datenbankbasierte Inhalte	Anpassbares Metadatenmodell ermöglicht die Einbindung von beispielsweise der RemGo Policy Datenbank inklusive Durchsuchbarkeit
Ablage von Simulationsergebnissen mit Versionierung	Versionierung von Datensätzen; Verweise auf Github
Nachvollziehbarkeit von Erkenntnisprozessen	Verweise auf interne Ressourcen wie Datensätze wie auch auf externe Ressourcen wie DOIs oder URLs

Tabelle 3: Technische Umsetzung der Kernanforderungen

Zur Anforderungsanalyse und Identifikation des Datenbedarfs bezogen auf das Gesamtsimulationsmodell haben wir zuerst ein Untersuchungsgebiet definiert, das innerhalb der Simulation simuliert wird. Das

Untersuchungsgebiet umfasst den Großraum München und bezieht die meisten Reisebeziehungen in den Modellierungsrahmen ein. Das Untersuchungsgebiet wird in der folgenden Abbildung visualisiert.



Abbildung 2: Untersuchungsgebiet des Gesamtsimulationsmodells.

Aufgrund der Verfügbarkeit von Daten zur Bevölkerungsstruktur basiert der Modellierungszeitraum im Modell auf dem Jahr 2011. Um die aktuelle Demografie widerzuspiegeln, haben wir die Bevölkerung erweitert, um der Gesamtbevölkerungszahl im Jahr 2022 zu entsprechen. Die Bevölkerung zukünftiger Jahre kann mithilfe des Landnutzungsmodells aktualisiert werden. Die synthetische Bevölkerung für verschiedene Zeiträume sind im Datenhub abgelegt.

AP 2.2 - Aufbau und Integration der Komponenten Datenhub und Gesamtsimulation

Bei der Entwicklung des Datenhubs wurde als nächster Schritt eine Hostingumgebung gewählt. Dabei bestand die Möglichkeiten aus einer Cloud Hosting oder einer self-hosted Lösung. Im Ergebnis übernimmt der Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TUM den technischen Betrieb des Datenhubs und nutzt dafür eigene Serverressourcen. Für diese Entscheidung war nach einer Marktübersicht und dem Feedback der potenziellen Nutzergruppe im Cluster, zwei Faktoren entscheidend. Erstens die Planungssicherheit der Kosten, welche gerade bei einer Laufzeit über die reine Projektlaufzeit hinaus kritisch sein kann. Zweitens der Faktor des Datenschutzes. Zur einfachen Datenweitergabe zwischen den verschiedenen Partnern des Clusters ist es notwendig, dass klare Datenschutzregeln gelten. Hierbei ist es am einfachsten, wenn die Daten den Kreis der Partner nicht verlassen. Innerhalb dieses Kreises gilt weiterhin der Rahmenvertrag.

Die Softwarelösung wurde auf den Ressourcen implementiert und angepasst. Die Anpassungen waren hierbei insbesondere:

- Anpassung an die M Cube CI
- Anpassung der Landingpages
- Containerization konfigurieren zum skalierbaren Deploy auf der on-premise Hardware
- Änderungen in den Security Einstellungen zum hochladen beliebiger Datentypen
- Später: Einführung der Simulationsspezifischen Datentypen

Im Zusammenhang mit der Architektur der genutzten InvenioRDM-Umgebung können die Änderungen nochmal genauer verortet werden:

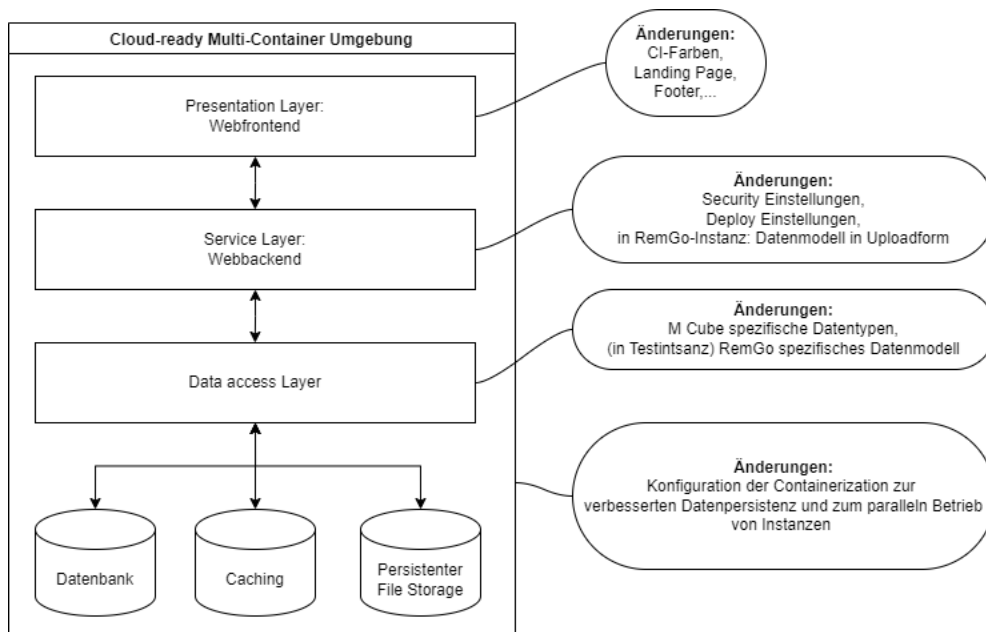


Abbildung 3: Verortung der Änderungen im Kontext der InvenioRDM-Architektur.

Die initiale Inbetriebnahme erfolgte in Form eines Soft-Launches am 1.12.2022 (datenhub.mcube-cluster.de). Um die Clusterprojektstruktur im Datenhub abzubilden, wurden darin eine Communitystruktur eingerichtet und die entsprechenden administrativen Rechte an die Projekte übergeben. Die Communities können sich hierbei selbst verwalten und die weiteren Rechte unter den Mitgliedern selbst weitergeben. In Form eines Webinars am 15.12.2022 wurde der Datenhub offiziell dem gesamten Cluster vorgestellt (Aufzeichnung im Datenhub⁴). Am Ende des nachfolgenden Quartals wurde ein weiteres Webinar mit Anwendern des Datenhubs durchgeführt. Dieses diente zum Einholen von Feedback. Das Ergebnis dieses Webinars waren einige Vorschläge zur Verbesserung der Nutzerfreundlichkeit aber auch, dass es zu Beginn der Clusteraktivitäten noch nicht ausreichend viele Ergebnisdatensätze gab, um den Hub zu befüllen. Des Weiteren gab es Vorbehalte unter den Partnern, trotz der Cluster-Rahmenverträge Daten dem Cluster frei zur Verfügung zu stellen.

Anschließend wurde ein Proof-of-Concept zur Kopplung der Datenhub API mit dem Simulationsmodell erfolgreich getestet. Hierfür wurde das Metadatenmodell um spezifische Einträge erweitert (Simulationsconfig, Netzwerk- und Aktivitätspläne). Die entwickelte Simulationspipeline greift auf den Datenhub über die Web-API zu und kann nach diesen Datentypen filtern. Nachfolgend kann über die GUI der Simulationsumgebung direkt die benötigten Dateien heruntergeladen und nachfolgend in der GUI auch editiert werden. Dieses Vorgehen ermöglicht im Zusammenspiel mit der Versionierung auf dem Datenhub eine nachvollziehbare und nutzerfreundliche Nutzbarmachung der Simulationsumgebung. Der Ablauf ist schematisch in der nachfolgenden Grafik dargestellt.

⁴ <https://datenhub.mcube-cluster.de/records/yt3eg-qrn35>

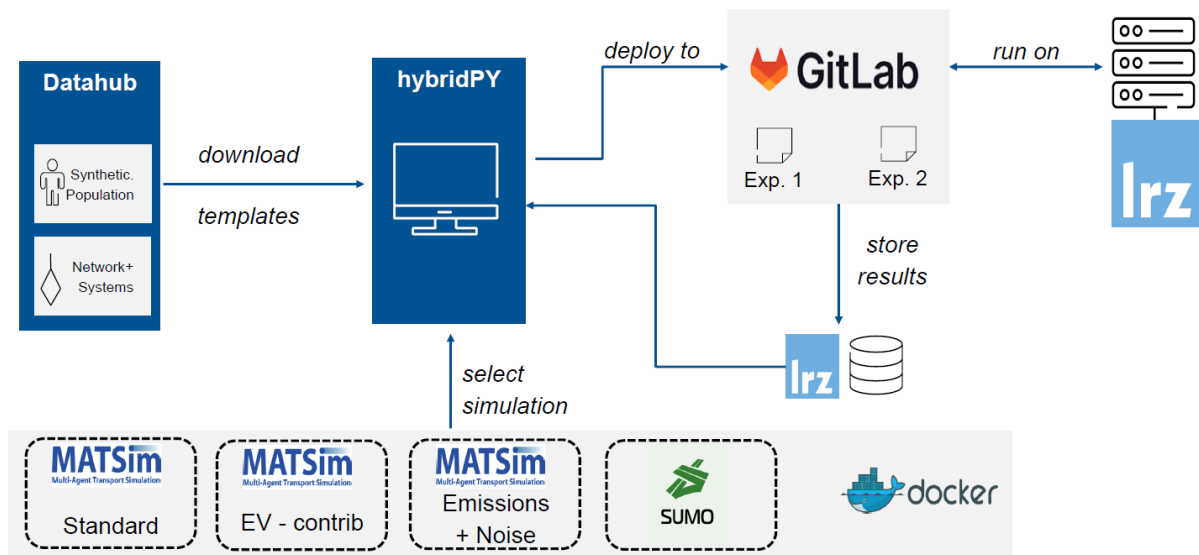


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Deploy-Pipeline des Simulationsmodells.

AP 2.3 – Erweiterung der Verkehrssimulation um ein Aktivitätenmodell und Simulation des Ist-Szenarios

Im Kontext von DATSim wurde ein aktivitätsbasiertes Verkehrsnachfragemodell aufgebaut. ABIT (Activity Based Integrated Transport Model) wurde von der Professur für Verkehrsverhalten an der Technischen Universität München entwickelt. Es generiert einwöchige Aktivitätspläne individuell für jede Person im Untersuchungsgebiet und aktualisiert diese im Laufe der Zeit schrittweise durch die Integration eines Landnutzungsmodells. Der von ABIT generierte Aktivitätsplan ist ein Tourenplan, der aus Aktivitätsketten und Fahrten zwischen Aktivitäten über einen Zeitraum von einer Woche besteht. Simulierte Aktivitäten überschneiden sich nicht, sodass sich Personen zu einem bestimmten Zeitpunkt nur an einem Ort befinden können.

ABIT simuliert Aktivitätshäufigkeiten und Reisebedarf während einer typischen Woche, um die täglichen Schwankungen zu erfassen, insbesondere zwischen Wochentagen und Wochenenden. In Bezug auf die Zeitschritte simuliert ABIT Aktivität und Reisebedarf kontinuierlich in 5-Minuten-Schritten. ABIT berücksichtigt nur Aktivitäten außerhalb des Hauses, die den Reisebedarf der Personen auslösen. Aktivitäten innerhalb des Hauses wie Online-Shopping und Arbeiten von zu Hause aus werden nicht berücksichtigt. Derzeit unterscheidet ABIT acht Arten von Aktivitäten, wie Zuhause, Arbeit, Bildung, Begleitung, Einkaufen, Freizeit, Sonstiges und Nebentour. ABIT bildet die meisten regionalen und urbanen Verkehrsmodi, wie PKW (Fahrer), PKW (Beifahrer), Zug, U-Bahn, Tram, Bus, Fahrrad, Zufußgehen.

ABIT ist darauf ausgelegt das übliche Reiseverhalten und die wöchentlichen Zeitpläne der Menschen mithilfe mehrerer Verhaltensmodelle in sequenzieller Reihenfolge zu modellieren. Die folgende Abbildung zeigt den Modellfluss von ABIT.

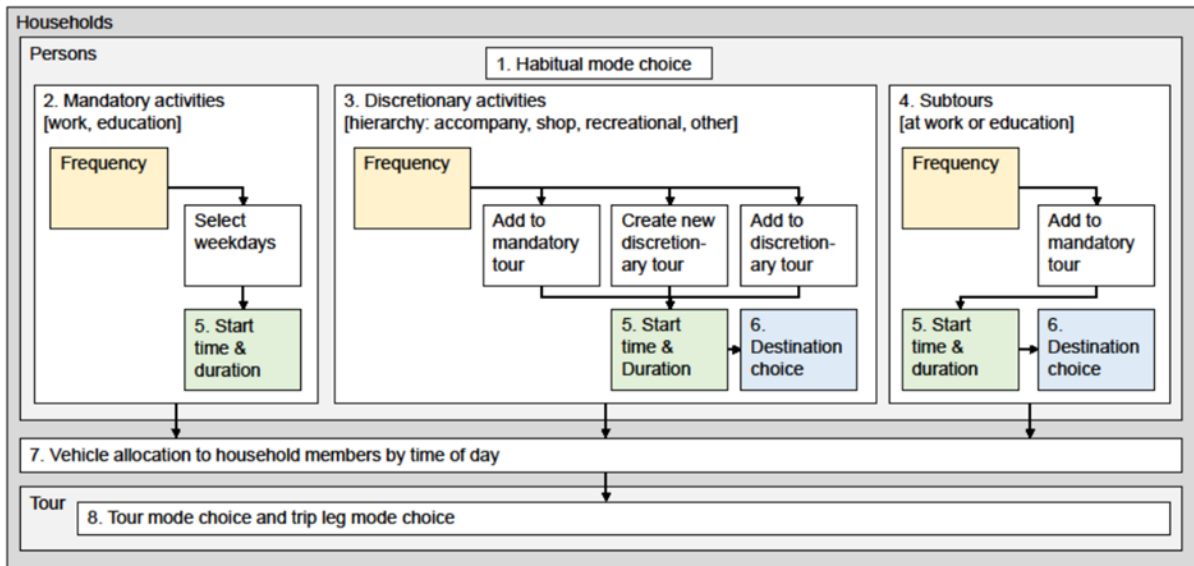


Abbildung 5: Modellfluss von ABIT.

Abgesehen von der Fahrzeugnutzung (Schritt 7), die auf Haushaltsebene zugewiesen wird, erfolgen alle anderen Schritte der Planerstellung derzeit für jede Person innerhalb jedes Haushalts. Der Plan wird mit den folgenden Schritten erstellt:

1. Gewohnheitsmäßiger Modus: Jedem Agenten wird ein gewöhnlicher Modus zugewiesen, das Verkehrsmittel, das er am häufigsten verwendet, um im Verlauf einer Woche Pflichtaktivitäten (z.B. Arbeit und Bildung) zu erreichen. Der gewöhnliche Modus beeinflusst die Aktivitätsgenerierung, die Tourenverknüpfung, die Zielwahl und das Moduswahlmodell.
2. Obligatorische Aktivitäten: Für jeden Agenten wird die wöchentliche Anzahl der obligatorischen Aktivitäten (Arbeit und Bildung) ausgewählt und einem Wochentag zugewiesen. Da mehrere obligatorische Aktivitäten am selben Tag durchgeführt werden, vereinfacht das Modell das Verhalten der Agenten auf eine obligatorische Tour pro Tag mit maximal sieben Touren pro Woche.
3. Diskretionäre Aktivitäten: Die Anzahl der diskretionären Aktivitäten nach Zweck wird für jeden Agenten ausgewählt. Die Häufigkeit jedes Aktivitätszwecks wird jedoch unabhängig geschätzt und eine Hierarchie der Zwecke ist vordefiniert, sodass die Zuweisung bestimmter Zwecke eine höhere Priorität erhält als andere. Die Hierarchie ist wie folgt: Begleiten, Einkaufen, Sonstiges, Freizeitgestaltung. Nach der Häufigkeitsgenerierung wird jede Aktivität entweder als Stopp einer vorhandenen Tour hinzugefügt oder zum Erstellen einer neuen Tour verwendet. Für jede diskretionäre Aktivität werden die folgenden Schritte gemäß der Zweckhierarchie ausgeführt:
 - a. Erstens werden diskretionäre Handlungen als Stopps unterschieden, die einer obligatorischen Tour zugeordnet sind oder nicht.
 - b. Zweitens werden die diskretionären Aktivitäten, die nicht als obligatorische Tourstopps kategorisiert sind, entweder als Stopps einer vorhandenen diskretionären Tour oder als Hauptaktivität einer diskretionären Tour bezeichnet.
4. Untertouren: Für Pflichttours kann das Modell Untertouren hinzufügen, die bei der Pflichtaktivität beginnen und enden. Untertouren werden nicht weiter nach Zweck unterschieden, sondern durch ihre Startzeit und Dauer beschrieben.
5. Dauer und Startzeit: Bei obligatorischen Aktivitäten werden Dauer und Startzeit als Teil der Job- oder Schulattribute der synthetischen Population angegeben. Bei diskretionären Aktivitäten wird zuerst die Dauer ausgewählt und dann ein Wochentag und eine Tageszeit probabilistisch innerhalb des verfügbaren Zeitfensters dieses Agenten ausgewählt. Bei Untertouren basieren Startzeit und Dauer der Untertouren auf der Wahrscheinlichkeitsverteilung aus MOP-Daten.

6. Zielwahl: Zusätzlich zu den von der synthetischen Population übernommenen Wohn-, Arbeits- und Bildungsstandorten wird jeder beliebigen Aktivität ein Standort zugewiesen. Die Zielwahl hängt von der Attraktivität potenzieller Standorte und der Reiseimpedanz entweder vom Wohnort (für die Hauptaktivitäten) oder von den Standorten der Aktivitäten unmittelbar davor und danach (für Zwischenstopps) ab.
7. Fahrzeugzuteilung: Auf Haushaltsebene werden Regeln zur Berücksichtigung der Fahrzeugverfügbarkeit implementiert. Für jede Tour eines Haushaltsmitglieds werden die Reisezeiten mit Auto und öffentlichen Verkehrsmitteln verglichen. Unter allen Haushaltsmitgliedern mit Führerschein wird das Auto dem Agenten zur Verfügung gestellt, der den größten Vorteil aus der Nutzung eines Autos gegenüber öffentlichen Verkehrsmitteln zieht. Wenn ein Agent sich für das Auto entscheidet, wird ein Haushaltsauto für die Dauer der Tour den anderen Haushaltsmitgliedern nicht zur Verfügung gestellt.
8. Wahl des Verkehrsmittels: Mithilfe eines verschachtelten Logit-Modells wird jeder Tour ein Verkehrsmittel zugewiesen. Normalerweise werden die Fahrtabschnitte der Tour mit demselben Verkehrsmittel zurückgelegt wie die Tour selbst, aber diejenigen, die öffentliche Verkehrsmittel nutzen, können ausgewählte Abschnitte auch zu Fuß zurücklegen. Insbesondere besteht die Möglichkeit, dass Nebentouren zu Fuß zurückgelegt werden, anstatt das Verkehrsmittel der Haupttour zu nutzen.

Wir haben die Verkehrsnachfrage basierend auf der synthetischen Bevölkerung von 2022 als Basisszenario modelliert. Das Modell ist mit der Umfrage von Mobilität in Deutschland kalibriert und wurde erneut mit Verkehrszählungsdaten validiert. ABIT wurde als Open-Source-Software entwickelt. Die Methodik des ABIT-Modells ist in Github zu finden⁵ und ausführlich dokumentiert⁶.

AP2.4 - Entwicklung einer erklärbaren KI-Pipeline

Es wurde eine KI-Pipeline zur schnellen und akkuraten Approximation von Simulationsergebnissen implementiert. Speziell werden durch die KI-Pipeline KPIs prognostiziert, die die Simulationsergebnisse approximieren. Ziel der KI-Pipeline ist es die Relation zwischen Simulationseingangsdaten und Simulationsergebnissen zu lernen. Die KI-Pipeline kann Simulationsergebnisse effizient prognostizieren ohne die zeitaufwändige Simulation laufen lassen zu müssen. Die KI-Pipeline besteht aus den folgenden Teilmodulen:

1. Die KI-Pipeline umfasst die Überarbeitung der Simulationseingangsdaten und die Aufteilung in Trainings-, Validierungs-, und Testdatensätze. Die Überarbeitung der Simulationseingangsdaten ermöglicht die Verarbeitung unterschiedlicher Eingangsformate in der Pipeline sowie die Berücksichtigung verschiedener Simulationslevels (makroskopisch, mesoskopisch, mikroskopisch).
2. Innerhalb der KI-Pipeline können verschiedene KI-Modelle trainiert werden, bspw., eine Regression, ein Perzeptron, ein neuronales Netzwerk, ein Random Forest, ein graphenbasiertes neuronales Netzwerk, sowie ein Base-Ansatz. Der Base-Ansatz lernt keinen Zusammenhang zwischen den Eingangsdaten und Prognosedaten und prognostiziert nur den Mittelwert aus den Trainingsdaten. Der Base-Ansatz bestimmt somit die default accuracy einer Prognose und dient zur besseren Vergleichbarkeit der KI-Modelle.
3. Die KI-Pipeline ermöglicht die Prognose von KPIs auf verschiedenen Ebenen: i) Die KI-Pipeline kann Objekt-bezogene KPIs, wie beispielsweise die Lademenge einer Ladesäule, prognostizieren. ii) Die KI-Pipeline kann Straßen-bezogene KPIs, wie beispielsweise den Verkehrsfluss, prognostizieren. iii) Die KI-Pipeline kann Zonen-bezogene KPIs, wie beispielsweise die Emission innerhalb einer Zone, prognostizieren. iv) Die KI-Pipeline kann Stadt-bezogene KPIs, wie beispielsweise die Emission einer Stadt, prognostizieren.

⁵ <https://github.com/msmobility/abit>

⁶ <https://collab.dvb.bayern/pages/viewpage.action?pageId=69114727>

4. Die KI-Pipeline ermöglicht es verschiedenen KI-Modelle miteinander zu vergleichen und das KI-Modell mit der höchsten Prognosegenauigkeit für die jeweilige Anwendung auszuwählen.
5. Die KI-Pipeline ermöglicht eine Sensitivitätsanalyse durch die Vorhersage von Simulationsergebnissen für ungesehene Simulationsinstanzen.

AP 3 – Referenzprojekt Ladeinfrastruktur

Ziel des AP3 ist die Simulation der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in der Metropolregion München sowie der Erkenntnisgewinn für Datenhub und Simulationsmodell.

AP 3.1 – Entwicklung, Integration und Anwendung einer Ladeinfrastruktur-Simulation für die Metropolregion

Zunächst wurde ein im Rahmen einer Dissertation am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik angefertigtes Simulationsmodell zum Erkenntnisgewinn für das weitere Vorgehen herangezogen. Dieses Simulationsmodell ist auf die Analyse von Normalladevorgängen (bzw. Wechselstromladen bis max. 22 kW) ausgelegt. Das erwähnte Modell wurde den Projektbeteiligten zugänglich gemacht, im Detail diskutiert und verschiedene Anpassungen und Vorstudien durchgeführt. Daraus konnten verschiedene Erkenntnisse abgeleitet werden:

- **Datenverfügbarkeit:** historische Daten zur Nutzung von Ladepunkten sind schwer zugänglich. Während AC-Ladepunkte bereits heute weitgehend flächendeckend vorhanden sind und somit Daten (wenn auch aufwändig) vorhanden sind, sind zum DC- oder Schnellladen keine historischen Daten vorhanden. Zudem ist anzumerken, dass aufgrund der geringen Marktdurchdringung von BEV alle vorhandenen historischen Daten beschränkte Aussagekraft besitzen.
Die erwähnte geringe Marktdurchdringung bedingt weiterhin eine hohe Unsicherheit bei Extrapolationsszenarien. Diese Unsicherheiten betreffen einerseits die technischen Eigenschaften zukünftiger Fahrzeuge (v.a. Ladeleistung, Batteriekapazität) und andererseits den Markthochlauf. Dies wurde in der Erstellung der Extrapolationsszenarien berücksichtigt.
- **Entscheidungsverhalten bei der Wahl des Ladepunkts:** eine ausführliche Literaturrecherche ergab, dass das menschliche Entscheidungsverhalten bei der Wahl öffentlicher Ladepunkte von großer Komplexität geprägt ist. Verschiedene Autoren stellen fest, dass es eine Vielzahl (bis zu 40) Parameter gibt, die das Entscheidungsverhalten beeinflussen. Erkenntnisse zur Gewichtung dieser Parameter untereinander liegen in der Wissenschaft nicht vor. Es wurde deshalb entschieden, nur direkt in Zusammenhang stehende Faktoren, wie z.B. Ladezeit und Zeit für Umwege, zu berücksichtigen und andere Faktoren, wie den Preis, als indifferent anzunehmen. Dies bedingt die Trennung von AC- und DC-Ladeinfrastruktur.

Auf Basis der Erkenntnisse aus dem am FTM vorhandenen Simulationsmodell für öffentliche Ladeinfrastruktur $\leq 22\text{kW}$ sowie einer extensiven Literaturrecherche wurde die Entscheidung getroffen, die beiden grundlegenden Arten des Ladens (AC & DC/HPC) nicht in einer gemeinsamen Simulation zu analysieren. Vor allem die mangelnde Datenverfügbarkeit sowie die Komplexität bei der Modellierung menschlichen Verhaltens lassen eine kombinierte Simulation von AC & DC/HPC beim derzeitigen Stand der Technik wenig zielführend erscheinen. Dementsprechend wurde im Rahmen des Projekts ein Simulationsmodell zur Analyse des öffentlichen Ladens an Gleichstrom (DC) Ladestationen entwickelt, um die bereits vorhandenen Erkenntnisse zum AC-Laden zu komplementieren und so zu einem holistischen Bild zu kommen. Diesem liegen verschiedene Annahmen zu Grunde:

- Agenten warten in der Warteschlange bis sie Laden können und laden anschließend auf 80%
- geladen wird mit der maximal verfügbaren Ladeleistung (definiert im jeweiligen Szenario)
- Agenten fahren eine Tankstelle / Ladepark an, der auf ihrem Weg zwischen Aktivitäten liegt (Eine Unterbrechung der Aktivität, um an einen Ladeplatz zu fahren ist somit nicht möglich.)

- Sobald das Laden abgeschlossen wird, fahren die Agenten weiter
- Die Anzahl an Ladevorgängen ist zur Reduktion der Problemkomplexität und zur Vermeidung von Randwertproblemen vorgegeben
- Gütemaß, nach dem die Agenten ihr Verhalten optimieren:
 - Umweg, welcher durch den Agenten in Kauf genommen werden muss
 - Wartezeit an der Tankstelle

Darüber hinaus wurde das Simulationsframework MATSim entscheidend angepasst, in dem eine Variation der Aktivitätenlänge zur Laufzeit der Simulation ermöglicht wurde. Die intensive Entwicklung hat folgende best practices, welche ins Gesamtsimulationsmodell eingeflossen sind, ergeben:

- Simulationsszenarien werden lokal gespeichert. Eine automatisierte Verwaltung über den Datenhub ist zum einen technisch herausfordernd (große Datenmengen) und zum anderen im Sinne der Forschung eine unnötige Bürde. Stattdessen sollen zur Speicherung der Simulationsergebnisse persönliche Cloudspeicher verwendet werden (Durch die Limitierung des Speicherplatzes ist somit automatisch die Reduktion des Datenbestands im Nutzerinteresse.)
- Graphisches Nutzerinterface als auch die Bereitstellung von ready-to-use Szenarien ist erforderlich, um die Pipeline auszuführen.
- Container-basierte Deploypipeline ist notwendig, um die Ausführung der Simulationen gestaffelt zu ermöglichen und somit die zur Verfügung stehenden Rechenressourcen bestmöglich zu nutzen.

Zum Datenhub wurde eine Datenschnittstelle eingerichtet. Vorlagen für Simulationsszenarien werden durch den Datenhub bereitgestellt und sind über das graphische Nutzerinterface abfragbar. Als Datenformat werden hierbei die standardisierten und xml-basierten Datenformate der Simulationsumgebungen SUMO und MATSim verwendet. Diese bieten den Vorteil, dass Sie zum einen menschen-lesbar sind und zum anderen direkt in der Simulationsumgebung verwendbar.

AP 3.2 - Definition von Simulationsszenarien und Leistungsindikatoren

Da eine Simulation des gesamten Ladeaufkommens der Metropolregion Münchens als vor dem Stand der Technik (s. AP 3.1) sowie den zur Verfügung stehenden Ressourcen als nicht erfolversprechend identifiziert wurde, wurde als tagesaktuelles und gesellschaftlich relevantes Simulationsszenario der Aufbau von Schnellladeinfrastruktur identifiziert. Dieses Szenario beschränkt sich auf die handhabbare Betrachtung von DC-Ladeinfrastruktur, wodurch die Komplexität des menschlichen Entscheidungsverhaltens umgangen wird. Zum Ausbau der DC-Ladeinfrastruktur wurde von Bundeskanzler Olaf Scholz eine "Ladesäulenpflicht" für (konventionelle) Tankstellen angekündigt. Bisher sind keine Simulationsdaten zu dieser potentiell weitreichenden Ankündigung bekannt. Die Vorschläge der in die Debatte involvierten Stakeholder (Bundesregierung, Wirtschaftsverband Fuels & Energie, Deutscher Städte- und Gemeindebund) zur konkreten Gesetzgebung wurden dabei als konkrete Simulationsszenarien umgesetzt. Inhalt der Diskussion ist unter anderem:

- Welche Betreibergesellschaften werden zum Aufbau von LIS verpflichtet (nach Anzahl Tankstellen)?
- Welche Ladeleistungen sind vorzusehen?
- Substitutionsquoten (wenn an x% der Standorte mehr Ladepunkte errichtet werden, dürfen an 100-x% der Standorte keine Ladepunkte errichtet werden)
- Wechselwirkung mit dem Deutschlandnetz (Radien um Deutschlandnetz-Standorte, um die keine LIS errichtet werden muss)

So entstanden mehrere konkrete Simulationsszenarien, die eine Abschätzung der Relevanz der unterschiedlichen Faktoren und letztendlich die Ableitung von Empfehlungen erlauben.

Besonders relevant für die Bewertung des Szenarios für deren Betreiber sind:

- Die zeitliche Auslastung der Ladeinfrastruktur

- Anzahl der Ladevorgänge pro Tag, um das Potential möglicher sekundärer Geschäftsmodelle zu bewerten
- Die übertragene Energiemenge, um das Potential des Weiterverkaufs von Strom zu bewerten
- Die Effekte unterschiedlicher Ladeleistungen, um Kosten der Errichtung der Ladeinfrastruktur abschätzen zu können

Für die E-Fahrzeug Fahrerinnen und Fahrer spielen folgende in der Simulation abgebildete Kriterien eine entscheidende Rolle:

- Länge der Umwege, um Ladeinfrastruktur zu erreichen
- Wartezeit an der Ladestation
- Grundlegend die Möglichkeit, Ladevorgänge in die vorhandenen Aktivitätspläne zu integrieren
- Das resultierende Ladeverhalten, welches sich aus der oben beschriebenen Optimierung des Verhaltens ergibt. Also beispielsweise viele kürzere Ladestops oder weniger längere, was z.B. durch räumliche Verteilung, Auslastung oder Ladeleistung der Stationen beeinflusst wird

Eingangsdaten für die Simulation:

Der Mobilitätsbedarf für die Simulation der Ladeinfrastruktur wurde aus dem Nachfragemodell ABIT abgeleitet. Das Basismodell berücksichtigt allerdings nur die Fahrten mit konventionellen Fahrzeugen. Basierend auf der Literatursynthese wurde zusätzlich ein Übergangmodell für Elektrofahrzeuge entwickelt und in das Flächennutzungsmodell implementiert. Dabei wird angenommen, Haushalte würden ihre konventionellen Fahrzeuge je nach Alter ihrer Fahrzeuge, Einkommensstatus, Wohnort usw. durch Elektrofahrzeuge ersetzen. Der Besitz von Elektrofahrzeugen pro Haushalt wird anhand der statistischen Daten im Jahr 2022 kalibriert und die räumlichen Unterschiede werden, wie in der folgenden Abbildung dargestellt, erfasst.

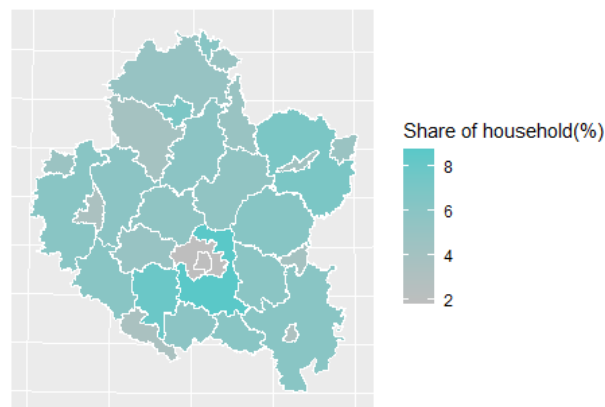


Abbildung 6: Besitz von Elektrofahrzeugen pro Haushalt.

Die Ergebnisse der explorativen Simulationsstudie von AC und DC Simulation lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die DC Simulation zeigt, dass die geplante Ladeinfrastruktur die zu erwartenden Bedarfe (basierend auf einer 3%igen Elektrifizierungsquote der Fahrzeugflotte) decken kann und keine Warteschlangen an einzelnen Ladestationen entstehen.
- Bei einem angenommenen Verkaufspreis von 0,50€/kWh und einem Einkaufspreis von 0,35€/kWh sowie einer verkauften Energiemenge von 600kWh pro Tag ergibt sich ein Reingewinn von 90€/Tag. Bei 100k€ Investition für die Errichtung eines DC-Ladepunkts ergibt sich so nach ca. 3 Jahren Rentabilität, was auf ein durchaus attraktives Geschäftsmodell schließen lässt, zumal zusätzlich zu verkaufende Produkte an Raststätten/Kiosks weitere Geschäftsfelder bieten.
- Die Betrachtung eines Maximal-Ausbau-Szenarios zeigt, dass es starke Schwankungen der Auslastungen verschiedener Standorte gibt. Dabei werden sowohl im urbanen als auch im

ländlichen Raum teils hohe Auslastungen erreicht, weshalb nicht davon auszugehen ist, dass die Versorgungslage auf dem Land, resultierend aus marktwirtschaftlichen Überlegungen, signifikant schlechter sein wird. Allerdings ist zu empfehlen, den Tankstellenbetreibern einen gewissen Spielraum einzuräumen. Dabei zeichnet sich also keine einfache Heuristik ab, die zum Ziel führen würde. Inwiefern bzw. welche gesetzliche Vorgabe das gewünschte Resultat der Versorgungssicherung herstellen könnte bedarf einer detaillierten Prüfung.

- Die Ergebnisse der AC Simulation zeigen klar, dass bei den bestehenden Versorgungsverhältnissen mit privaten Ladepunkten die öffentliche Ladeinfrastruktur eine weit untergeordnete Rolle einnimmt und die Nutzer die privaten Lademöglichkeiten präferieren.
- Für AC-LIS ergibt sich ein empfohlenes Verhältnis von 20:1 zwischen BEV-Besitzern ohne private Lademöglichkeit (zu Hause oder am Arbeitsplatz) und öffentlichen AC-Ladepunkten bzw. von ca. 50:1 zwischen gesamte zugelassenen E-Fahrzeugen und öffentlicher AC LIS.
- Es zeigen sich Wechselwirkungen zwischen Anzahl der Ladepunkte, Batteriegröße, Ladeleistung und erlaubter Standdauer. Die genannten Größen beeinflussen die erforderliche Anzahl öffentlicher AC-Ladepunkte signifikant, so dass Extrapolationsszenarien mit erheblicher Unsicherheit versehen sind.

In zukünftigen Arbeiten gilt es diese Hypothese abzusichern durch detaillierte Nutzerstudien im Kontext von DC Ladeinfrastruktur sowie dem Auswahlverhalten von AC und DC Lademöglichkeiten. Dieses Projekt legt die Grundlage für eine kombinierte Simulation.

AP 3.3 - Aufnahme und Bereitstellung von Realdaten für die Erstellung realistischer Lade- und Verbrauchsmodelle

Reale Ladekurven und Verbrauchskennfelder wurden als Grundlage detaillierter Simulationen entsprechend der Vorhabensbeschreibung aufgenommen und nutzbar gemacht. Entsprechend der im AP 3.1 erzielten Erkenntnisse bezüglich sinnvoller Ansätze zur makroskopischen Simulation wurde jedoch entschieden, diese detaillierten Daten nicht im Kontext der Ladeinfrastruktur zu verwenden. Diese liegen jedoch im Datenhub und können bei Bedarf jederzeit verwendet werden, wenn dies zu einem späteren Zeitpunkt sinnvoll erscheint.

AP 4 – Kommunikation, Austausch und Standardisierung

Ziel des AP4 ist die Etablierung gemeinsamer Daten- und Simulationsstandards für M Cube. Diese sollen katalogisiert und entsprechende Methoden zur Konvertierung und Aggregation bereitgestellt werden.

AP 4.1 - Sammlung M Cube-weiter Inputs

In diesem Arbeitspaket wurde eine stetige Sammlung von Beiträgen aus anderen M Cube-Projekten durchgeführt. Dabei wurden Daten, Szenarien, Modelle und Maßnahmen ermittelt, die im Rahmen der technischen Integration aus AP 5 in den zentralen Datenhub und das Gesamtsimulationsmodell integriert werden konnten. Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse aus Arbeitspaket 4.1 dargestellt.

Im Kontext des Teilprojektes „Datenhub und Simulationsmodell“ wurde eine Umfrage unter Experten aus der Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft durchgeführt, um verkehrspolitische Maßnahmen, die die Verbesserung von Raum, Zeit und Luft zum Ziel haben, zu bewerten. Der Maßnahmenkatalog wurde auf Basis der durch die Experten validierten Zukunftsthemen öffentlicher Personennahverkehr, innovative Verkehrssteuerungskonzepte, innovative Verkehrssysteme, innovative Verkehrsdienstleistungen, Infrastrukturausbau und Mobilitätsverhaltensanpassungen aufgestellt und umfasst 26 Einzelmaßnahmen. Einzelmaßnahmen wurden entsprechend ihrer Wirkung zur Verbesserung des Raums, der Zeit und der Luft von den Experten bewertet, wie auch der Grad des öffentlichen und persönlichen Interesses an der

Realisierung der Maßnahmen abgeschätzt. Die Ergebnisse sind in weiteren Veröffentlichungen detailliert dokumentiert⁷.

Auf Basis der diskutierten Szenarien wurden geeignete Simulationsmodellumgebungen bewertet und bereits innerhalb des Konsortiums bestehende Simulationsumgebungen identifiziert. Für die Wahl eines geeigneten Simulationsmodells ist zwischen dem Grad der Detailgüte (mesoskopisch vs. mikroskopisch) je nach Anwendungsgebiet zu unterscheiden. So erlauben es bereits mesoskopische Modelle, Verkehrsströme und Tagesbelastungen von Straßen abzubilden, können jedoch nicht durch die Verkehrsindividuen (Agenten) induzierte Rückkopplungseffekte ausreichend simulieren. Für Rückkopplungseffekte und genaue Stauvorhersagen sowie realitätsgetreue Reisezeitvorhersagen zu Zeiten hoher Straßenbelastung sind rechenintensive mikroskopische Simulationsmodelle notwendig. Folgende vorhandene, mesoskopische Simulationsmodelle wurden identifiziert: MATSim, Vehilux, BEAM, PTV-Visum, Aimsun Next, DynusT, Cube Avenue. Folgende vorhandene mikroskopische Simulationsmodelle wurden identifiziert: SUMO, TransModeler, TSIS-CORSIM, MITSIM, PTV Vissim und Partamics. Folgende Kriterien wurden für die Quer-kompatibilität und wissenschaftliche Verwertbarkeit zur Beurteilung der Simulationsumgebungen unter Befragung von Experten aus der Verkehrssimulation innerhalb des Konsortiums herangezogen: öffentliche Datenstandards, Transparenz in der Implementation, aktive Open-Source Community, Erweiterbarkeit und Modularisierbarkeit. Entsprechend der Anforderungsanalyse wurden nur Open-Source Lösungen, deren Codebasis öffentlich verfügbar ist in Betracht gezogen. Aufgrund der Tatsache, dass vorhandene Straßen- und Verhaltensdaten (Professur für Verkehrsverhalten, Mobilitätsreferat München), sowie Verkehrszählungen (Stadt München) bereits für MATSim im Konsortium vorliegen und innerhalb der Projektlaufzeit eine neuartige Kopplung der MATSim Straßendaten und Agentendaten auf SUMO erfolgt ist (DOI: 10.52825/scp.v5i.1030), sowie, dass die beiden genannten Simulationsumgebung durch eine große wissenschaftliche Community (ETH Zürich, Technische Universität Berlin) unterstützt werden, stellen diese nach abschließender Bewertung die besten Optionen für die Verkehrssimulation dar. Es wurden somit die Umgebungen MATSim (mesoskopisch) für den Großraum München und SUMO (mikroskopisch) für Teile Münchens mit genannten Inhalten aus dem Projektkonsortium (vorhandenes Straßenmodell, Erkenntnisse zu den Verhaltensweisen der Agenten im Straßenverkehr, Verkehrsströme aus ABIT) angereichert und diese querkompatibel dem Projektkonsortium leicht nutzbar (Docker – Containerisierung) zugänglich gemacht.^{8 9 10 11}

Um die Ergebnisse zu relevanten Datenformaten und Simulationsstandards für andere M Cube Projekte zugänglich zu machen, wurde eine Übersicht unter nachfolgenden Link erstellt¹²

AP 4.2 - Integrationsanforderungen, Standards, Schnittstellen und Übertragbarkeit auf weitere Metropolregionen

Aufbauend zu AP 4.1 erfolgte in AP 4.2 die Vorbereitung der technischen Integration der in AP 4.1 gesammelten Inputs in den Datenhub und das Simulationsmodell, welche abschließend in AP 5 durchgeführt wurde. Als Grundlage für diese Integration war eine systematische Analyse von auftauchenden Datenformaten, -strukturen und -verwendungen notwendig. Diese orientierte sich an dem kontinuierlichen Austausch mit M Cube internen Projektpartnern aus AP 4.1 und zielte auf eine Standardisierung von Datenstrukturen und -schnittstellen innerhalb der Mobilitäts-Domäne ab. Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse aus Arbeitspaket 4.2 dargestellt.

⁷ <https://datenhub.mcube-cluster.de/records/5xdgh-n9e97>

⁸ <https://datenhub.mcube-cluster.de/records/sbamd-nkx64>

⁹ <https://datenhub.mcube-cluster.de/records/zg9k7-3te95>

¹⁰ <https://datenhub.mcube-cluster.de/records/aqzh5-bv232>

¹¹ <https://datenhub.mcube-cluster.de/records/a3dk9-vdc30>

¹² <https://collab.dvb.bayern/display/TUMmcubedatsim/Datenformate%2C+Standards+und+Konvertierungsmethoden>

Folgende Anforderungen für die Datenformate wurden innerhalb des Konsortiums definiert, um Austausch der Daten zwischen den MCUBE Projekten und auch zu Dritten zu gewährleisten:

- offene Datenformate: die Formate sollten frei zugänglich und deren Implementation transparent einsehbar sein.
- cross-compatibility: Formate sollten auf verschiedenen Plattformen, Frameworks und Programmiersprachen les- und schreibbar sein.
- Zweckdienlichkeit: alle notwendigen Informationen sollten innerhalb des Datenformates abgerufen werden können.
- Zweckgebundene Verbreitung: um möglichst viele Anknüpfungspunkte auch außerhalb des Clusters zu bieten und Inhalte der Open-Source Community zu integrieren, sollte das Datenformat je nach Anwendungsgebiet bereits in seiner Nutzung etabliert sein.

Speziell für die Geo-Datenverarbeitung wurde zusätzlich ein neuartiges Framework entwickelt, und veröffentlicht (Ziegler, Enhancing Transportation Insights: A Scalable OpenStreetMap Harmonization and Synthesis Framework, IEEE ITSC2024) das alle genannten Schritte vereint.

Um die Integration der in AP 2 entwickelten KI-Pipeline in weitere Simulationsmodelle zu ermöglichen, wurden einheitliche Datenstandards für die Eingangs- und Ausgangsdaten der KI-Pipeline entwickelt, und in einem Anforderungsprofil festgehalten. Das Anforderungsprofil beschreibt die Aufbereitung von Simulationsergebnissen, um die Kompatibilität mit der KI-Pipeline zu gewährleisten. Die Datenstandards in dem Anforderungsprofil wurden holistisch definiert, und ermöglichen somit verschiedenen Indikatorebenen (Objekte, Zonen, ganzheitliche Betrachtung) sowie Eingabegranularitäten (Daten für jede Person, Daten für Zonen, etc.). Das Anforderungsprofil kann bei Erweiterungen der KI-Pipeline angepasst werden. Zudem wurde eine Pre-processing Komponente in die KI-Pipeline integriert, um die KI-Pipeline an sich verändernde Anforderungen anpassen zu können.

Des Weiteren wurde die KI-Pipeline in das Gesamtsimulationsmodell integriert. Durch die Integration in das Gesamtsimulationsmodell ist ein direkter Datenfluss zwischen Datenhub, dem Simulationsmodell und der KI-Pipeline möglich. Die einzelnen Module wurden via der Containerisierungsplattform Docker zur Verfügung gestellt, und die Schnittstellen kompatibel implementiert. Bei der Integration der KI-Pipeline in das Gesamtsimulationsmodell wurden die beschriebenen einheitlichen Datenstandards berücksichtigt.

Im Rahmen der Definition der Anforderungsanalyse erfolgte eine Definition und Weiterentwicklung von Schnittstellen zwischen der Verkehrssimulationssoftware SUMO und der GameEngine Unity¹³. Die Schnittstelle ist im Verkehrswissenschaftlichen Sektor insbesondere für Software-in-the-Loop Simulationen mit automatisierten Fahrzeugen von Bedeutung als auch ein essenzielles Softwaremodul für Human-in-the-Loop Simulatoren. Außerdem wurde eine Schnittstelle zu Verkehrsszenarien in die TUM-eigene Software CommonRoad integriert, um Pathplanning von automatisierten Fahrzeugen zu entwickeln und zu bewerten.

AP 4.3 – Untersuchung und Überführung der Modellabstraktionsgrade

Die Grundlage für das Gesamtsimulationsmodell ist eine agentenbasierte Verkehrssimulation. Je nach Untersuchungsgegenstand wurden derartige Verkehrssimulationen mikroskopisch, mesoskopisch und makroskopisch implementiert. Ziel des AP 4.3 war es, diese verschiedenen Modellabstraktionsgrade, welche stets bevorzugte Anwendungen hatten, auf die flexible Möglichkeit der Konvertierung untereinander hin zu überprüfen. Dies bedurfte Anforderungen der Umrechnungen, Zwischenergebnisse und Aggregationsvorgänge ohne Informationsverlust zu ermöglichen.

Insbesondere wurde die Überführbarkeit der Abstraktionsgrade mikroskopisch und submikroskopisch untersucht. Dabei wurde ein Fokus auf die Geometrieinformation von Straßen, Straßeneinrichtung, Gebäuden und weiteren Details gelegt. Außerdem wurden die Fahrzeuge und ihre Eigenschaften genauer

¹³ <https://sumo.dlr.de/pdf/2024/2-1.pdf>

untersucht. Man kann zusammenfassen, dass die Übertragbarkeit von mikroskopisch in submikroskopisch zwar möglich ist, wie die Schnittstelle „Sumonity“ zeigt, jedoch viele Annahmen getroffen werden müssen. In einem Austausch mit Experten aus dem EU-Projekt i4Driving (Arbeitspaket 3) wurde die Notwendigkeit eines Standards für submikroskopische Simulationen in Verbindung mit mikroskopischer Verkehrssimulation diskutiert, um effizientere internationale Zusammenarbeit zu fördern.

AP 4.4 – Methodenerarbeitung – Testbed(s) für Verkehrssimulationen

In Arbeitspaket AP 4.4 wurden drei Ziele verfolgt: (1) aus einer bestehenden (Online-) Plattform Daten und Modelle zu duplizieren für (spezifizierte) Offline-Untersuchungen, (2) Verfahren zu implementieren, um Echtzeitdaten in Testbed(s) einzubinden, und (3) Datenaggregation zu untersuchen im Hinblick auf die Verkehrssteuerung. Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse aus Arbeitspaket 4.4 dargestellt. Für die Einbindung von Echtzeitdaten für Verkehrssimulationen in Testbeds wurden exemplarische Datenhubsysteme erstellt, die offline oder in Echtzeit Verkehrsdaten liefern. Hierzu wurde im Konkreten die Kalibrierung und Echtzeitsteuerung von Lichtsignalanlagen untersucht, sowie die Integration von multimodalen Verkehrsszenarien in die TUM-eigene Software CommonRoad, um Pathplanning von Automatisierten Fahrzeugen zu entwickeln und zu bewerten.

AP 4.5 – Diskussion ausgewählter Teilsimulationen aus wissenschaftlicher und unternehmerischer Sicht

In Arbeitspaket 4.5 war eine eingehende Diskussion der in das Gesamtsimulationsmodell und den Datenhub integrierten Teilsimulationen bzw. Datensätzen sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus unternehmerischer Sicht geplant. Die wissenschaftliche Diskussion erfolgte hierbei im Rahmen des üblichen Forschungsbetriebs der TUM durch ihre beteiligten Lehrstühle. Der weiterführende Diskurs fand durch die Veröffentlichung von Ergebnissen auf internationalen Fachkonferenzen statt und bildete einen kontinuierlichen Feedbackprozess für das Vorhaben. Es wurde eine Einordnung aus unternehmerischer Sicht vorgenommen und die technische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit angestrebter Mobilitätsszenarien zur Plausibilisierung der Forschungsergebnisse durchgeführt.

AP 5 – Integration von Teilmodellen und Datenströmen

In diesem Abschnitt werden die abgeschlossenen Arbeiten an Datenhub, Simulationsmodell und KI-Pipeline vorgestellt. Im AP 5.1 werden die Erweiterung des Datenhubs präsentiert. Im AP 5.2 werden die im Projekt getesteten Szenarien dargestellt und im AP 5.3 abschließende Simulationen der Szenarien durchgeführt. Darüber hinaus wird in AP 5.4 der Trainingsprozess der KI-Pipeline beschrieben und in AP 5.5 die Anwendung der KI-Pipeline demonstriert.

AP 5.1 – Integration der Daten und Erweiterung des Datenhubs

Zur funktionalen Erweiterung des Datenhubs wurde eine Chatbot programmiert und deployed. Dieser postet automatisch eine neue Nachricht in das M Cube Kommunikationstool, wenn ein neuer Datensatz auf den Hub hochgeladen wird. Teil dieser Nachricht in eine Kurzzusammenfassung der Metadaten des neuen Datensatzes.

Prototypisch wurde die Weiterentwicklung in Kooperation mit RemGo getestet. Hierfür wurde eine Testinstanz aufgesetzt, um eine Mobility-Policy-Datenbank des Projektes zu beherbergen. Dazu wurde das Metadatenmodell entsprechend erweitert und die Anbindung eines eigenen Frontends ermöglicht.

Die Erweiterungen entsprachen:

- Einführung einer neuen Datenkategorie
- Freitextfelder: Land, Entscheidungsträger, Ausführendes Organ, Status und Kabinett
- Dropdowns: Themen, Keywords, Entscheidungslevel, Implementierungslevel und Typ

Innerhalb der Testinstanz wurde auch die Lokalisierungsmöglichkeiten (verschiedene Sprachen) getestet. In dem Rahmen wurde das Projekt RemGo bei der Entwicklung eines eigenen Webfrontend, das den

Datenhub als backend nutzt, unterstützt. Hierfür mussten insbesondere weiterführende Konfigurationen am Datenhub vorgenommen werden, um Cross Site Content und die einhergehenden Sicherheitsmaßnahmen zu ermöglichen. Dies ist notwendig, damit das originale Frontend, wie auch das eigenständige RemGo Frontend parallel betrieben und genutzt werden können.

Die Basisdaten aus dem AP 2 wurden auf dem Datenhub zur Verfügung gestellt.

Im Rahmen der IAA-Präsenz und den Vorbereitungen hierauf wurde die strukturierte projektübergreifende Datensammlung getestet und wertvolles Feedback eingeholt. Es gab positives Feedback aus den Projekten zur Nutzerfreundlichkeit, gleichzeitig wurden weitere offene Punkte transparent gemacht. Diese lagen vor allem in einer feingliedrigeren Rechtvergabe für Daten, sowie Vorbehalte beim Hochladen durch Drittparteien. Der Datenhub wurde während der IAA auch als Teil des DatSims Poster vorgestellt. Es erfolgte eine fortwährende Integration der Datensätze der M Cube Projekte. Zum Schluss konnten 64 Datensätze auf den Datenhub hochgeladen werden.

AP 5.2 - Integration der Szenarien der M Cube Projekte

DatSim ist ein Integrationsprojekt, das andere Innovationsprojekte in das Modell- und Simulationsframework integriert. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, gab es mehrere Präsentationen zu ABIT und der Gesamtsimulation für den gesamten Cluster. Nach den Verbreitungspräsentationen zu den Modellen fanden mehrere bilaterale Treffen zwischen dem DatSim-Team und anderen Projektteams statt. Nach dem bilateralen Treffen wurde ein vom AQT-Team vorgeschlagenes politisches Szenario in der ABIT- und Gesamtsimulation getestet. Darüber hinaus entwickelten wir ein komplexeres Szenario, um die Leistungsfähigkeit des aktivitätsbasierten Verkehrsnachfragemodells zu testen.

Zwei Szenarien werden mithilfe des ABIT-Modells und der Gesamtsimulation modelliert. Das Ziel von DatSim ist es zu zeigen, dass das ABIT-Modell und die Gesamtsimulation verwendet werden können, um Entscheidungsträger bei der Umsetzung von Mobilitätsinnovationen zu unterstützen. Es wurden zwei Szenarien entwickelt:

- Low-Emission Zone Szenario, und das
- Parkhaus Szenario.

Die beiden Szenarien wurden entwickelt und getestet, um die besonderen Anforderungen an das ABIT-Modell und die Gesamtsimulation, wie etwa Elektrofahrzeuge, beispielhaft zu testen. Wir haben keine Szenarien wie das Hinzufügen oder Entfernen von Straßenverbindungen getestet, da solche Szenarien die Modellsensitivität von ABIT- und Gesamtsimulationen nicht effizient testen können. Die entwickelten Szenarien dienen nur als Testszenarien und unterliegen keinem spezifischen politischen Interesse.

Low-Emission Zone (LEZ)

Im ersten Szenario werden Umweltzonen, oder auch Low-Emission-Zones genannt, implementiert. Die Einfahrt von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren in solche Umweltzonen von außerhalb der Umweltzonen ist nicht erlaubt. Personen, die innerhalb der Umweltzonen wohnen, können jedoch weiterhin aus den Umweltzonen heraus- und in sie hineinfahren. Wie die folgenden Abbildungen zeigen, haben wir drei Umweltzonen mit unterschiedlichen räumlichen Maßstäben entwickelt, nämlich Mittlerer Ring, Bahn-Ring und Altstadt-Ring.



Abbildung 7: Visualisierung der Low-Emission Zonen.

Das Szenario dient zur Untersuchung von kurzfristigen Entscheidungen der Menschen beim Reisen. Langfristige Entscheidungen und Veränderungen werden somit aus dem Szenario ausgeschlossen. Dabei folgen wir der Hypothese, dass die Menschen keine kurzfristigen Änderungen in Bezug auf Wohn- und Arbeitsort vornehmen werden, aber einige Ziele, wie z. B. Einkaufen, Freizeit und andere private Zwecke, sowie das Verkehrsmodus des Reisens kurzfristig ändern werden. Der Kauf von Elektrofahrzeugen ist in unserem Szenario ebenfalls ausgeschlossen, da der Fahrzeugkauf eine mittelfristige bis langfristige Entscheidung ist. Basierend auf den Annahmen erwarten wir die folgenden Ergebnisse:

- Personen, die außerhalb der Umweltzonen leben und kein Elektrofahrzeug in Haushalt haben, werden einen anderen Ort für freiwillige Aktivitäten wählen, wenn ihre ursprünglichen Aktivitäten innerhalb der Umweltzonen liegen.
- Personen, die außerhalb der Umweltzonen leben und kein Elektrofahrzeug in ihrem Haushalt haben, werden ohne Auto in die Umweltzonen reisen.
- Personen, die außerhalb der Umweltzonen leben und Elektrofahrzeuge in ihrem Haushalt haben, sollten nicht so stark betroffen sein; nur Haushaltsmitglieder, die keinen Zugang zu ihren Elektrofahrzeugen haben, werden betroffen sein.
- Personen, die innerhalb der Umweltzonen leben, werden ihr Reiseverhalten beibehalten, unabhängig davon, ob sie Elektrofahrzeuge haben oder nicht.

Für die Umsetzung dieses Szenarios wurden mehrere Weiterentwicklungen im ABIT-Modell aufgenommen. Zunächst wurde der Besitz eines Elektrofahrzeugs zum synthetischen Haushalt hinzugefügt. Des Weiteren werden die Logsum der Verkehrsmittelwahl berechnet, um den Zielortwechsel zu ermöglichen. Die Logsum der Verkehrsmittelwahl kann als multimodale Erreichbarkeit zwischen den Zonen verstanden werden. Der Vorteil der Verwendung der Logsum der Verkehrsmittelwahl besteht darin, dass sie den Nutzen des Reisens zwischen den Zonen widerspiegeln kann, indem alle Verkehrsmittel anstatt nur eines einzelnen Verkehrsmittels berücksichtigt werden. Es gibt zwei Logsum der Verkehrsmittelwahl für jeden Aktivitätszweck: einer ist für Personen in Haushalten mit Elektrofahrzeugen und der andere ist ohne Elektrofahrzeuge. Die Logsum der Verkehrsmittelwahl für Personen in Haushalten ohne Elektrofahrzeuge berücksichtigt nicht den Nutzen von Autofahrer- und Beifahrermodi. Personen, die in die Umweltzonen reisen, prüfen im Fahrzeugzuweisungsmodell, ob ein Elektrofahrzeug verfügbar ist. Wenn ja, berücksichtigen die Personen die Autofahrer- und Beifahrermodi im Verkehrsmittelwahlmodell. Andernfalls wird die Autonutzung im Verkehrsmittelwahlmodell ignoriert. Wir haben Änderungen am ABIT-Modell vorgenommen und einen neuen Aktivitäts-Reiseplan für die Simulation erstellt.

Parkhaus

Das Parkhauszenario zielt darauf ab, den Platz für das Parken auf der Straße in einem bestimmten Bereich einzuschränken und parkende Fahrzeuge in öffentliche Parkhäuser abseits der Straße umzuleiten, um den Straßenraum für die öffentliche Nutzung freizugeben. Dies wurde vom AQT-Cluster des MCube-Projekts untersucht und erprobt. Für diese Modellierungsstudie haben wir das Parkhaus-Szenario mit dem AQT-Projekt besprochen und möchten die Richtlinie auf einen größeren räumlichen Maßstab ausweiten und die Auswirkungen einer solchen Richtlinie auf das kurzfristige Reiseverhalten der Menschen untersuchen.

Aufgrund der Versorgung mit Parkplätzen abseits der Straßen haben wir uns entschieden, die Parkbeschränkung in den in der folgenden Abbildung dargestellten Zonen umzusetzen. Diese liegen

überwiegend in der Altstadt (ausgenommen Bereiche mit Park-and-Ride-Anlagen) und im Umkreis von 500 Metern.

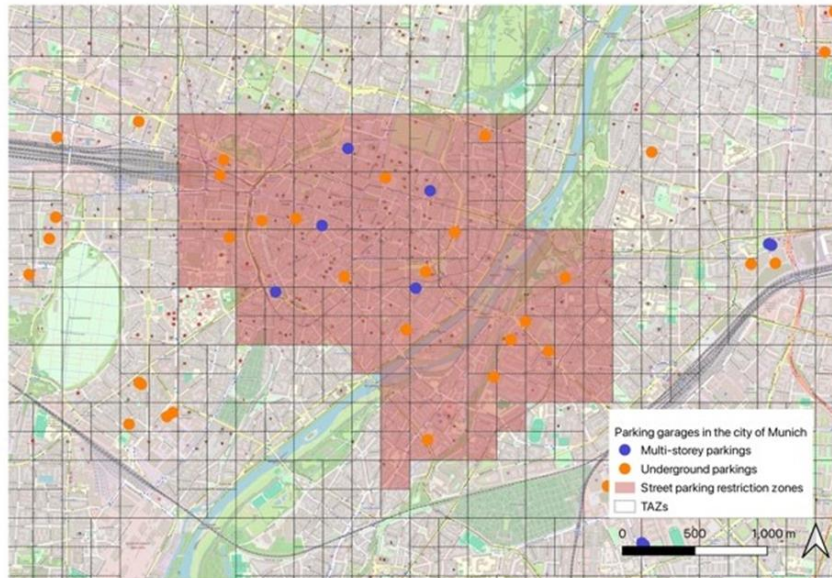


Abbildung 8: Visualisierung der Parkbeschränkung und der Parkgaragen in der Stadt München.

Die Parkbeschränkungsrichtlinie wird in den folgenden Szenarien umgesetzt:

- Besucher müssen ihre Fahrzeuge auf Parkplätzen abseits der Straße mit zusätzlicher Ein- und Ausfahrtszeit abstellen, jedoch kostenlos. [Zusätzliche Zeit für Besucher]
- Nicht nur Besucher, auch Anwohner mit mehr als zwei Autos im Haushalt müssen ihr zweites und weiteres Fahrzeug auf Parkplätzen abseits der Straße mit zusätzlicher Ein- und Ausfahrtszeit abstellen. [Alle zusätzlichen Zeiten]
- Sowohl Besucher als auch Anwohner, die auf öffentlichen Parkplätzen abseits der Straße parken müssen, müssen zusätzliche Parkgebühren zahlen. [Alle zusätzlichen Zeiten und Kosten]
- Es ist dasselbe wie Szenario 3, aber Besucher und Anwohner in Haushalten mit geringerem Einkommen erhalten Zuschüsse zur Deckung der Parkkosten und können ohne Parkgebühren parken. [Kostenzuschuss]

Für dieses Szenario interessieren uns die kurzfristigen Entscheidungen der Menschen beim Reisen, insbesondere die Wahl des Verkehrsmittels. Wir gingen davon aus, dass die Menschen ihr Leben lang keine Änderungen in Bezug auf Aktivitätsgenerierung, Wohn- und Aktivitätsstandorte, Abfahrtszeit usw. vornehmen würden. Allerdings könnten die Menschen ihr Verkehrsmittel aufgrund längerer Reisezeit und höherer Kosten ändern. Um die Simulation zu vereinfachen, gehen wir von folgenden Annahmen aus:

- Die verlängerte Ein- und Ausfahrtszeit ist eine zufällige Verteilung zwischen 0 und 10 Minuten.
- Die Parkgebühr beträgt 2,5 Euro pro Stunde in allen ausgewählten öffentlichen Parkhäusern abseits der Straße.

Basierend auf diesen Annahmen erwarten wir folgende Ergebnisse:

- Einwohner, die von und zu den Parkverbotszonen reisen, und Besucher, die in die Parkverbotszonen reisen, würden aufgrund der längeren Reisezeit ein anderes Verkehrsmittel als das Auto wählen.
- Die Reisekosten könnten sich auf Einwohner und Besucher unterschiedlich auswirken: Für Besucher könnten Parkgebühren zu einer Beeinträchtigung des Autoverkehrs führen. Parkgebühren könnten Einwohner dazu ermutigen, ihr Auto zu benutzen, wenn es etwas Geld kosten würde, es stehen zu lassen, insbesondere für Haushalte mit mehr als zwei Autos.
- Durch die Subventionierung von Parkgebühren für Haushalte mit niedrigem Einkommen kann deren längere Reisezeit und Kostenbelastung im Vergleich zum Basisszenario kontrolliert werden.

Zusätzlich zu den oben genannten Szenarien wurde der Aktivitäts- und Reiseplan auch SASIM, MGeM, COMFFICIENTSHARE und einigen DoktorandInnen im Rahmen des MCube-Projekts für ihre eigenen Anwendungen zur Verfügung gestellt. Die Entwicklung und die Ergebnisse des ABIT-Modells bieten den Partnern des gesamten MCube-Clusters zahlreiche Analysemöglichkeiten.

AP 5.3 - Simulation der Szenarien und Berechnung der Bewertungsindikatoren

Aufgrund der langen Laufzeit der großflächigen Verkehrssimulation haben wir 10% der Verkehrsnachfrage simuliert. Gleichzeitig haben wir die Parameter in der Gesamtsimulation angepasst, um die Plausibilität der Simulation sicherzustellen. Für jedes Szenario sind etwa 8 bis 10 Stunden Laufzeit erforderlich, insgesamt also etwa 80 Stunden. Nach Abschluss der Simulationen wurden die Ergebnisse der Verkehrssimulation zur Berechnung von Indikatoren für AP 6 verwendet.

AP 5.4 - Training der KI-Modelle

Die KI-Pipeline wurde auf eine Simulation zur Abschätzung der Ladesäulennutzung für verschiedene Ladesäulenplatzierung angewandt. Dabei ist es möglich den Energieverbrauch einzelner Ladesäulen, Zonen sowie des gesamten Simulationsbereichs zu prognostizieren. Die KI-Pipeline kann dazu genutzt werden den Energieverbrauch künstlicher Ladesäulenplatzierungen mittels unterschiedlicher KI-Modelle zu prognostizieren. Zusätzlich wurde auch die Prognose von Verkehrsflüssen implementiert und evaluiert. Da die Simulationsdurchläufe nicht rechtzeitig abgeschlossen wurden, konnte die KI-Pipeline nur auf Beispielszenarien getestet werden.

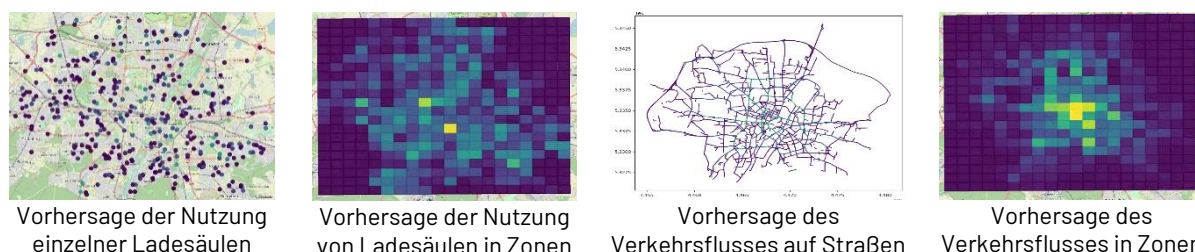


Abbildung 9: Visualisierung der Vorhersagen der KI-Pipeline zur Abschätzung der Ladesäulennutzung und des Verkehrsflusses.

AP 5.5 - Anwendung der KI-Methoden

Da die Simulationsdurchläufe verschiedener Szenarien für unterschiedliche Mobilitätsinnovationen nicht rechtzeitig beendet wurden, und eine erklärbare KI somit nicht getestet werden konnte, wurden die verbleibenden PMs in die Entwicklung und Evaluierung einer structured learning Pipeline übertragen, um die Vorhersagegenauigkeit der entwickelten KI-Pipeline weiter zu verbessern. Die structured learning Pipeline setzt sich aus einem machine learning layer und einem combinatorial optimization layer zusammen. Der machine learning layer lernt die Parametrisierung des combinatorial optimization layers. Der combinatorial optimization layer löst ein Optimierungsproblem, wie bspw. ein traffic assignment problem und kann so bspw. den Verkehrsfluss prognostizieren.



Abbildung 10: Schematische Darstellung einer structured learning pipeline.

Eine structured learning pipeline hat den Vorteil gegenüber konventionellen Ansätzen aus dem Bereich Machine Learning, dass der Vorhersageraum nur aus realisierbaren Lösungen des Optimierungsproblems besteht. Das heißt, die structured learning pipeline kann nur realistische, zusammenhängende Verkehrsflüsse prognostizieren. Die neuartige structured learning Pipeline wurde auf verschiedenen

Simulationsumgebungen getestet. Dafür wurden einfache Beispielszenarien implementiert, um das Verhalten herkömmlicher KI-Methoden mit der structured learning Pipeline zu vergleichen. Erste Versuche zeigten, dass diese structured learning Pipeline die Prognosegenauigkeit der state-of-the-art Methoden aus der klassischen Optimierung und Machine Learning übertrifft. Die folgende Abbildung zeigt, dass die prognostizierten Verkehrsflussdaten von der structured learning Pipeline und die tatsächlichen Verkehrsflussdaten besonders stark korrelieren, wohingegen die prognostizierten Verkehrsflussdaten klassischer KI-Pipelines vor allem für hohe tatsächliche Verkehrsflüsse kaum korrelieren.

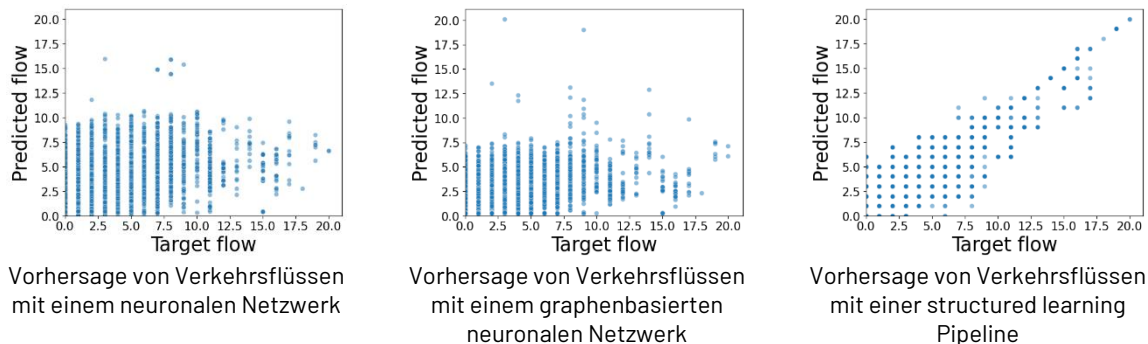


Abbildung 11: Korrelation zwischen den tatsächlichen Verkehrsflüssen und den prognostizierten Verkehrsflüssen für verschiedene KI-Pipelines.

Zudem ermöglicht die Prognose mittels der structured learning Pipeline die Prognose realistischer Verkehrsflüsse. Die folgende Abbildung veranschaulicht, dass die structured learning Pipeline Verkehrsflüsse abbilden kann, die hohe Übereinstimmungen mit dem tatsächlichen Verkehrsfluss haben, wohingegen das neuronale Netzwerk die zusammenhängenden Verkehrsflüsse nicht abbilden kann.



Abbildung 12: Visualisierung der Prognose von Verkehrsflüssen mittels eines neuronalen Netzwerkes und einer structured learning Pipeline.

Die structured learning Pipeline steht der Öffentlichkeit via Git zur Verfügung¹⁴. Das dazugehörige Paper "WardropNet: Traffic Flow Predictions via Equilibrium Learning" steht der Öffentlichkeit ebenso zur Verfügung¹⁵.

AP 6 – Bewerteter Maßnahmenkatalog

Ziel von AP 6 war das Zusammentragen der Simulationsergebnisse sowie die Aufbereitung von Handlungsempfehlungen, Maßnahmen und den wichtigsten Learnings an denen sich zukünftige Projekte orientieren können.

AP 6. 1 – Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

¹⁴ <https://github.com/tumBAIS/ML-CO-pipeline-TrafficPrediction>

¹⁵ <https://openreview.net/forum?id=7FHSPd3SRE>

Die Entwicklung eines umfassenden Maßnahmenkatalogs für verkehrspolitische Strategien erfordert eine systematische Sammlung und Bewertung potenzieller Maßnahmen. Durch gezielte Umfragen und Konsultationen innerhalb der M-Cube-Projektlandschaft können Best Practices und innovative Ansätze identifiziert werden, die dann in ein gesamtheitliches Simulationsmodell integriert werden.

Ausgehend von den Daten und Erkenntnissen der Arbeitspakete 5.2 und 5.3 wurden eine Reihe von Indikatoren entwickelt und zusammengeführt, die die Mobilitätsdynamiken und Erreichbarkeitsmuster im Untersuchungsgebiet abbilden. Dieser Abschnitt präsentiert ausgewählte Analysen als Beispiel, um die Anwendbarkeit und Aussagekraft der generierten Indikatoren zu verdeutlichen. Eine umfassende Darstellung der Methoden, Indikatoren und ihrer Interpretation sowie weiterführende Analysen befindet sich im Whitepaper.

1. **Logsum Erreichbarkeit:** Die Logsum können als eine allgemeine Mühelosigkeit des Reisens von jeder Zone zu den anderen Zonen unter Berücksichtigung der multimodalen Reisezeit und -kosten verstanden werden. Im Gegensatz zu anderen gängigen Erreichbarkeitsindikatoren berücksichtigen die zonalen Logsum keine unterschiedlichen Arten von Attraktionen und Zielen in jeder Zone und erfassen nur die multimodalen Reisemöglichkeiten und -impedanzen für allgemeine Zwecke. Wie die nächsten beiden Abbildungen zeigen, weisen Zonen in der Stadt München im Vergleich zu den anderen Zonen in der Außenregion hohe Erreichbarkeitswerte auf. Dies liegt daran, dass diese Zonen im Zentrum des Untersuchungsgebiets liegen und auch über eine bessere öffentliche Verkehrsanbindung verfügen.

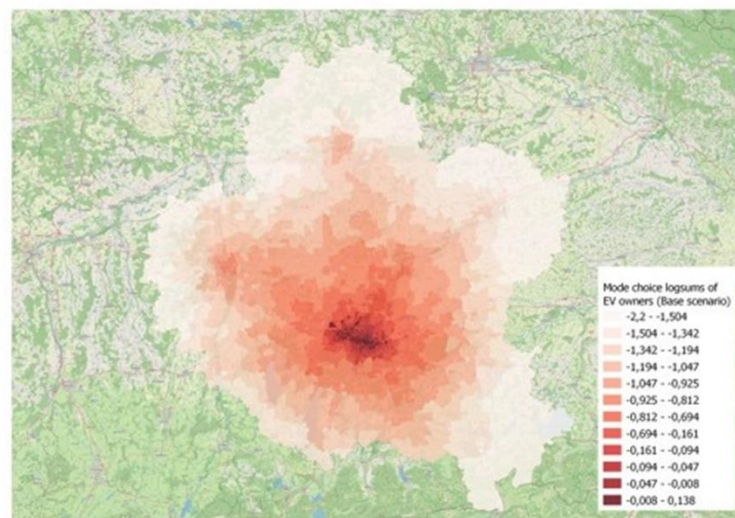


Abbildung 13: Logsum Erreichbarkeit in München.

2. **Modal Split:** Die folgende Tabelle zeigt den Verkehrsmittelanteil des Basisszenarios und die Veränderung des Verkehrsmittelanteils in Prozentpunkten zwischen allen LEZ-Szenarien. Im Allgemeinen ist die Reduzierung der Autoverkehrsarten (Autofahrer und Autopassagier) nicht offensichtlich, da die LEZ flächenmäßig im Vergleich zum gesamten Untersuchungsgebiet klein sind. Die Auswirkungen auf den Verkehrsmittelwechsel werden gemittelt, wenn wir den Modal Split auf aggregierter Ebene betrachten.

Verkehrsmittel	Veränderung in Prozentpunkten			
	Basis	Mittlerer Ring	Bahn-Ring	Altstadt-Ring
Autofahrer	44,55%	-2,31%	-2,55%	-0,36%
Auto-Passagiere	13,89%	-1,02%	-1,10%	-0,19%
Bahn	7,46%	0,54%	0,69%	-0,02%
U-Bahn-Tram	7,79%	1,29%	1,15%	0,10%
Bus	3,54%	0,45%	0,48%	0,09%
Fahrrad	11,29%	0,80%	0,83%	0,16%
Zu Fuß	11,47%	0,25%	0,52%	0,22%

Tabelle 4: Veränderung des Verkehrsmittelanteils für die unterschiedlichen LEZ-Szenarien

3. **Tägliches Verkehrsaufkommen:** Die folgende Abbildung zeigt die Beziehung zwischen Verkehrsaufkommen und Kapazität des Untersuchungsgebiets. Je dunkler die Farbe, desto stärker sind die Verkehrsverbindungen überlastet. Im Basisszenario treten Staus vor allem auf der Autobahn und den wichtigen Verkehrsverbindungen im Stadtzentrum auf. Als die Umweltzone im Szenario Mittlerer Ring und Bahn Ring eingeführt wurde, wurden die Staus im Stadtzentrum aufgrund der Fahrbeschränkungen teilweise beseitigt. Die Staus außerhalb der Stadt blieben größtenteils unverändert. Im Szenario Altstadttring ist die Staureduzierung nicht offensichtlich, da der räumliche Maßstab klein ist und keine ausreichenden Auswirkungen auf den Autoverkehr hat.



Abbildung 15: Darstellung des simulierten Verkehrsaufkommens in München.

4. **PM2.5-Emissionen:** Die folgenden Abbildungen zeigen die stündlichen verkehrsbedingten PM2,5-Emissionen auf der Straße. Da die verkehrsbedingten PM2,5-Emissionen stark mit dem Verkehrsaufkommen und der Reisegeschwindigkeit korrelieren, ähnelt die Visualisierung der Konzentration der PM2,5-Emissionen denen des Verkehrsaufkommens. Bitte beachten Sie, dass die Abbildung nur die durch den Verkehr verursachten PM2,5-Emissionen zeigt und die Luftdynamik nicht berücksichtigt wird. Die Abbildung für das Basisszenario zeigt die Konzentration von PM2,5 ohne politische Maßnahmen. Die PM2,5-Emissionen im Mittleren Ring und im Bahnring wurden offensichtlich aufgrund der Verringerung des Autoverkehrs in die Innenstadt reduziert. Im Altstadttring verringerten sich die PM2,5-Emissionen jedoch aufgrund der geringen Umsetzungsfläche nicht so stark.

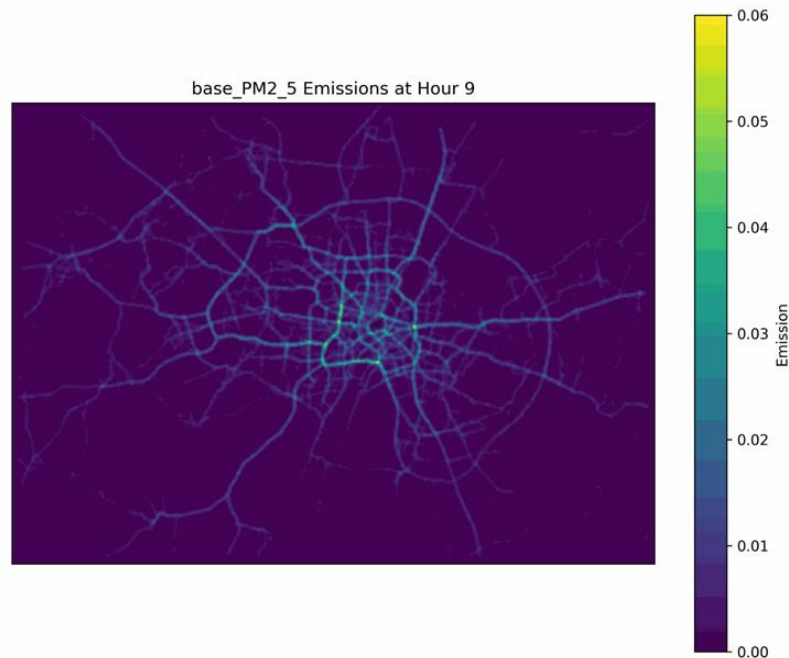


Abbildung 15: Darstellung der simulierten PM2.5 Emission in München.

Die oben genannten Indikatoren zeigen, wie das ABIT-Modell und die Gesamtsimulation für die Szenarioanalyse verwendet werden können. Zur Unterstützung politischer Entscheidungen müsste ein klarer definiertes Indikatorensystem entwickelt werden. Der agentenbasierte Ansatz bietet jedoch die Flexibilität, Indikatoren einfach zu aggregieren, um traditionelle Bewertung der Maßnahmen, wie die Kosten-Nutzen-Analyse, zu unterstützen.

AP 6.2 - Finalisierung der quantifizierten Bewertungsmethodik zur Bewertung der Maßnahmen

Zur Bewertung der Maßnahmen müssen aus der Gesamtsimulationsmodell KPIs abgeleitet werden. Die folgenden KPIs wurden u.a. in das Gesamtsimulationsmodell implementiert:

- Dimensionen des Raums: Flächeneffizienz, Systemnutzung, Zugang zu Verkehrsangeboten
- Dimensionen der Zeit: Reisezeit, Reisedistanz, Verkehrsaufkommen, Verkehrsfluss
- Dimensionen der Luft: Emissionen (CO₂, NO_x, PM, Lärm), Energieeffizienz

Die KPIs werden automatisch für ein simuliertes Szenario wahlweise in mikroskopische oder makroskopischer Detailgüte berechnet und ermöglichen den Vergleich verschiedener Szenarien und Maßnahmen entsprechend der Maßstäbe Raum, Zeit, und Luft. Eine ausführlichere Beschreibung ist im veröffentlichten White-Paper¹⁶ zu finden.

AP 6.3 - Untersuchung kausaler Zusammenhänge zwischen Maßnahmen und Bewertungsindikatoren

Wie in AP 5.5 beschrieben, konnten die kausalen Zusammenhänge aufgrund fehlender Simulationsdaten nicht untersucht werden. Die verbleibenden PMs wurden in die Entwicklung der Structured Learning Pipeline zur Prognose von Verkehrsflüssen übertragen. Die Ergebnisse wurden in der Veröffentlichung "WardropNet: Traffic Flow Predictions via Equilibrium Learning" zur Verfügung gestellt.

AP 6.4 - Machbarkeitsanalyse der Maßnahmen

Spezifische Maßnahmen und deren technische Machbarkeitsanalyse für gängige Mobilitätsinnovationen zur Verbesserung des Raums, der Zeit oder der Luft sind ausführlich im veröffentlichten White-Paper diskutiert und der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Die Diskussion beinhaltet ebenfalls einen Bezug

¹⁶ <https://datenhub.mcube-cluster.de/records/5xdgh-n9e97>

auf die zur Evaluation der Innovationen notwendigen Indikatoren and deren Metriken, welche vorgehend mittels Simulationsmodelle ermittelt werden müssen.

AP 6.5 – Ausarbeitung des Maßnahmenkatalogs mit Handlungsempfehlungen

In der ursprünglichen Vorhabensbeschreibung war in AP6.5 die Ausarbeitung eines Maßnahmenkatalogs mit Handlungsempfehlungen vorgesehen. Aufgrund des Verlaufs von DatSim und den fehlenden Simulationsergebnissen verschiedener Mobilitätsinnovationen wurde AP6.5 umstrukturiert. Der Fokus von AP6.5 wurde dahingehend angepasst, dass in AP6.5 ein Proof-of-Concept ausgearbeitet wurde, der die Evaluation von Mobilitätsinnovationen beispielhaft mittels der Gesamtsimulation und eines Fragebogens durchführt. Zum einen, wird das Gesamtsimulationsmodell vorgestellt und die jeweiligen KPIs zur Bewertung der Maßnahme, die aus dem Gesamtsimulationsmodell abgeleitet werden können, beschrieben. Zum anderen, wird ein Fragebogen vorgestellt, und die Vorteile eines Fragebogens und die Vorteile der Gesamtsimulation zur Evaluation von Mobilitätsinnovationen diskutiert. Zudem werden Ergebnisse der Gesamtsimulation und einer Umfrage basierend auf dem Fragebogen beispielhaft vorgestellt. Des Weiteren, wird die Evaluation von Mobilitätsinnovationen durch Simulationsmodelle kritisch beleuchtet. Der in AP6.5 ausgearbeitete Proof-of-Concept sowie die beispielhaften Ergebnisse aus der Gesamtsimulation und dem Fragebogen wurden in Form von einem White-Paper der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt ¹⁷.

AP 7 – Demonstrator und Bevölkerungspartizipation:

Ziel von AP 7 war die Erstellung eines Exponats als interaktives Informations- und Vermittlungstool und dessen Ausstellung im Deutschen Museum.

AP 7.1 – Erarbeitung eines Konzepts für das Exponat

Um ein finales Konzept für die Ausstellung im Deutschen Museum zu erarbeiten, wurden am FTM mehrere prototypische Anwendungen implementiert und evaluiert. Dazu wurde ungefähr in der Mitte der Phase I eine initiale Umfrage unter allen Projekten durchgeführt. Diese beinhalteten Fragen zu bereits erzielten, aber auch zu angestrebten Projektergebnissen. Basierend auf zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Ergebnissen aber auch beschreibenden Daten wurden in Zusammenarbeit mit den Kuratoren und Kuratorinnen des Deutschen Museums unterschiedliche Konzepte zum User Interface des Datentisches erstellt und umgesetzt. Zentral war hierbei der Gedanke, dass mehrere Personen gleichzeitig aktiv sein können. Die verschiedenen Konzepte wurden in einer Nutzerstudie evaluiert und das Beste davon ausgewählt. Das technische Konzept besteht aus einem Backend und dem Frontend. Die Daten werden in einer SQL-Datenbank gespeichert und sind so jederzeit leicht zugänglich und auch leicht zu updaten. Das Frontend läuft auf dem Datentisch selbst und stellt die zur Verfügung stehenden Daten dar. Diese erste Version des Datentisches wurde auf der *IAA Mobility 2023* sowie auf dem *TUM Sustainability Day 2024* ausgestellt. In diesem Rahmen bestand, über die dedizierte Befragung hinaus, die Möglichkeit für direktes Feedback der Nutzer:innengruppe. Die Daten und Erfahrungen aus dieser Konzeptphase stellten dann den Ausgangspunkt für die Konzeptionierung des finalen Exponats unter Führung des Deutschen Museums dar.

¹⁷ <https://datenhub.mcube-cluster.de/records/5xdgh-n9e97>

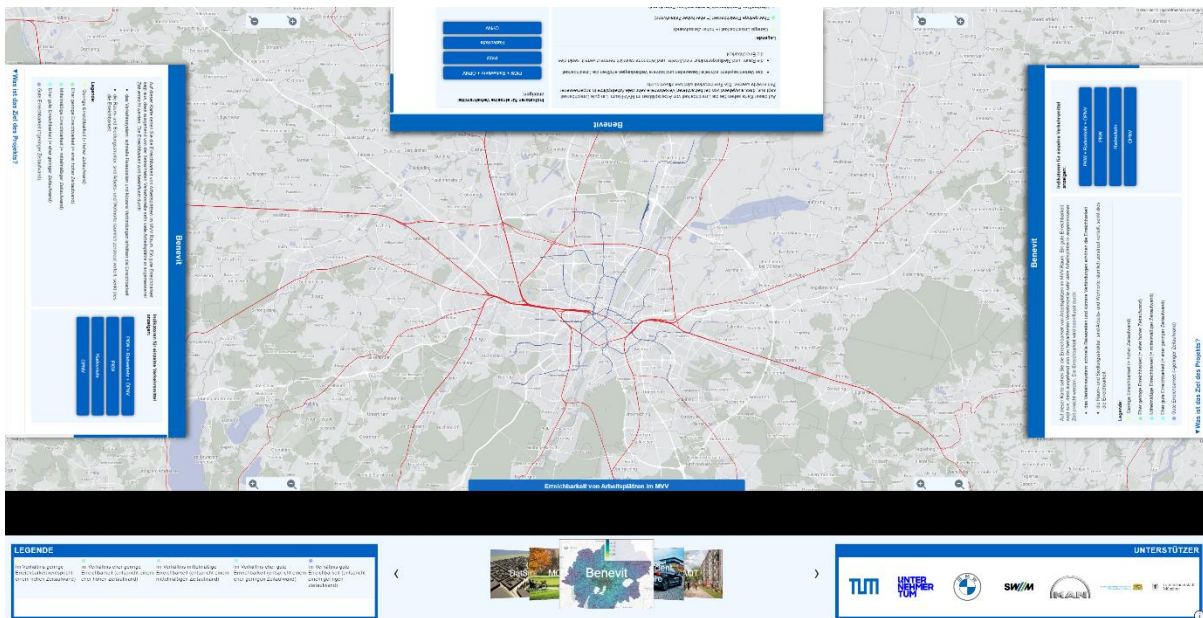


Abbildung 16: Layout des Datentischs für die IAA

AP 7.2 - Technische Realisierung des Exponats

Die in DatSim entwickelten Ergebnisse wurden so aufbereitet, damit sie in einem Demonstrator visualisiert werden können. So kann die KI-Pipeline Vorhersagen und Sensitivitätsanalysen für zukünftiger Mobilitätsinnovationen in einem Demonstrator effizient auswerten und visualisieren.

Die Standardausgabedateien des ABIT-Modells sind eine Liste der Aktivitäten und Fahrten aller synthetischen Agenten im Untersuchungsgebiet über eine ganze Woche hinweg. Die Daten werden in einem gemeinsam nutzbaren Format, einem CSV-Format, gespeichert. Die Daten können problemlos weitergegeben und zu Demonstrationszwecken verwendet werden.

Zur Kommunikation wurden die Projekte dazu angehalten, ihre öffentlichen Präsentationen und Poster zu verschiedenen M Cube Veranstaltungen auf den Datenhub zu legen. Diese können dann durch einen einfachen Webquery übersichtlich abgerufen werden. Ein solcher Link kann als QR-Code verteilt werden und zeigt eine Sammlung an zusammengefassten und verständlichen M Cube Inhalten. Die Liste ist abrufbar im Datenhub abrufbar¹⁸.

Es wurde außerdem eine Feedbackschnittstelle implementiert. Hierfür wurde ein intern gehosteter Limesurvey verwendet. Auf diesen wird durch einen QR-Code, der auf dem Datentisch angebracht werden kann, verwiesen. Umfragen mit unterschiedlicher Komplexität und Umfang können mithilfe von Limesurvey so innerhalb eines gleichbleibenden technischen Rahmens je nach Bedarf mit geringem Aufwand realisiert werden. Zunächst wurde die Möglichkeit für freie Rückmeldung implementiert. Die Daten dieser Umfrage können dann durch einen extra implementierten und gehosteten Service durch die Limesurvey API abgefragt, aggregiert und anschließend über die Datenhub API wieder hochgeladen werden. Hier werden sie zur Kuratation als Entwurf eines neuen Datensatzes gespeichert. Die zugehörigen Metadaten werden automatisch ausgefüllt. Die verantwortliche Person kann diesen Entwurf dann unkompliziert zur Veröffentlichung freigeben.

AP 7.3 - Ausstellungsbetreuung und Begleitung der Bevölkerungspartizipation

Die umgesetzten technischen Lösungen (s. AP 7.2) werden fortlaufend betreut und den Anforderungen des Deutschen Museums angepasst.

¹⁸ https://datenhub.mcube-cluster.de/search?q=&f=resource_type%3Apresentation&f=access_status%3Aopen&f=resource_type%3Aposter&l=list&p=1&s=10&sort=newest

3. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der erzielten Ergebnisse

Zunächst ist unter diesem Aspekt die Weiterführung des Projekts in einem neuen Konsortium und neuen Forschungsschwerpunkten zu nennen. Dabei werden die in Förderphase 1 erlangten Erkenntnisse und Erfahrungen einen signifikanten Beitrag zur Erreichung der Ziele in Phase 2 leisten. In diesem Kontext ist vor allem das in Phase 1 entwickelte Simulationsmodell (Gesamtsimulationsmodell) zu erwähnen. Wie in Abschnitt 2 detailliert dargestellt ist es dabei gelungen, makro- und mesoskopische Simulationsmodelle zu koppeln. So entsteht die Möglichkeit, räumlich große Betrachtungsräume (bspw. eine ganze Metropolstadt wie München) mit hohem Detailgrad in überschaubarer Rechenzeit zu simulieren. Das Potential dieser Simulation bei der Bewertung von Änderungen im Mobilitätssystem wurde bereits in Phase 1 demonstriert und wird in Phase 2 weiter Anwendung finden, beispielsweise bei der Analyse von Rettungsfahrzeugen bzw. der Auswirkung der genannten Änderungen auf deren Ausrückzeiten. Das entwickelte Modell ABIT wird in unterschiedlichen Anwendungsfällen als Grundlage von Simulationen verwendet und stellt somit die Basis vielfältiger den Verkehr betreffender Simulationen dar. ABIT ist open-source zugänglich.¹⁹

4. Der während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Seiten

Während der Vorhabensdurchführung sind keine Fortschritte bekannt geworden, die die konkreten Ziele von DatSim betreffen. Zu erwähnen sind verschiedene proprietäre (z.B. confluence) und open-source (z.B. DSpace) Angebote im Bereich des Daten- und Wissensmanagements, welche kontinuierlicher Weiterentwicklung unterliegen. Auch bzgl. der Sammlung georeferenzierter Daten wächst das Angebot andauernd, beispielsweise in der sog. Mobilithek²⁰. Im Bereich der Simulation ist vor allem der Digitale Zwilling München (DZ-M)²¹ zu nennen, der ein ähnliches Ziel wie die in DatSim entwickelte Gesamtsimulation verfolgt. Der DZ-M wird Teil des Folgeprojekts DatSim in Phase 2 sein, wodurch Synergien maximiert werden.

5. Die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NABF

- Moeckel, R., Huang, W., Ji, J., Llorca, C., Moreno, A., Staves, C., Zhang, Q., Erhardt, G. (2025). The Activity-based model ABIT: Modeling 24 hours, 7 days a week. *Transportation Research Procedia* 78, 2024, 499-506.
- Jungel, K., Paccagnan, D., Parmentier, A., Schiffer, M. (2025). WardropNet: Traffic Flow Predictions via Equilibrium-Augmented Learning. In *The Thirteenth International Conference on Learning Representations*.
- Schweizer, J., Schuhmann, F., Poliziani, C. (2024). hybridPy: The Simulation Suite for Mesoscopic and Microscopic Traffic Simulations. In *SUMO Conference Proceedings*, Vol. 5, pp. 39-55, TIB Open Publishing.
- Schuhmann, F., Netzler, F. (2023). The Integration of SUMO within a Data Hub and a Simulation Testbed for the City of Munich. Overview of the project MCube "DatSim", *SUMO User Conference 2023*, Berlin.
- Schuhmann, F. (2024). The Integration of SUMO into a Cluster-wide Simulation Pipeline for Mobility Innovations. *SUMO User Conference 2024*, Berlin.
- Schuhmann, F., Schweizer, J., Wiggerhauser, C., Netzler, F., Lienkamp, M. (2024). hybridPY: A Hybrid Traffic Simulation Case Study for Munich. *MATSim User Meeting 2024*, Helsinki.

¹⁹ <https://www.mos.ed.tum.de/tb/forschung/models/travel-demand/abit/>

²⁰ <https://mobilithek.info/>

²¹ <https://muenchen.digital/projekte/digitaler-zwilling.html>

- Schuhmann, F., Ngoc, A., Schweizer, J., Huang, W., Lienkamp, M. Creating and Validating Hybrid Large-scale, Multi-modal Traffic Simulations for Efficient Transport Planning. Smart Cities 2025, 8, 2. <https://doi.org/10.3390/>
- Ziegler, H., Netzler, K., Lienkamp, M. (2024). Enhancing Transportation Insights: A Scalable OpenStreetMap Harmonization and Synthesis Framework. IEEE 27th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Edmonton.
- Lindner, J., Sekaran, M., Bogenberger, K. (2023). Exploring ChatGPT as an alternative support tool for SUMO users. SUMO User Conference 2023, Berlin.

6. Zusätzliche Punkte für den Cluster

a) Beitrag des Einzelprojektes zur MCube-Gesamtstrategie bzw. welchen Nutzen der Cluster aus deinem Einzelprojekt zieht (Verbesserung der Qualität von Zeit, Raum und Luft)

Durch den digitalen Charakter des Projekts DatSim werden die drei Zieldimensionen nicht direkt beeinflusst. Die entwickelten Methoden, insb. die Simulation, stellen jedoch Möglichkeiten bereit, die genannten Indikatoren Zeit, Raum und Luft quantitativ zu bewerten. So leistet die Simulation einen wertvollen Beitrag zur Planung, Entscheidung und Umsetzung von Maßnahmen, die die Zielgrößen wiederum direkt umsetzen. Als Beispiele, anhand derer das Potential gezeigt wird, können die simulierten und entsprechend der Zielgrößen bewerteten Szenarien genannt werden. Während das Szenario „Low Emission Zones“ eine Verbesserung der Qualität der Luft bewertet, können im Parkhaus-Szenario die Auswirkungen einer Maßnahme zur Neuverteilung des urbanen Raums analysiert und verstanden werden. Durch unterschiedliche Indikatoren werden die Zieldimensionen repräsentiert (Beispielsweise Zeit: Erreichbarkeit, Luft: PM, Raum: anteiliges Verkehrsaufkommen). Durch den partizipativen Ansatz, umgesetzt durch die Ausstellung im Deutschen Museum, können dementsprechende vielfältige Maßnahmen veranschaulicht und so auch deren Akzeptanz gesteigert werden.

b) Projektübergreifende Zusammenarbeit innerhalb des Clusters

Im Rahmen des Demonstrators wurden alle Projekte eingeladen, ihre jeweiligen Inhalte bzw. Ergebnisse interaktiv auf dem Datentisch darzustellen. Zu diesem Zweck erfolgte zunächst eine Umfrage unter den Projekten²² und dann ein offener Workshop²³, in dem das entwickelte Framework und die Möglichkeiten der Zusammenarbeit vorgestellt wurden. Dieser Einladung sind die Projekte BeneVit, ComfficientShare, AQT, TrEx, Sasim, MGEM, STEAM und Wiesn' Shuttle gefolgt. Mit allen genannten Projekten wurden individuelle Abstimmungstermine abgehalten und die zur Verfügung stehenden Daten visualisiert.

Das Gesamtsimulationsmodell und das zugrundeliegende Modell ABIT²⁴ wurden ebenfalls allen Projekten im Rahmen offener Präsentationen offengelegt²⁵. Darauf aufbauend entstanden zusammenarbeiten zwischen Doktorand:innen aus verschiedenen Projekten sowie Kooperationen mit den M Cube Projekten SASIM, MGEM und COMFFICIENTSHARE. Gleiches gilt für den Datenhub, der den Projekten ebenfalls durch ein Webinar präsentiert wurde²⁶.

Durch das Projekt SUE wurden die Projektergebnisse evaluiert und ein Indikatorenkatalog erstellt (s. AP 1.3).

²² <https://datenhub.mcube-cluster.de/records/63xaw-zh283>

²³ <https://datenhub.mcube-cluster.de/records/6jwnj-6xz83>

²⁴ <https://datenhub.mcube-cluster.de/records/n22cd-phm06>

²⁵ <https://datenhub.mcube-cluster.de/records/p1f35-f8355>

²⁶ <https://datenhub.mcube-cluster.de/records/yt3eg-qrn35>