



# roVer

## Leistungsfähigere Verkehrsinfrastrukturen durch robuste Vernetzung

Förderkennzeichen: 13FH669IX6

### S C H L U S S B E R I C H T

Kurzbericht und Eingehende Darstellung

**Zuwendungsempfänger:** Hochschule München, 80335 München

**Ausführende Stelle:** Hochschule München, Fakultät für Informatik und Mathematik  
Lothstraße 64, 80335 München

**Projektleitung:** Prof. Dr. L. Wischhof, Prof. Dr. G. Köster

**Projektlaufzeit:** 01.10.2018 bis 30.9.2023

München, den 28.11.2023

## **INHALT**

Inhalt.....	2
I Kurzdarstellung des Forschungsprojektes .....	3
I.1 Aufgabenstellung .....	3
I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	3
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	4
I.4 Stand von Wissenschaft und Technik, an den angeknüpft wurde .....	4
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	4
II Eingehende Darstellung des Forschungsprojektes .....	5
II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen .....	5
II.1.1 AP 1: Szenarien.....	5
II.1.2 AP 2: Mobilität und Uncertainty Quantification.....	7
II.1.3 AP 3: Kommunikation und adaptive Informationsverbreitung.....	9
II.1.4 AP 4: Kopplung und Integration .....	13
II.1.5 AP 5: Simulationsstudien.....	15
II.1.6 AP 6: Dissemination der Ergebnisse .....	19
II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	21
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	21
II.3.1 Notwendigkeit der geleisteten Arbeit .....	21
II.3.2 Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	22
II.4 Voraussichtlicher Nutzen.....	22
II.4.1 Wissenschaftliche Verbreitung der erzielten Ergebnisse .....	22
II.4.2 Verbesserung der Lehre.....	22
II.4.3 Nutzung im Rahmen der Forschung.....	23
II.4.4 Verwertbarkeit im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans .....	23
II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	23
II.6 Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen .....	24
II.6.1 Erfolgte Veröffentlichungen.....	24
II.6.2 Geplante Veröffentlichungen.....	25
II.6.3 Abschlussarbeiten .....	25
III Erfolgskontrollbericht .....	26
Berichtsblatt.....	27
Literaturverzeichnis .....	28

## I KURZDARSTELLUNG DES FORSCHUNGSPROJEKTES

### I.1 Aufgabenstellung

Das Projekt „Leistungsfähigere Verkehrsinfrastrukturen durch robuste Vernetzung“ (roVer) galt der Zukunftsaufgabe „Intelligente Mobilität“ der vom Bund geförderten Hightech-Strategie zur Gewährleistung der technologischen und wissenschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands und fiel unter das Aktionsfeld „Intelligente und leistungsfähige Verkehrsinfrastruktur“.

Im Projekt roVer sollte konkret die Wechselwirkung zwischen dem Mobilitätsverhalten von Verkehrsteilnehmern und drahtloser Vernetzung untersucht werden. Hintergrund hierfür ist, dass intelligente Fahrzeuge und Verkehrsleitsysteme zunehmend Informationen austauschen, um den Verkehr sicherer, effizienter und umweltfreundlicher zu machen. Dabei ist eine wesentliche Herausforderung, dass drahtlos übertragene Informationen das Verhalten von Verkehrsteilnehmern beeinflussen, was wiederum die Kommunikationsinfrastruktur beeinflusst – im lokalen Überlastfall bis hin zu einem vollständigen Ausfall der Kommunikation, z.B. bei Großereignissen wie dem Hamburger Hafenfest oder in Extremsituationen, wie dem Münchener Attentat im Juli 2016. Anhand charakteristischer Mobilitätsszenarien sollten daher geeignete Verfahren für eine robuste Vernetzung und Informationsverbreitung entwickelt werden.

Hierfür sollten die folgenden Kernziele erreicht werden:

1. **Schaffung eines neuartigen Simulationswerkzeugs** welches Personenstrom- und Mobilfunktumulation koppelt, um die Wechselwirkung von Menschenmengen und drahtloser Vernetzung untersuchen zu können
2. **Untersuchung charakteristischer, multi-modaler Verkehrssituationen** bei denen auch Fußgänger am Verkehr teilnehmen, Mobilitätsinformationen generieren und verbreiten, da diese die Auslastung der Kommunikationsinfrastruktur maßgeblich beeinflussen.
3. **Ableitung neuer Verfahren für die robuste Kommunikation** basierend auf 5G-Kommunikation, wie z.B. direkter Kommunikation der Endgeräte zur Informationsverteilung

### I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt wurde unter der Förderlinie „IngenieurNachwuchs – Kooperative Promotion“ im Rahmen des Programms „Forschung an Fachhochschulen“ vom 24.11.2015 in der Projektlaufzeit vom 01.10.2018 bis zum 30.09.2023 gefördert. Dies beinhaltet bereits eine im August 2022 wegen Corona-bedingten Projektverzögerungen bewilligte kostenneutrale Verlängerung um 12 Monate.

Am Projekt direkt beteiligt waren

- Hochschule München (Projektkoordinator und ausführende Stelle, Zuwendungsempfänger)
- Stadtwerke München GmbH (Projektpartner)
- accu:rate GmbH (Projektpartner)
- Technische Universität München, Lehrstuhl für Connected Mobility und Lehrstuhl für Wissenschaftliches Rechnen (kooperative Promotionen)

Durch die beiden beteiligten Unternehmen aus den Bereichen Personenstromsimulation und ÖPNV verfügte das Projekt über einen hohen Anwendungsbezug und konnte gleich zu Projektbeginn ein geeignetes multi-modales Referenzszenario (S-/U-Bahnhof „Münchener Freiheit“) festlegen. Die hochschulseitig beteiligten Projektpartner verfügen über langjährige Forschungs- und Entwicklungserfahrung in den Bereichen Personenstromsimulation und Mobilfunk. Geeignete Räumlichkeiten, Labore mit experimenteller Mobilfunkhardware sowie die notwendige IT-Infrastruktur waren an der Hochschule München bereits vorhanden, für die Durchführung der äußerst rechenintensiven Simulationen wurde ein zusätzlicher Server im Projektverlauf beschafft.

## I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Durchführung des Projektes erfolgte in zwei Iterationen (Basisszenario, erweitertes Szenario), jeweils in den in Abbildung 1 dargestellten Schritten. Nach der Untersuchung des Basisszenarios wurde dabei gemeinsam mit allen Projektpartnern in 02/21 eine Zwischenevaluation durchgeführt, bei auf Basis der bis dahin vorliegenden Ergebnisse die Detailplanung für die zweite Iteration erfolgte.

Abbildung 2 zeigt den Zeitplan der Arbeitspakete über die komplette Projektlaufzeit. Durch Maßnahmen zum Infektionsschutz während der Corona-Pandemie konnten Messungen im Labor sowie eine Feldstudie mit Studierenden an der Münchener Freiheit nur stark verzögert durchgeführt werden, weshalb 08/21 eine kostenneutrale Verlängerung um zwölf Monate beantragt und genehmigt wurde. Insgesamt konnten alle Projektziele (vergl. I.1) erreicht und die Ergebnisse publiziert werden.

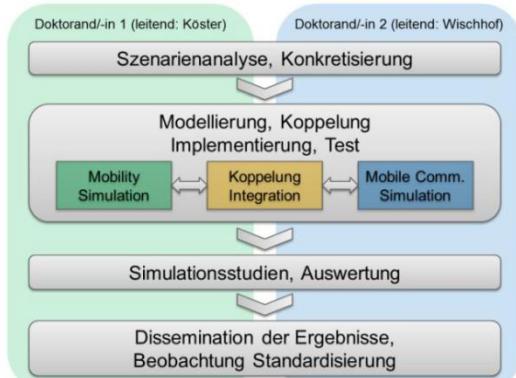


Abbildung 1: Projektphasen (pro Iteration)

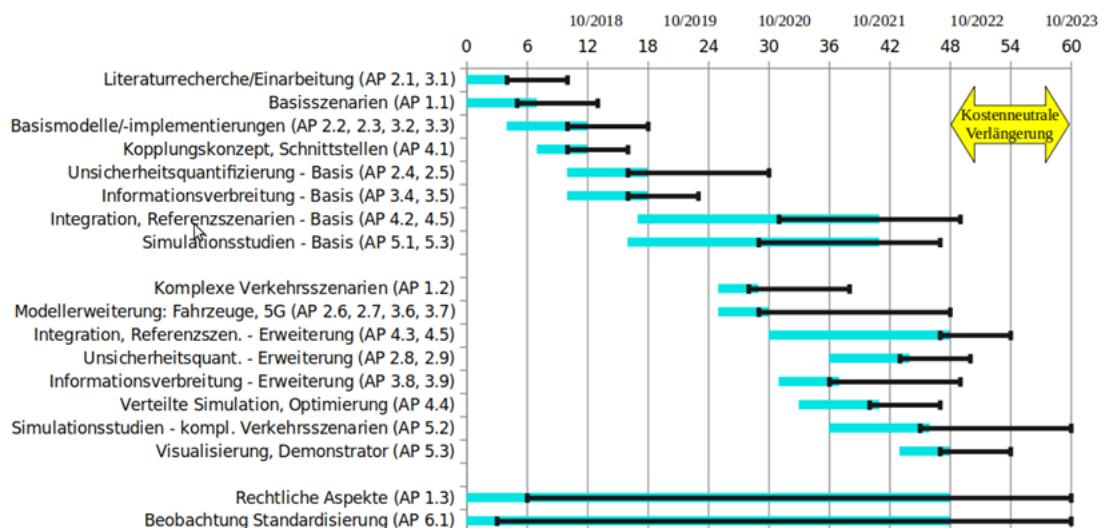


Abbildung 2: Arbeitsfortschritt über die Projektlaufzeit (blau: ursprünglicher Antrag, schwarz: Umsetzung im Projektverlauf). Verzögerungen durch die verspätete Einstellung von Mitarbeiter:innen sowie durch die Corona-Pandemie konnten durch die kostenneutrale Verlängerung ausgeglichen werden.

## I.4 Stand von Wissenschaft und Technik, an den angeknüpft wurde

Die Forschung der Hochschule München konnte auf Erkenntnissen der Vorgängerprojekte (S2UCRE, MultikOSi) und dem dort entwickelten quelloffenen Simulationsframework Vadere aufbauen. Zudem lagen aus mehrjährigen industriefinanzierten Projekten tiefgreifende Erfahrungen mit Mobilfunknetzsimulationen im Simulationsframework OMNeT++ sowie mit 4G/5G Experimentalplattformen vor. Neuere 4G und 5G Spezifikationen spezifizierten bereits die direkte Kommunikation zwischen Endgeräten beispielsweise für Vehicle-to-X Anwendungen, diese war jedoch weder kommerziell verfügbar noch für die im Projekt betrachteten Anwendungsfelder untersucht.

## I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der intensiven Zusammenarbeit der Projektpartner (siehe I.2), u.a. auch im Rahmen regelmäßiger Workshops und bilateraler Absprachen, erfolgte eine intensive Zusammenarbeit im Bereich der Personenstrommodellierung mit der University of Edinburgh (Dr. Anne Templeton, inkl. Auslandsaufenthalt von C. Mayr), mit der TU Delft (Dr. Natalie van der Wal, Floris Boendermaker) sowie mit dem Forschungszentrum Jülich (Prof. Dr. Armin Seyfried). Hinsichtlich der Mobilfunkmodelle gab es eine Zusammenarbeit mit der Universität Pisa (Prof. Dr. Giovanni Nardini) sowie zur Frage der Fußgängerkommunikation mit der Technischen Hochschule Ingolstadt (Prof. Dr. Andreas Festag).

## II EINGEHENDE DARSTELLUNG DES FORSCHUNGSPROJEKTES

### II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen

Das Forschungsprojekt roVer untergliederte sich in die in Tabelle 1 dargestellten Hauptarbeitspakete. Anhand dieser Struktur werden im Folgenden die Verwendung der Zuwendung und die erzielten Ergebnisse aufgezeigt, wobei jeweils die im Projektantrag benannten Ziele den erzielten Ergebnissen gegenübergestellt werden. Für die Details der wissenschaftlichen Ergebnisse wird aus Platzgründen jeweils auf die im Rahmen des Projektes erfolgten Veröffentlichungen (vergl. II.6) verwiesen.

AP 1	Szenarien
AP 2	Mobilität und Uncertainty Quantification
AP 3	Kommunikation und adaptive Informationsverbreitung
AP 4	Kopplung und Integration
AP 5	Simulationsstudien
AP 6	Dissemination der Ergebnisse

Tabelle 1: Überblick über die Hauptarbeitspakete des Forschungsprojektes roVer

#### II.1.1 AP 1: Szenarien

##### Ziele

Ziel war die Definition und Analyse von zwei Szenarien (Basisszenario, multi-modales komplexes Szenario) anhand derer die Wechselwirkung zwischen Kommunikation und Mobilität sowie die Verfahren zur robusten Informationsverbreitung untersucht werden. Ein weiteres Teil-AP betrachtete rechtliche Aspekte der im Projekt erarbeiteten Verfahren und Mobilitätsanwendungen.

##### Erzielte Ergebnisse

Gemeinsam mit den Projektpartnern SWM und accu:rate wurde ein Gebiet um die „Münchener Freiheit“ im Stadtgebiet München als in der ersten Projekthälfte zu modellierendes Basisszenario festgelegt, s. Abbildung 3. An der Münchener Freiheit kommen bei mittlerer Komplexität verschiedene Verkehrsträger (Fußgänger, U-Bahn, Tram, Bus, Taxi und Auto) zusammen und erlauben so die Untersuchung unterschiedlichster, praxisnaher Fragestellungen – selbst wenn im Basisszenario zunächst nur Fußgänger modelliert werden. Als mögliche Ausnahmesituationen in diesem Bereich wurden Störungen im Berufsverkehr sowie Ereignisse (Fußball-Abtransport, Konzert) beispielhaft diskutiert. Nachfolgend wurde das Basisszenario in eine entsprechende Topografie im Simulator Vadere überführt und bildete die Basis für die ersten Simulationsstudien im gekoppelten Simulationssystem.

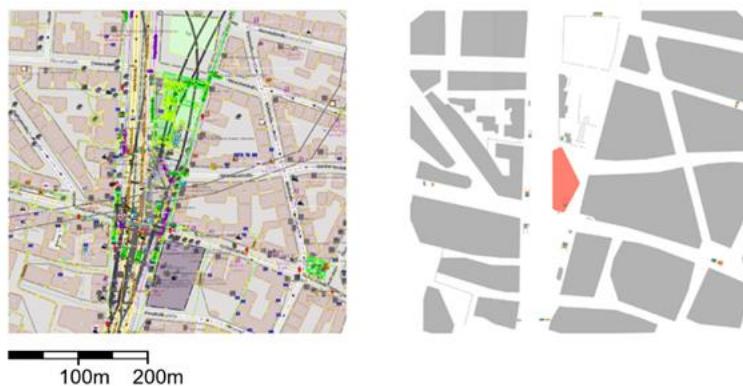
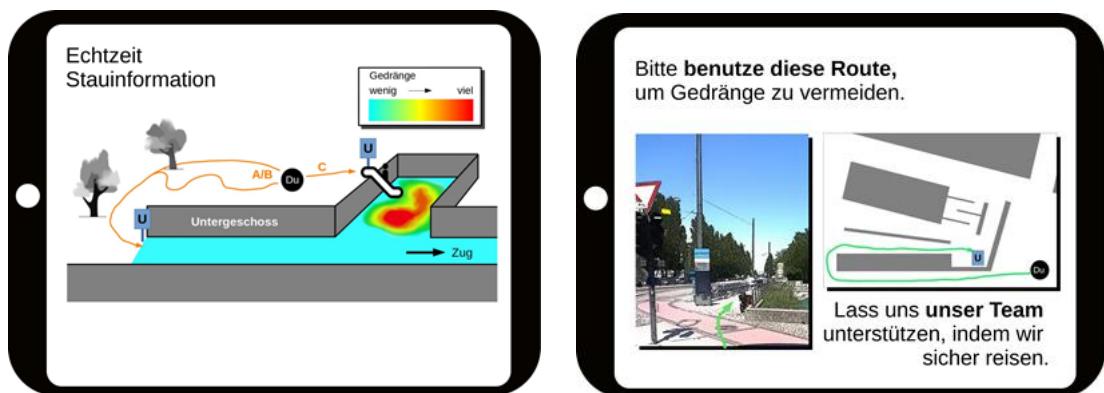


Abbildung 3: Münchener Freiheit (Basisszenario). Die Topografie wurde aus OpenStreetMap<sup>1</sup> (links) in den Personenstromsimulator Vadere (rechts) überführt.

---

<sup>1</sup> © OpenStreetMap, siehe <https://www.openstreetmap.org/copyright>

Nach der erfolgreichen Modellierung des Basisszenarios und den Ergebnissen aus den zugehörigen Simulationsstudien (vergl. II.1.5) wurde nach der Zwischenevaluation des Projektes gemeinsam mit allen Partnern das multi-modale komplexe Szenario definiert: Ein zentrale Forschungshypothese in roVer war, dass Personen ihr Verhalten durch über das Mobilfunknetz verbreitete Information ändern. Um das Verkehrsgeschehen im komplexen Szenario realistisch modellieren zu können, müssen daher neben der Mobilität und dem Mobilfunknetz auch die Verhaltensänderungen der Personen modelliert werden. Hierfür wurde zusammen mit der Crowd-Psychologin Dr. Anne Templeton von der University of Edinburgh in einer Online-Umfrage untersucht, wie die Routenwahl von der Gestaltung von über eine Mobilanwendung bereitgestellte Routenempfehlungen abhängt. In einer Online-Umfrage (siehe Abbildung 4) wurden dazu 921 Fußballfans und 444 Hochschulangehörige befragt. Die Teilnehmer bewerteten, welche der drei Routen sie an der Münchener Freiheit nehmen würden, um vom Bus zur U-Bahn zu gelangen. Statistische Tests wurden durchgeführt, um den Einfluss verschieden gestalteter Nachrichten auf das Routenwahlverhalten festzustellen. Nachrichtendesigns, die an den Teamgeist appellierten, hatten nur bei Fans einen Effekt auf die Routenwahl. Interessanterweise war dieser Effekt nur in Kombination mit anderen Nachrichtenkomponenten statistisch signifikant, möglicherweise aufgrund von Informationsüberlastung. Überraschenderweise hatte nur die Kartenansicht bei der Kontrollgruppe eine Wirkung. Fans reagierten somit empfindlicher auf die Nachrichtengestaltung als die Vergleichsgruppe. Ein wichtiges Ergebnis war, dass das Bereitstellen von aktuellen Stauinformationen fast immer einen positiven Effekt auf die Umleitung hatte. Die empfohlene längere Route wurde attraktiver, während die verstopfte Route eher vermieden wurde. Die so ermittelten Verteilungen ermöglichen eine realistische Definition des Personenverhaltens im erweiterten Szenario. Das Design und die Ergebnisse der Studie wurden in [1] publiziert.



**Abbildung 4:** Eines von acht Nachrichtendesigns aus der Online-Umfrage mit allen drei optionalen Nachrichtenkomponenten: Stauinformation (Display links), Kartenansicht (rechtes Display: Mitte rechter Seite) und den Appell an den Teamgeist (rechts: „Lass [...] reisen.“).

Um die Praxistauglichkeit zu testen, wurde zudem am 26.09.2023 eine Vor-Ort-Umfrage an der Münchener Freiheit durchgeführt, bei welcher zusätzlich auch der Einfluss der Orientierungsfähigkeit der befragten Personen untersucht wurde. Ortskundige Personen konnten die vorgeschlagene Route ohne Probleme finden. Nicht ortskundige Personen hatten teilweise Probleme, die Laufrichtung auszumachen.

#### Rechtliche Aspekte: Datenschutz und Rechte an Daten

Während des Projekts wurde das Telemedienrecht und das Datenschutzrecht zu jeder Zeit berücksichtigt. Alle im Projekt roVer neu entwickelten Verfahren, wie beispielsweise die dezentrale Personendichtekarte (vergl. II.1.3), wurden diesbezüglich überprüft (Darstellung im Detail in [2]), um zu gewährleisten, dass diese später die rechtlichen Anforderungen auch bei einem möglichen Praxiseinsatz erfüllen. Im Projekt wurden in einigen einzelnen Projektteilen persönliche Daten verarbeitet: Für oben erwähnte Online-Umfrage wurde ein Datenschutzkonzept erarbeitet und dem Datenschutzbeauftragten der Hochschule München vorgelegt. Die Verarbeitung und Veröffentlichung der anonymisierten Umfragedaten wurde bewilligt. Parallel zum manuellen Zählen von Personen an den Eingängen des U-Bahnhofs „Münchener Freiheit“ führten die Stadtwerke München Personenzählungen

mithilfe von Videoaufnahmen durch. Zuständig für die datenschutzrechtliche Absicherung war der Datenschutzbeauftragte der Stadtwerke München.

Bezüglich der neu entwickelten Verfahren wurden zwei Technologien auf datenschutzrechtliche Aspekte untersucht: die dezentrale Personendichtekarte (siehe II.1.3) und die darauf aufbauende Verkehrsleitapp (siehe II.1.2). Es wurde eine technische Dokumentation erstellt, welche als Grundlage für die rechtliche Bewertung herangezogen wurde. Die wichtigsten Ergebnisse der datenschutzrechtlichen Untersuchung [2] waren:

- Standortdaten, Dichtekarten und -Messungen gelten als personenbezogene Daten nach Art. 4 Ziffer 1 DSGVO.
- Die entwickelten Verfahren erfüllen prinzipiell die Anforderungen aus der DSGVO (Art. 25, 26, 32 DSGVO). Ihre konkrete Anwendung in einem bestimmten Produkt (z.B. einer Mobilitäts-App), erforderte jedoch eine gesonderte Überprüfung.
- Rechtlich wurden zwei technische Umsetzungsvarianten betrachtet: beim ersten Ansatz, dem zentralen Ansatz, gibt es einen Anbieter des Verkehrsleitdienstes (VLD). Dieser Anbieter stellt die App und die Infrastruktur bereit, betreibt diese und ist somit telemedienrechtlich und datenschutzrechtlich verantwortlich. Beim zweiten Ansatz, dem Peer-to-Peer-Ansatz, wird die App zur Nutzung bereitgestellt. Nutzer von Endgeräten laden sie herunter und betreiben sie in eigener Verantwortung als Gleichberechtigte (Peers). Ein Peer (die Verkehrsgesellschaft) bietet den Dienst der Routenberechnung an. Die Peers sind telemedien- und datenschutzrechtlich verantwortlich. Im zentralen Modell ist die Einwilligung (Art. 6 Abs. 1 UAbs. 1 Buchstabe a DSGVO) oder alternativ der Vertrag (Art. 6 Abs. 1 UAbs. 1 Buchstabe b DSGVO) der Rechtsgrund für die Verarbeitung. Eine Verpflichtung des Verantwortlichen durch Rechtsvorschrift (Art. 6 Abs. 1 U Abs. 1 Buchstabe c DSGVO) und erst recht eine Verpflichtung der Nutzer zur Dateneingabe ist angesichts des Eingriffs in Datenschutzgrundrechte schwer zu begründen. Eine Einwilligung nach § 25 TTD SG für den Eingriff in das Endgerät ist erforderlich, während § 13 TTD SG, obwohl auf Standortdaten bezogen, hier nicht anwendbar ist.
- Im Peer-to-Peer-Modell dient das berechtigte Interesse an der Verarbeitung (Art. 6 Abs. 1 UAbs. 1 Buchstabe f DSGVO) als Rechtsgrund.
- Die Kommunikation der VLD-Daten durch den TK-Anbieter unterliegt dem Fernmeldegeheimnis (§ 3 TTD SG). Dies gilt auch für die D2D-Kommunikation, soweit sie mit den Ressourcen des TK-Anbieters oder als Teil seiner Dienstleistung durchgeführt wird.

Außerhalb des im Projekt roVer betrachteten Themenfelds war die Auswahl geeigneter Verfahren zur Signierung, Verschlüsselung und Pseudonymisierung. Hierfür existiert aber bereits eine Reihe ggf. geeigneter Verfahren, beispielsweise in der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation.

## II.1.2 AP 2: Mobilität und Uncertainty Quantification

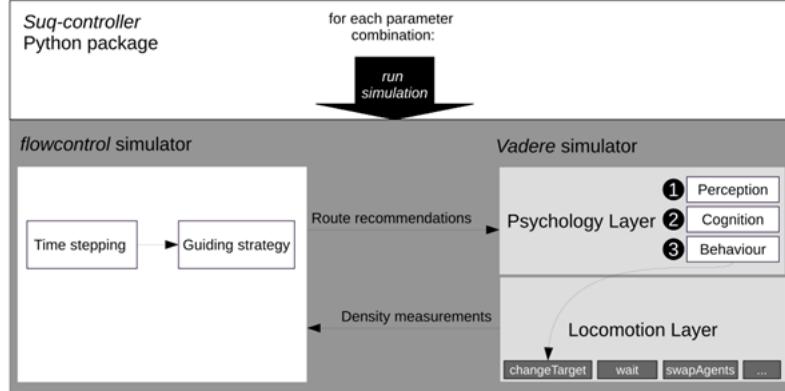
### Ziele

Hauptziele dieses Arbeitspaketes waren die Modellierung der in den Anwendungsszenarien betrachteten Mobilität und die Konzeption und Realisierung eines geeigneten Softwareframeworks zur Quantifizierung von Unsicherheiten in gekoppelten Mobilitäts- und Mobilfunksimulationen.

### Erzielte Ergebnisse

Die Bewertung der Unsicherheiten in den durchgeföhrten Simulationen umfasst sowohl die Quantifizierung der Unsicherheit der Simulationsergebnisse aufgrund unsicherer Modellparameter als auch die Bewertung des Parametereinflusses. Hierfür wurden Verfahren der Uncertainty Quantification genutzt: Vorwärtspropagation und globale Sensitivitätsanalyse. Die Vorwärtspropagation quantifiziert die Unsicherheit der Simulationsergebnisse, während die Sensitivitätsanalyse den Einfluss der unsicheren Parameter quantifiziert. Durchgeföhr wurden globale Sensitivitätsanalysen, bei der mithilfe von Sensitivitätsindizes der Einfluss der einzelnen Parameter auf eine interessierende Ausgangsgröße gemessen wurde. Für die Vorwärtspropagation und die Sensitivitätsanalyse wurden nicht-intrusive Verfahren verwendet, die zum Teil auf Ersatzmodellen wie Polynomial Chaos Expansions oder Kriging basieren. Alle Verfahren sind sampling-basiert, d.h. es müssen Parameterkombinationen evaluiert

werden. Um Parameterstudien mit gekoppelten Simulatoren durchführen zu können, erweiterte roVer das an der HM entwickelte Python-Framework *suq-controller*. Der SUQ-Controller führt die Parameterkombinationen parallel aus, siehe Abbildung 5. Um die roVer-Erweiterungen kontinuierlich zu testen, wurde eine Continous Intergration Pipeline, d.h. die automatisierte Durchführung regelmäßiger Softwaretests, eingerichtet. Zudem entstanden Tutorials, um den Einstieg in das im Projektverlauf entwickelte freiverfügbare Open Source Framework für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern auch außerhalb des roVer Projektes zu erleichtern.



**Abbildung 5:** Durchführung von Parameterstudien mithilfe des erweiterten SUQ-Controllers. Der Simulator *Flowcontrol* ist mit dem Simulator *Vadere* gekoppelt. *Flowcontrol* stellt dynamisch Routenempfehlungen bereit, die im Mobilitätssimulator *Vadere* verarbeitet werden.

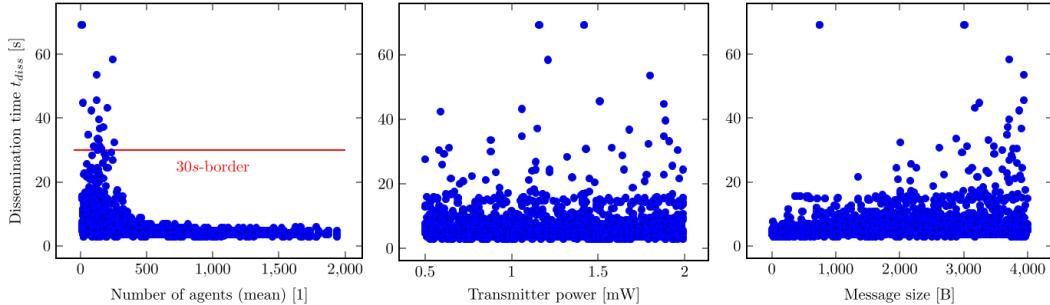
#### Sensitivitätsanalyse zur Ermittlung einflussreicher Netzwerkparameter

Mithilfe einer globalen Sensitivitätsstudie untersuchte roVer den Einfluss der Parameter "Anzahl der Personen", "Sendeleistung" und "Netzlast" auf die Informationsausbreitungsdauer, d. h. die Zeit, die es benötigt, bis 95% aller Personen informiert sind. Es wurden 2000 Samples generiert und ein Kriging-Ersatzmodell regressiert, mit dem die Informationsausbreitungsdauer in Abhängigkeit der Parameter berechnet werden kann. Mit diesem Ersatzmodell wurden dann die Sensitivitätsindizes berechnet. Es zeigte sich, dass die Anzahl der Agenten den stärksten Einfluss auf die Verbreitungszeit hat, vergl. Abbildung 6. Die Netzwerklast spielt in Verbindung mit der Anzahl der Agenten eine Rolle. Die Sendeleistung hat im untersuchten Szenario keinen Einfluss, wenn sie in einem Bereich von 0,5mW...2,0mW variiert wird. Mithilfe der Sensitivitätsstudie kann der Rechenaufwand in zukünftigen Studien reduziert werden, indem die nicht-einflussreichen Sendeleistung auf einen Wert fixiert wird. Die Ergebnisse wurden in einer Fachzeitschrift (open access) publiziert [2].

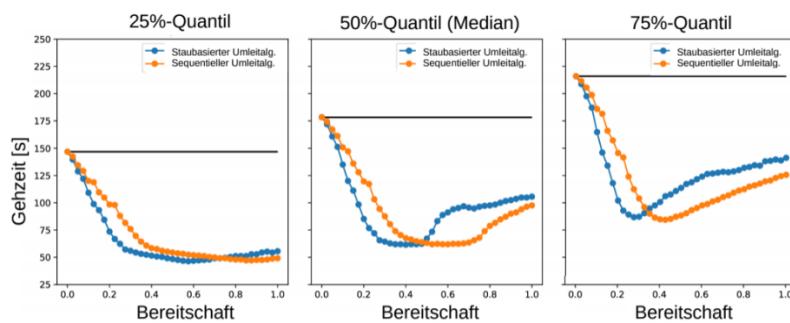
#### Vorwärtspropagation zur Auswahl eines Umleitalgorithmus

Im letzten Teil der Uncertainty Quantification Studien, lag der Fokus auf Parametern, die das Mobilitätsverhalten steuern. Hierfür wurde das Basis-Szenario weiter verfeinert: Personen erhalten an der Münchner Freiheit eine Routenempfehlungen über eine Mobilfunk-App, die einen Weg zur U-Bahn ausweist. Welche Route empfohlen wird, hängt dabei von der aktuellen Stausituation im Zwischengeschoss der U-Bahn ab. Das Mobilitätsverhalten wird dabei stark von der Bereitschaft der Personen der Umleitinformationen Folge zu leisten beeinflusst. Bisher gibt es keine Erkenntnisse wie hoch diese Bereitschaft ist. Um dennoch Aussagen über das Mobilitätsverhalten treffen zu können, wurde eine Simulationsstudie mit dem in roVer entwickelten Simulationsframework *CrowNet* durchgeführt, in der die Unsicherheit der Bereitschaft vorwärtspropagiert wurde. Die Bereitschaft Umleitinformationen zu folgen, ein unsicherer Parameter in der Simulation, wurde dabei zwischen 0% und 100% variiert. Außerdem wurde untersucht, welchen Einfluss der Umleitalgorithmus besitzt. Hierfür wurden zwei Umleitalgorithmen im *CrowNet*-Modul *flowcontrol* implementiert, bei denen Personen sequenziell oder basierend auf der aktuellen Stausituation verschiedene Laufwege zur U-Bahn empfohlen wird, siehe Abb. 3. Die Vorwärtspropagation des Parameters hat gezeigt, dass das Mobilitätsverhalten, charakterisiert durch Dichte, Geschwindigkeit und Gehzeit, von der Bereitschaft und dem Umleitalgorithmus abhängt, siehe Abbildung 7. Eine wichtige Erkenntnis dabei war, dass nur jede fünfte Person Routenempfehlungen befolgen muss, damit sich Staus im Zwischengeschoss des U-Bahnhofs Münchner Freiheit auflösen. Mithilfe der Vorwärtspropagation konnte die Unsicherheit des

Mobilitätsverhaltens aufgrund fehlender Bereitschaft sich umleiten zu lassen erfolgreich quantifiziert werden. Die im Rahmen der Studie durchgeführte Verfeinerung des Basis-Szenarios ermöglicht zudem die Untersuchung des komplexen Zusammenspiels eines dynamischen Mobilitätsverhaltens und Mobilfunk. Die Ergebnisse dieser Studie wurden in [3] publiziert und sind frei verfügbar.



**Abbildung 6:** Ausbreitungszeit (dissemination time) in Abhängigkeit von der Anzahl der Personen (agents), Sendeleistung und Nachrichtengröße (pro. zur Netzlast bei konstantem Sendeintervall) [2].



**Abbildung 7:** 25%-,50%- und 75%-Quantil der individuellen Gehzeiten für das Basisszenario. Personen erhalten dynamische Routenempfehlungen. Die Gehzeit hängt vom Umleitalgorithmus und der Bereitschaft der Personen ab.

### II.1.3 AP 3: Kommunikation und adaptive Informationsverbreitung

#### Ziele

Es wurden zwei Kernziele verfolgt: Die Modellierung der drahtlosen Kommunikation zwischen mobilen Personen im roVer Simulationsframework sowie die Entwicklung von neuartigen Verfahren zur adaptiven Verbreitung von Informationen bezogen auf vernetzte, intelligente Mobilität.

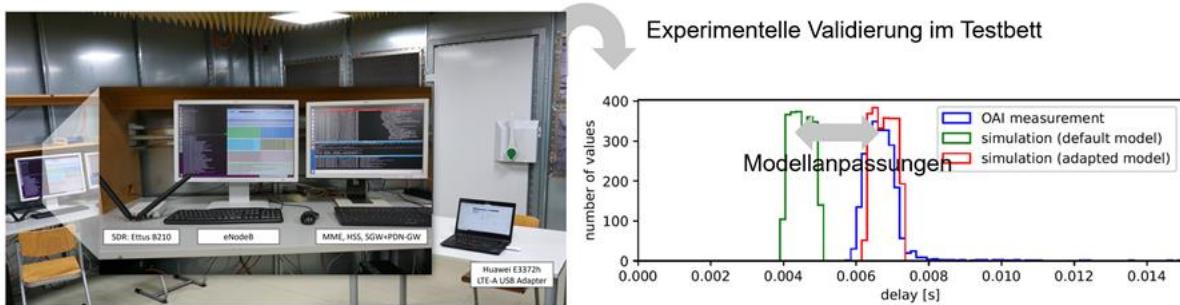
#### Erzielte Ergebnisse

Zur Modellierung der 4G/5G-Funkkommunikation wurde innerhalb des Simulationssystems OMNeT++ zunächst das Open-Source Modell SimuLTE [4] der Universität Pisa mit dem INET-Framework [5] (Modellierung des Internet-Protokollstacks) kombiniert. Hierfür wurde in der ersten Projekthälfte eine umfangreiche Anpassung an das aktuelle INET4-Framework durchgeführt. Hierzu mussten alle wesentlichen Komponenten von der Anwendungsschicht bis zur Datensicherungsschicht überarbeitet werden. Seit Q4/2019 war so eine Modellierung direkt und/oder zellular kommunizierender Verkehrsteilnehmer möglich. Die entsprechenden Änderungen wurden über das öffentliche Open-Source Projekt der Community zur Verfügung gestellt. Um die Simulation von direkter Kommunikation in Mobilfunknetzen zu ermöglichen, wurde danach den Mobilfunksimulator simuLTE an das Framework angepasst und erweitert. Die Änderungen wurden Anfang 2021 von den Entwicklern an der Universität Pisa übernommen. Um 5G Mobilfunk noch genauer simulieren zu können, wurde 2021 der Simulator Simu5G [6] integriert. Insgesamt wurde das Projektziel einer detaillierten Modellierung von 4G/5G Kommunikation für die Untersuchung von Mobilitätsszenarien somit vollständig erreicht.

#### Validierung von Mobilfunk-Modellen mithilfe experimenteller Untersuchungen

Im Rahmen der Literaturrecherche wurde festgestellt, dass die Mobilfunksimulationssoftware SimuLTE bisher nicht mit Realmessungen überprüft worden war. Um die Funktionalität sicherzustellen, sollte

daher die darauf aufbauende Mobilfunksimulation in roVer experimentell validiert werden. Für diesen Zweck wurde ein Szenario geringer Komplexität ausgewählt und ein entsprechendes Testbett aufgebaut. Hierfür wurde die Open-Source 4G/5G-Implementierung OpenAirInterface genutzt (Abbildung 8). Auf Basis der vorhandenen Endgeräte wurden vier Szenarien mit zwei bzw. drei Endgeräten aufgebaut und parallel in der Simulationsumgebung entsprechend modelliert. Anschließend wurden die in den Szenarien gemessenen Werte für Verzögerung (delay) und Durchsatz (throughput) mit den von den Simulationsmodellen berechneten Werten verglichen. Insgesamt zeigte sich für den Großteil der Szenarien eine gute Übereinstimmung von Simulation und Messung im Testbett. In zwei Fällen konnten jedoch deutliche Unterschiede festgestellt werden, welche nachfolgend zu einer Anpassung der Modellparameter und des Modellverhaltens führten. Letztendlich konnte so eine sehr gute Übereinstimmung von Simulation und Messung für die ausgewählten Szenarien erreicht werden, Abbildung 8 (rechts) zeigt ein Beispiel für die Ergebnisse vor und nach der Adaption. Da das in roVer eingesetzte Funksimulationsmodell in vielen Forschungsprojekten genutzt wird<sup>2</sup> und weit verbreitet ist, wurden die Ergebnisse sowie die Änderungen am Modell auf der PIMRC 2020 veröffentlicht [7]. Für die Durchführung von experimentellen Untersuchungen von 5G wurde nachfolgend das experimentelle Mobilfunk-Testbett für die 5G Varianten Non-Standalone (NSA) und Standalone (SA) erweitert.



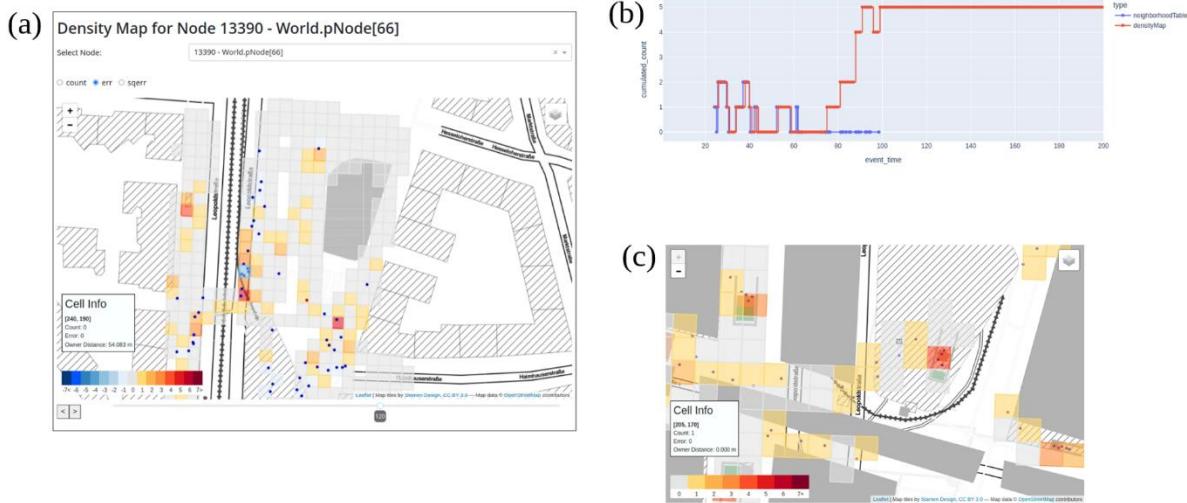
**Abbildung 8: Experimentelles Testbett zur Validierung der Mobilfunksimulation. Basisstation (eNodeB) mit Software-Defined Radio (SDR) von Ettus, Mobility Management Entity (MME), Home Subscriber Server (HSS) sowie Packet Data Network Gateway (PDN-GW) [7].**

#### *Adaptive Informationsverbreitung auf Basis dezentraler Dichtekarten*

Um Gefahrensituationen im Personenverkehr, wie z.B. Gedränge vor einem U-Bahneingängen, erkennen zu können, wurde in roVer eine neue Methodik entwickelt. Mithilfe von direkter Kommunikation wird ermittelt wie viele Personen sich in einem bestimmten Bereich aufhalten. Die damit berechneten Personendichten werden in einer Karte dargestellt, der sogenannten Dichtekarte. Zentrale, mobilfunkbasierte Systeme hierfür existieren seit langer Zeit (z.B. Google Maps). Diese zentralen Systeme haben jedoch gravierende Nachteile hinsichtlich der Datenkommunikation zu einem zentralen Server sowie einer Beeinträchtigung der Privatsphäre durch die zentral zusammenlaufenden Mobilitätsdaten. Neuartig an dem in roVer verfolgten Ansatz ist, dass die Dichtekarte dezentral generiert wird: Positionen und IDs der Nutzer werden nur in einem lokalen Bereich gesendet. Jedes Endgerät berechnet die Dichtekarte selbst. Es gibt keine zentrale Stelle, die Daten sammelt. Um die Genauigkeit der Dichtekarten zu erhöhen, wird die von Endgeräten ausgetauschte Dichteinformation aggregiert. Um das Verkehrsgeschehen analysieren zu können, wurde ein auf Open Street Maps basierendes Analysewerkzeug entwickelt. Damit kann die Dichtekarte auf einfache Weise im Web-Browser angezeigt werden, siehe Abbildung 9. Mit sogenannten Overlays werden die simulierten Dichtekarten der Open Street Map Ansicht überlagert. Neben der Personendichteverteilung enthält das Analyse-Tool zudem eine Fehleranzeige, um die Genauigkeit der Dichtekarte bewerten zu können. Diese Anzeige ist ein wichtiger Baustein bei der Entwicklung neuer Aggregations- und Informationsverbreitungsalgorithmen.

---

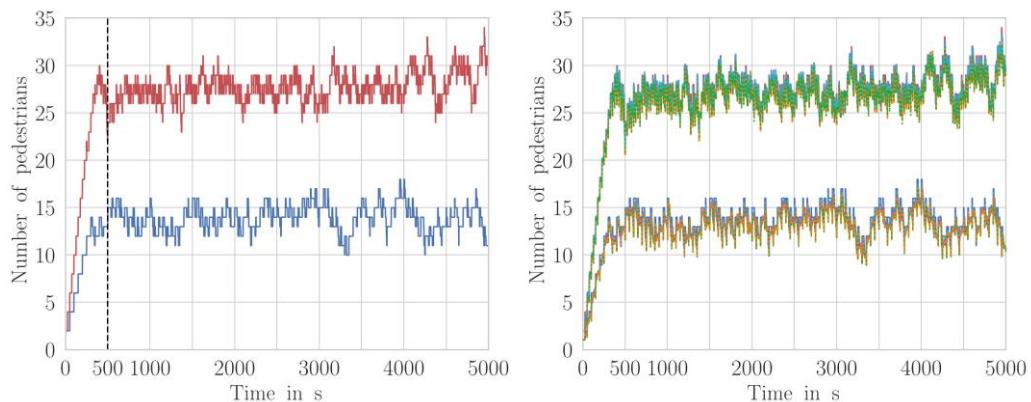
<sup>2</sup> 70 direkt verwandte Publikationen auf Webseite gelistet, erwähnt in >700 Publikationen lt. Google Scholar



**Abbildung 9: Browserbasiertes Analyse Tool.** (a) Ansicht des Basis-Szenarios. Das Basisszenario ist in Zellen unterteilt, die gemeinsam eine Dichtekarte bilden. Es kann sowohl der zeitliche Verlauf der Personendichte in einzelnen Zellen (b) als auch eine Darstellung einzelner Bereiche abgerufen werden (c). (Kartendaten © OpenStreetMap, <https://www.openstreetmap.org/copyright>)

Neben Informationen zu Personendichten, die beispielsweise für eine bedarfsgerechte Auslegung und Steuerung des ÖPNV von Interesse sind, können über das gleiche Verfahren beliebige andere mobilitätsbezogene Informationen, z.B. Warnmeldungen oder Umleitungsempfehlungen, verbreitet werden. Die Information über lokale Personendichten dient dann als Grundlage für die Adaption an die lokale Situation: die einzelnen Geräte passen damit die Senderate so an die lokale Anzahl potenzieller weiterer Sender an, dass keine Überlastung des Übertragungsmediums auftritt. Dies ist auch deshalb möglich, weil über die dezentrale Dichtekarte die Anzahl der Personen und ihr zeitlicher Verlauf sehr genau ermittelbar ist, wie in Abbildung 10 dargestellt. Dieses zunächst für nur eine Mobilfunkzelle konzipierte Verfahren wurde nachfolgend für den Einsatz über einzelne Mobilfunkzellen hinaus erweitert. Hierfür wurde der Ansatz der Resource Sharing Domain (RSD) entwickelt. Sie bezeichnet den geographischen Bereich, in welchem sich die Nutzer die Ressourcen teilen. Bei einer vereinfachten, omnidirektionalen Antenne entspricht das der von einer Basisstation abgedeckten Mobilfunkzelle, andernfalls dem innerhalb eines Sektors abgedeckten Bereich. Wie in Abbildung 11 gezeigt, ermittelt der Nutzer (blau) nicht nur die Anzahl der in lokaler Reichweite befindlichen anderen Nutzer, sondern berücksichtigt auch deren jeweilige RSD. Nutzer im grau schraffierten Bereich befinden sich in einer anderen RSD und werden daher für die Lastregelung nicht einbezogen.

Die in diesem AP entwickelten Verfahren wurden im Rahmen umfangreicher Parameterstudien (vergl. II.1.5) untersucht, welche zusammen mit einer detaillierten Beschreibung der Verbreitungsverfahren in einem Konferenzbeitrag [8] und in einem Journalartikel (open access) publiziert wurden [9].



**Abbildung 10: Beispiel für die Schätzung von Personenzahlen über die in roVer entwickelten dezentralen Verfahren:** links die wahren Werte (ground truth) für das Beispielszenario mit einer Ankunftsrate von 2,4 Fußgängern/Minute (blau) bzw. 4,8 Fußgänger/Minute (rot), rechts die geschätzten Werte. (Farben kennzeichnen jeweils unterschiedliche Simulationsläufe). [9]

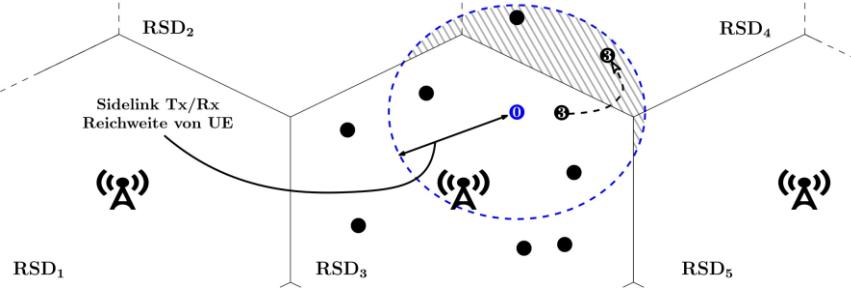


Abbildung 11: Konzept der Resource Sharing Domain (RSD) zur Lastregulierung.

#### Kommunikation bei multi-modalem Verkehrsgeschehen

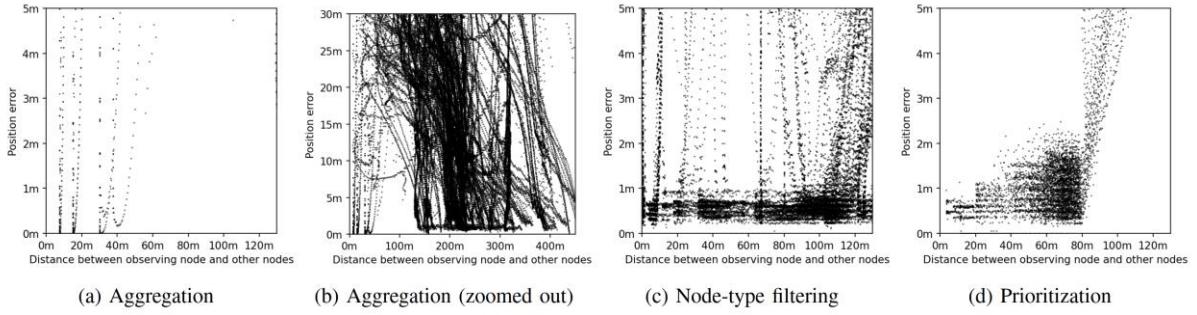
Ein Kernelement der zweiten Projektphase des roVer-Projekts war die Untersuchung der Informationsausbreitung in multi-modalen Verkehrsszenarien. Hierfür wurde ein neuartiger Ansatz für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Fußgängern entwickelt, mit dem das Versenden von wichtigen Nachrichten durch Priorisierung beschleunigt wird. Die Idee ist, dass auf einem System nahe der Basisstation (Multi-Access Edge Computing, MEC) die Nachrichten hinsichtlich ihrer aktuellen Relevanz bewertet werden. Nachrichten zwischen eng beieinander positionierten Fußgängern und Fahrzeugen erhalten hierbei eine hohe Priorität, da dort von einem erhöhten Kollisionsrisiko ausgegangen wird – Nachrichten weit entfernter Personen hingegen erhalten eine geringe Priorität. Über die Modellierung entsprechender Szenarien im roVer Simulationsframework CrowNet (vergl. Abbildung 12) konnte gezeigt werden, dass sowohl die Latenz reduziert als auch die Genauigkeit erhöht werden konnte, mit der Fahrzeuge die Position von Fußgängern in der unmittelbaren Umgebung bekannt ist, siehe auch Abbildung 13. Der Ansatz kann somit potenziell das Kollisionsrisiko deutlich reduzieren. Die Ergebnisse wurden auf der Fachkonferenz IEEE WiMob 2022 veröffentlicht [10].

Etwa zur Mitte des Projektverlaufs wurde vom europäischen Standardisierungsgremium ETSI ein dreiteiliger Standard zum Schutz gefährdeter Verkehrsteilnehmer (Vulnerable Road User, VRU) verabschiedet [11] [12] [13]. Dieser nutzt – so wie auch im Projekt roVer untersucht – eine direkte Kommunikation zwischen unterschiedlichen



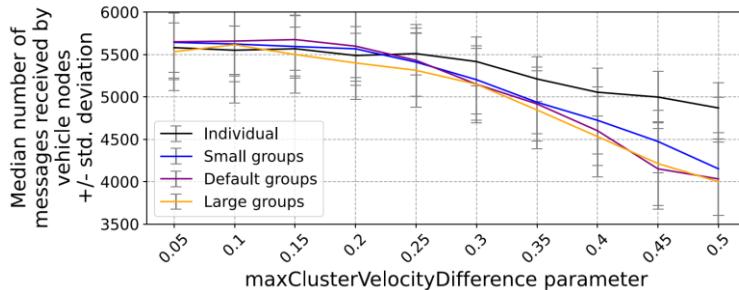
Abbildung 12: Multi-modales Verkehrsszenario mit Fußgängern und Fahrzeugen dargestellt im roVer Simulationsframework CrowNet.

Verkehrsteilnehmern. Daher wurde bei der Zwischenevaluation des Projektes entschieden, die im ETSI-Standard definierten Kommunikationsformen und Nachrichtentypen auch im Rahmen des Projektes roVer zu berücksichtigen. Dies hatte zur Folge, dass auch die Modellierung der Kommunikation im roVer Simulationsframework CrowNet entsprechend erweitert werden musste – diese Arbeiten waren bei der Projektplanung zwar noch nicht absehbar, aus Sicht der Projektbeteiligten jedoch zwingend notwendig, um die Praxisrelevanz und Standardkonformität der erarbeiteten Ansätze sicherzustellen.



**Abbildung 13: Fehler bei der Schätzung der Position eines Verkehrsteilnehmers bei unterschiedlichen Aggregations- und Priorisierungsansätzen [10].**

Eine der neuen Funktionalitäten, die diese Erweiterung für Vulnerable Road User Awareness Messages (VAMs) [13] beinhaltet, ist ein im Standard spezifizierter Ansatz, durch eine Cluster-Bildung die Anzahl der versendeten Nachrichten (und damit die Auslastung des Medium) zu reduzieren. Grundannahme hierbei ist, dass bei einer Gruppe von mobilen Teilnehmern im Straßenverkehr (z.B. einer Gruppe von Fußgängern) nicht jeder Teilnehmer der Gruppe eine individuelle Nachricht senden muss, sondern es stattdessen effizienter ist, einen Master-Teilnehmer zu bestimmen, welcher VAM für die gesamte Gruppe aussendet. Der Standard definiert hierbei eine Reihe von Parametern, deren Einfluss jedoch weder im Standard noch in der verfügbaren wissenschaftlichen Literatur bisher systematisch untersucht worden war. Da ohne diese Untersuchungen der Einfluss des Clusterings auf die in roVer untersuchten Verfahren aber auch auf die VAM-Kommunikation in intelligenten Verkehrssystemen insgesamt nicht klar war, wurden entsprechende Untersuchungen in roVer zusätzlich durchgeführt und publiziert [14]. Hierbei zeigte sich, dass erwartungsgemäß größere Gruppen vom Clustering am stärksten profitieren, dies jedoch erst ab einem (relativ hohen) Wert von ca. 0.25 für den Parameterwert für den zulässigen Geschwindigkeitsunterschied (maxClusterVelocityDifference) innerhalb des Clusters.



**Abbildung 14: Einfluss der maximal im Cluster tolerierten Geschwindigkeitsunterschiede (Parameter maxClusterVelocityDifference [13]) auf die mittlere Anzahl ausgesandter Nachrichten [14].**

## II.1.4 AP 4: Kopplung und Integration

### Ziele

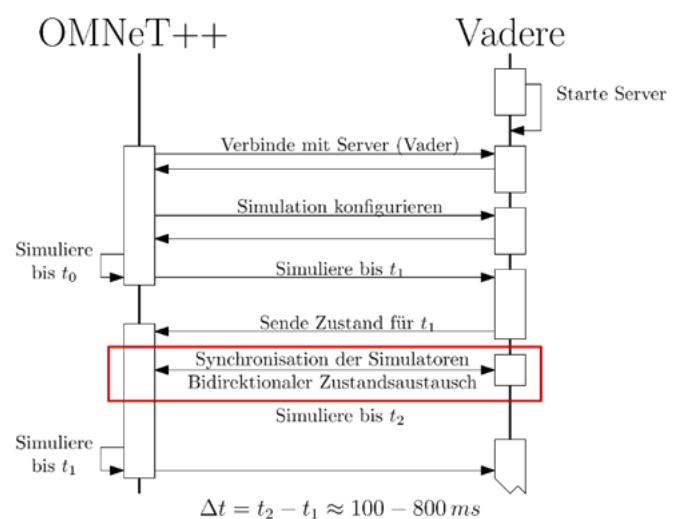
Hauptziel dieses Arbeitspaketes war die Konzeption und Umsetzung einer gekoppelten Mobilitäts- und Kommunikationssimulation innerhalb eines integrierten Gesamtsystems.

### Erzielte Ergebnisse

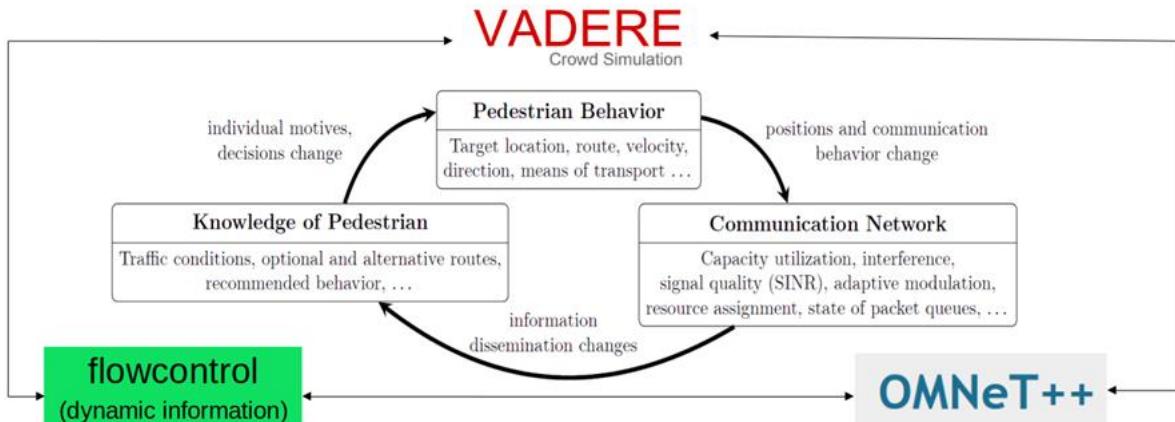
Die gekoppelte Mobilitäts- und Mobilfunksimulation wurde in Form einer Open-Source Implementierung umgesetzt, welche als Basis zur Untersuchung der Informationsverbreitung zwischen vernetzten Fußgängern bzw. allgemein Verkehrsteilnehmern dient. Nach einer Evaluierung unterschiedlicher Kopplungsvarianten wurde entschieden, den Personenstromsimulator Vadere der Hochschule München mit dem ereignisorientierten Open-Source Simulator OMNeT++ über eine Socket-Schnittstelle zu koppeln. Nach dem Stand der Technik gab es schon eine Kopplung des Open-Source Verkehrssimulators sumo über das Framework veins mit einer Funksimulation in OMNeT++ für Fahrzeuge mit Hilfe des sogenannten Traffic Control Interface (TraCI). Dieser konzeptionelle Ansatz wurde bereits in einer frühen Projektphase mit den OMNeT++ Entwicklern auf einer Fachkonferenz diskutiert [15] und dort bestätigt.

Um Verkehrsteilnehmer dynamisch leiten zu können, entwickelte roVer im Laufe des Projekts den Simulator *flowcontrol*. Durch die Einbindung von *flowcontrol* in die gekoppelte Simulation können moderne Leitstrategien in der Simulation und die Wechselwirkung zwischen Mobilfunknetz und Mobilitätsverhalten untersucht und entwickelt werden. Die Simulatoren (Vadere [16] für die Mobilitätssimulation, OMNeT++ mit INET/Simul5G/Artery [17] für die Funkkommunikation und Informationsverbreitung, *flowcontrol* für die Generierung von Information) wurden dazu im in roVer neu geschaffenen Simulationsframework CrowNet gekoppelt. Um Wechselwirkungen berücksichtigen zu können, werden die

Simulatoren periodisch synchronisiert und Zustandsinformationen bidirektional ausgetauscht (vergl. Abbildung 15). Um die Wiederverwendbarkeit der entwickelten Module zu steigern, wurde die Kopplung zwischen den Simulatoren ebenfalls mit dem TraCI implementiert. Innerhalb von Vadere wurde dafür ein entsprechendes Modul zur Steuerung und Kopplung des Simulators realisiert. Zudem wurde das Framework veins um die Übertragung von Fußgängerpositionen erweitert. Durch die Nutzung aktueller Container-Technologien kann das System unabhängig vom ausführenden Host-System sehr einfach in Betrieb genommen und genutzt werden. Die ist wegen der bedingt durch die Kopplung hohe Komplexität des Gesamtsystems ein erheblicher Vorteil. So ist das Framework für eine Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten nutzbar, auch über die Forschungsarbeiten des Projektes selbst hinaus in der Lehre oder bei Abschlussarbeiten, wie teilweise bereits geschehen (siehe auch II.6.3). Insgesamt kann so erstmalig der gesamte Wirkungskreislauf in einem frei verfügbaren, integrierten System modelliert und untersucht werden (siehe Abbildung 16).



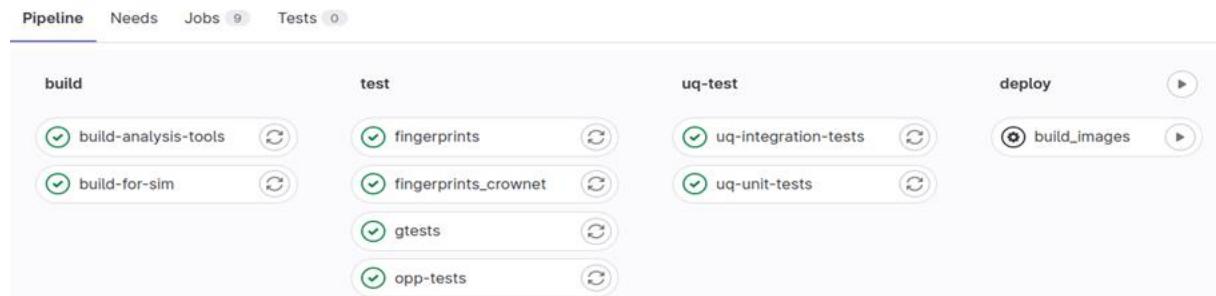
**Abbildung 15: Synchronisation der beiden Simulatoren vadere und OMNeT++**



**Abbildung 16: Gekoppelte Simulation mit den Simulatoren Vadere (Mobilität), Omnet (Mobilfunk) und flowcontrol (Routenempfehlung). Es besteht zudem die Möglichkeit den Simulator SUMO einzubinden. Nutzerfreundliche Anleitungen und Test-Framework**

Um eine Weiterverwendung des in roVer entwickelten Simulationsframeworks auch in anderen Forschungsprojekten zu erleichtern, wurde eine Dokumentation für externe Nutzer erstellt. Automatisierungen, wie die automatische Erstellung der notwendigen Python-Entwicklungsumgebungen erleichtern die Anwendung. Erste Nutzer aus ganz Europa haben sich mit dem roVer Projektteam in Verbindung gesetzt, weil sie das Framework crownet in eigenen Forschungsvorhaben einsetzen wollen. Um dauerhaft eine gute Softwarequalität sicherzustellen, wurde eine Software-Testautomatisierung umgesetzt: eine Continuous Integration Pipeline (siehe Abbildung 17) mit sogenannten „Fingerprint Tests“ für spezielle Simulationsszenarien wird täglich durchlaufen, um sicherzustellen, dass die Simulation des Basis-Szenarios nicht unbeabsichtigt verändert werden. Über

Hash-Werte wird geprüft, ob sich die Simulationsergebnisse inhaltlich ändern, beispielsweise weil eine Weiterentwicklung der Software unbeabsichtigte Seiteneffekte beinhaltet. Für die Uncertainty Quantification Pipeline wurden zudem Integrationstests angelegt.



**Abbildung 17:** Beispiel für eine Continuous Integration Pipeline (automatisierter Softwaretest) im roVer Simulationsframework CrowNet.

## II.1.5 AP 5: Simulationsstudien

### Ziele

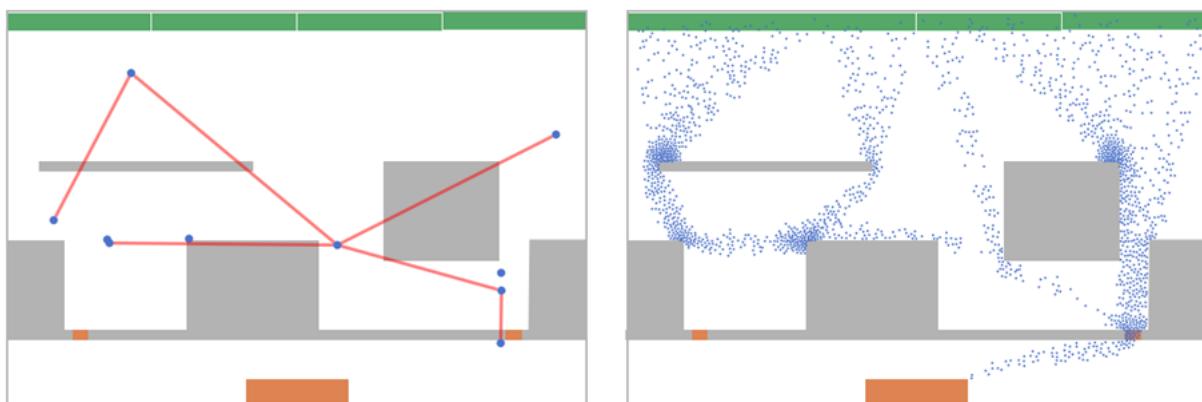
Das Kernziel dieses Arbeitspaketes war die Durchführung von systematischen Simulationsstudien, jeweils für das Basis- und das erweiterte Szenario. Zusätzlich beinhaltete ein Teil-Arbeitspaket die Entwicklung einer Visualisierung und eines Demonstrators.

### Erzielte Ergebnisse

Um Simulationsstudien mit dem gekoppelten Simulator durchzuführen, wurde das an der Hochschule München in der Gruppe von Gerta Köster erarbeitete Python Framework *suq-controller* erweitert. Gekoppelte Simulationen können so parallel durchgeführt werden – was aufgrund der langen Simulationszeiten eine zwingende Voraussetzung war, um eine ausreichende Zahl an Simulationsläufen innerhalb der verfügbaren Projektzeit realisieren zu können. Der *suq-controller* ist Basis für die Durchführung von Methoden aus der Uncertainty Quantification.

#### *Simulationsstudie zum Abschattungsverhalten an der „Münchener Freiheit“*

Ein zentrales Element des Basisszenarios Münchener Freiheit (vergl. II.1.1) ist die komplexe Topografie, die eine Vielzahl an Hindernissen enthält. Dadurch kommt es zur Abschattung von Personen, wodurch der Empfang von Informationen über der Mobilfunknetz gestört wird. In einer Simulationsstudie wurde daher untersucht, wie gut direkte Kommunikation geeignet ist, um Personenströme zu informieren und umzuleiten. Hierfür wurde ein Teilbereich der Münchener Freiheit auf seine wesentlichen Elemente reduziert: zwei Haupteingänge zum Zwischengeschoss, die durch Hindernisse verdeckt sind, siehe Abbildung 18. In einer Simulationsstudie wurden dann verschiedene Simulationsparameter variiert,



**Abbildung 18:** Abschattungsstudie: Virtuelle Fußgänger erhalten über das Mobilfunknetz Information, dass der linke Durchgang gesperrt ist und laufen daher über den rechten Durchgang zum Zielbereich unten. In unter 1% der Fälle kommt es zu Abschattung durch Hindernisse zwischen Personen (links).

unter anderem die Personenanzahl, die Sendeleistung der Mobilfunkgeräte, mit denen die virtuellen Personen ausgestattet sind, und die Netzwerklast, die durch die Nutzung zusätzlicher Mobilfunkapplikationen entsteht. Es konnte gezeigt werden, dass es nur in sehr selten Fällen (<1%) zu einem Abbruch der Kommunikation kommt, siehe Abbildung 19. Die Ergebnisse der Simulationsstudie wurden in einem Journal-Artikel publiziert [2] (open access).

#### *Einfluss des Mobilitätsverhaltens auf die Kommunikation*

Eine der wichtigsten Forschungshypothesen im roVer Projekts war, dass sich die Genauigkeit des Bewegungsmodells auf die Kommunikation auswirkt. In einer Simulationsstudie konnten wir dies anhand von zwei Mobilitätsmodellen, dem Optimal Steps Model und dem Striping Model (Abbildung 20), nachweisen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Genauigkeit der Personenmobilität deutlich auf die unteren Netzwerkschichten auswirkt (vergl. Abbildung 21). Die Ergebnisse wurden auf der Fachkonferenz UNET 2022 veröffentlicht und dort mit dem "best paper" Award ausgezeichnet.

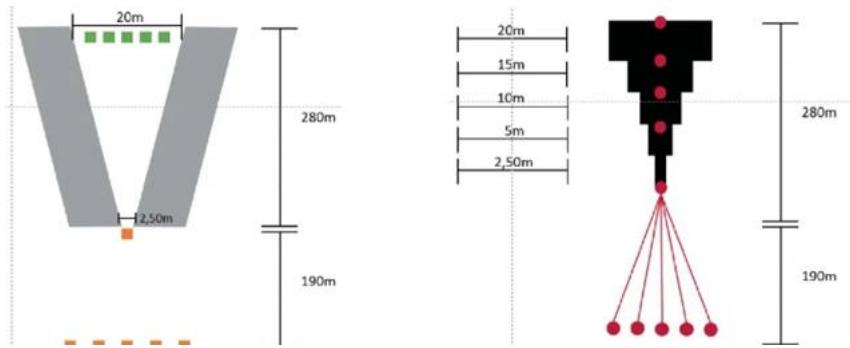


Abbildung 20: Szenario zur Untersuchung des Einflusses des Mobilitätsmodells auf die Kommunikation. Links: Topografiemodell für das Bewegungsmodell Optimal Steps Model (OSM) im Simualor Vadere. Rechts: Striping Model im Simulator Sumo. Virtuelle Personen bewegen sich auf den roten Linien. [17]

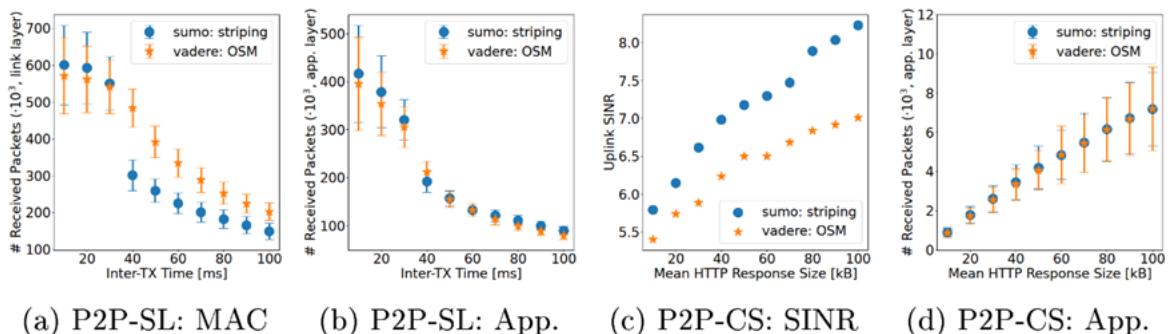


Abbildung 21: Beispiel für den Einfluss unterschiedlicher Bewegungsmodelle auf das Kommunikationsverhalten - dargestellt in blau sind die Ergebnisse mit einem Striping“ Bewegungsmodell modelliert im Simulator sumo, in orange die Ergebnisse mit dem „Optimal Steps Model“ im auf Fußgängermobilität spezialisierten Simulator Vadere [18].

#### *Auswirkung der Bereitstellung von Umleitinformationen (erweitertes Szenario)*

In einer weiteren Simulationsstudie wurde das komplexe Verkehrsgeschehen im erweiterten Szenario an der Münchener Freiheit untersucht. Basis hierfür waren die Verteilungen aus der Online-Umfrage (vergl. II.1.1), um die Parameter des Routenwahlmodells in der Simulation festzulegen. Mit dieser

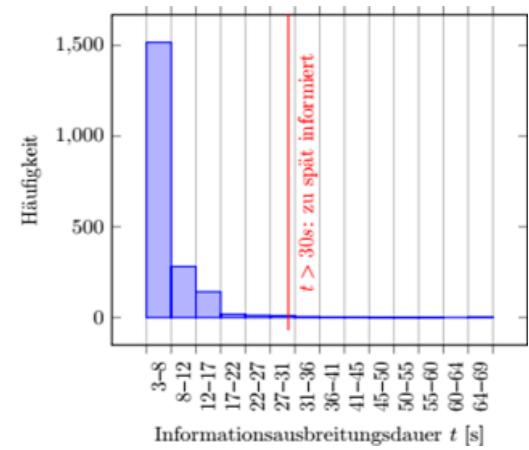
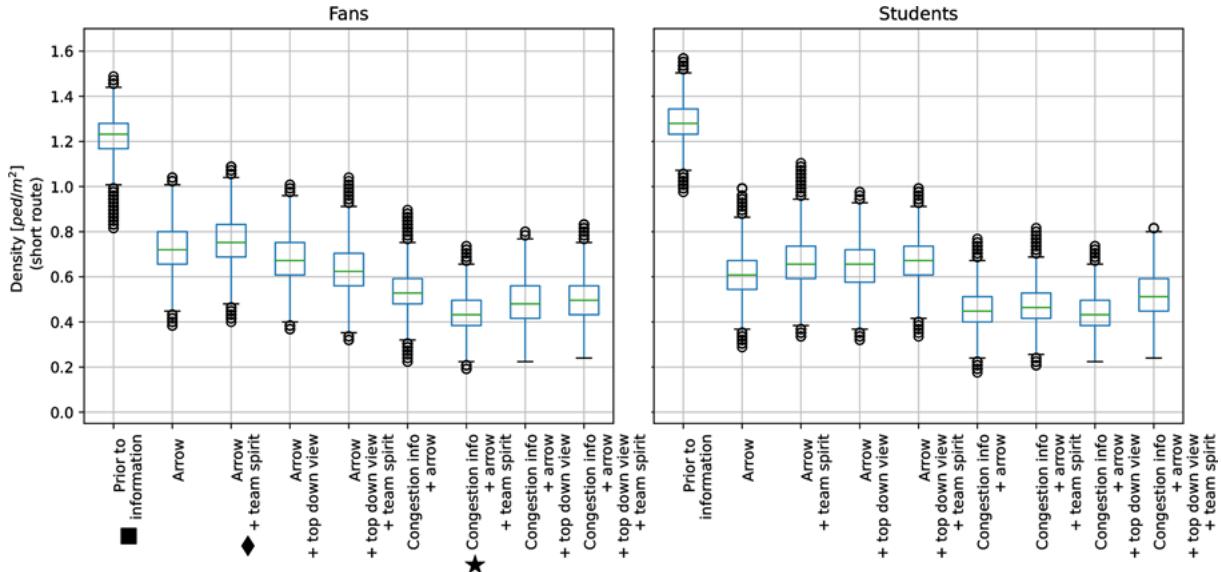


Abbildung 19: Verteilung der Informationsausbreitungsdauer im Basisszenario. Sie beschreibt die Zeit die verstreicht, bis 95% der Personen informiert sind. In 1% der Fälle werden Personen zu spät ( $>30\text{s}$ ) informiert.

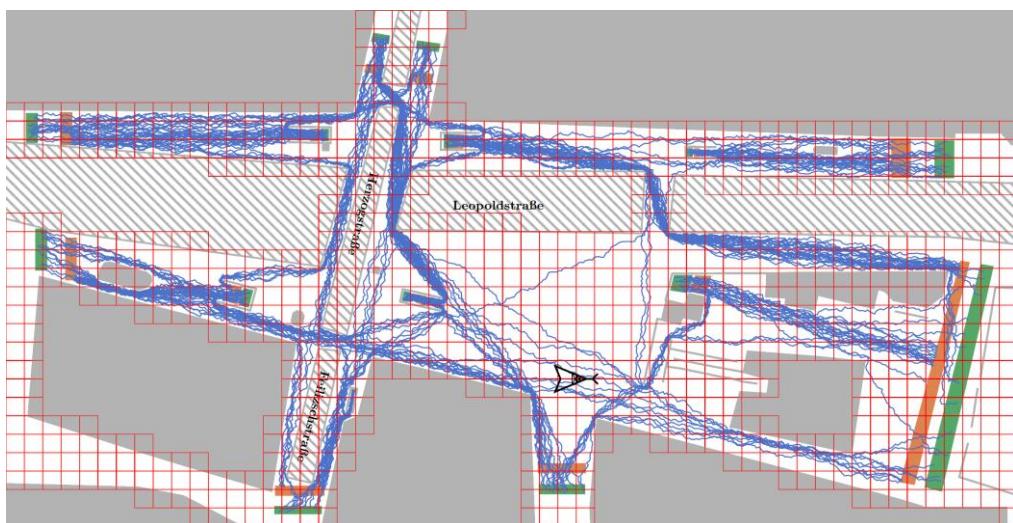
realistischen Verkehrssimulation konnte gezeigt werden, dass das Bereitstellen von Umleitinformation die Personendichte deutlich reduziert (siehe Abbildung 22), was die Sicherheit und den Reisekomfort verbessert. Durch die Kombination aus Online-Umfrage und Simulationsstudie konnten so wertvolle Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten gewonnen werden.



**Abbildung 22:** Personendichten in Abhängigkeit des Nachrichtendesigns für die beiden Gruppen aus der Online-Umfrage: Fußballfans und die Vergleichsgruppe. Ohne Umleitinformation (links/rechts: Boxplot 1), ist die Dichte über 1 Person/Quadratmeter. Durch das Bereitstellen von Umleitinformation sinkt die Dichte.

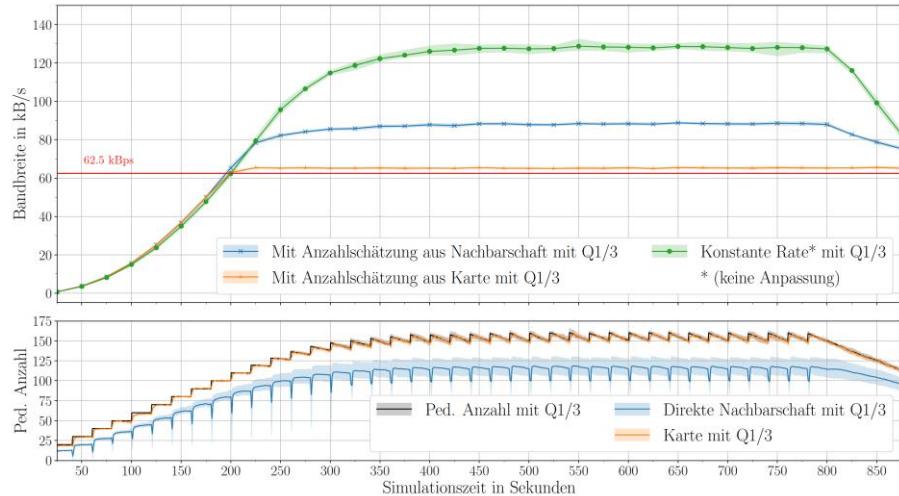
#### *Simulationsstudie zu Aggregationsalgorithmen für die adaptive, dezentrale Kommunikation*

Für die Simulationsstudie zur Analyse, Einstellung und Vergleich von Aggregationsalgorithmen für die Pedestrian Density Map, wurde auf die Szenarien an der Münchener Freiheit zurückgegriffen. In Abbildung 23 ist der Simulationsbereich zu sehen, mit überlagertem Raster der Dichtekarte (rote Quadrate), sowie den Pfaden, die die Fußgänger zurück gelegt haben. Für den Aggregationsschritt wurde ein kombiniertes Auswahlverfahren entwickelt, welches das Alter der Nachrichten, sowie die Distanz der messenden Person berücksichtigt. Grundlegende Annahme dabei ist, dass neue Messungen von Personen nahe an der gemessenen Stelle eine höhere Genauigkeit aufweisen und daher bevorzugt werden sollten. Die Verfahren und Ergebnisse der Simulationsstudie wurden in einem Journal-Artikel [9] publiziert.



**Abbildung 23:** Modelliertes Szenario an der Münchener Freiheit bei der Simulationsstudie zur Dezentralen Dichtekarte. (blau: Trajektorien der Fußgänger, rot: Raster der Dichtekarte)

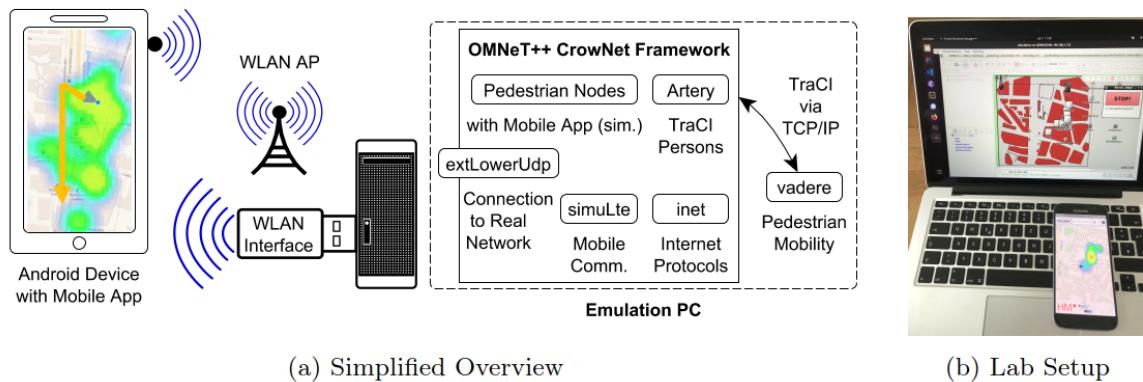
In einer erweiternden Studie wurde die Lastregulierung für einzelne sowie mehrere Basisstationen untersucht, um sicher zu stellen, dass die Anwendungen eine vorgegebene Bandbreitengrenze einhalten. Hierbei ist herauszustellen, dass sowohl der Algorithmus zur Lastregulierung wie auch die Dichtekarte selbst, komplett dezentral auf den Endgeräten ausgeführt wird. Diese kommen somit ohne eine zentrale Steuerung aus. In Abbildung 24 ist das Anpassungsverhalten des Lastregulierungsalgorithmus über die Zeit erkennbar, wobei die grüne Kurve keine Regelung enthält und lediglich durch die Anzahl der Personen in der Simulation bestimmt ist. Hingegen zeigen die blaue und orange Kurve eine klare Anpassung der verwendeten Datenrate, hin zur Zielrate die mit rot gekennzeichnet ist. Die beste Anpassung in der Lastregelung wird erreicht, wenn die Inhalte der Personendichtekarte für die Regelung herangezogen werden.



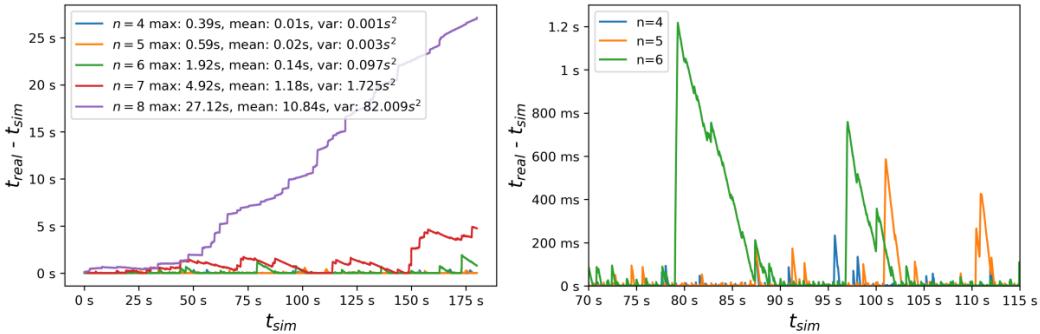
**Abbildung 24: Vergleich unterschiedlicher Ansätze der Lastregulierung zur Beschränkung der genutzten Bandbreite. Die Nutzung der dezentralen Personendichtekarte führt zu einer deutlich besseren Adaption.**

#### Visualisierung und Demonstrator

Neben den Visualisierungen von über den roVer Kommunikationsansatz verbreiteten Informationen in der Kartenansicht (vergl. II.1.3, Abbildung 9) wurde eine Emulationsumgebung entwickelt, welche es erlaubt, eine mobile Anwendung auf einem Smartphone in einer in Realzeit emulierten Umgebung zu testen. Hierfür wurde das ursprünglich für die Simulation entwickelte CrowNet Framework auf einem Emulationsrechner ausgeführt, welcher dann über eine WLAN-Schnittstelle mit der auf dem Smartphone laufenden Mobilitätsapplikation kommuniziert, siehe Abbildung 25. Für Demonstrationszwecke können so die innerhalb der Emulationsumgebung ermittelten Informationen auf dem Smartphone dargestellt und die roVer Ansätze erlebbar gemacht werden. Die demonstrierbaren Szenarien sind dabei allerdings auf wenige mobile Teilnehmer beschränkt, da es aufgrund der relativ hohen Komplexität des Simulationsmodells bereits ab etwa sechs simulierten Knoten zu deutlichen Abweichungen (Offsets) zwischen der simulierten und der realen Zeit kommt. Diese neuartige Art der Kopplung wurden im Rahmen einer Konferenzpublikation veröffentlicht [19].



**Abbildung 25: Demonstrations- und Emulationsumgebung für die untersuchten Szenarien [19].**



**Abbildung 26:** Beispiel für eine Netzwerkemulation auf einem Low-End System zur Demonstration: beobachteter Offset zwischen Realzeit ( $t_{real}$ ) und Simulationsszeit ( $t_{sim}$ ) in Abhängigkeit von der Anzahl an simulierten Knoten  $n$ . Bereits ab sechs simulierten Knoten kommt es zu Offsets von über fünf Sekunden.



**Abbildung 27:** Beispiele für eine 3D-Visualisierung des Aussendens von Informationen über die Basisstation (links) sowie mehrerer direkter und zellularer Kommunikationsverbindungen (rechts).

Eine weitere Art der Darstellung wurde im Rahmen einer Abschlussarbeit (vergl. II.6.3) untersucht: eine 3D-Visualisierung von Simulationsszenarien in der 3D-Engine Unity (siehe Abbildung 27). Diese Art der Darstellung könnte langfristig eine interessante Option sein, um in Zukunft die Ergebnisse noch anschaulicher darzustellen, beispielweise im Rahmen einer 3D-Animation.

## II.1.6 AP 6: Dissemination der Ergebnisse

### Ziele

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Bekanntmachung und Diskussion der Projektergebnisse in der Scientific Community und der interessierten Öffentlichkeit.

### Erzielte Ergebnisse

Die Ergebnisse dieses Teilprojektes umfassen die wissenschaftliche Publikation der erzielten Ergebnisse, die Veröffentlichung des entwickelten Simulationsframeworks CrowNet als Open Source Projekt, die Diskussion der Projektergebnisse im Rahmen von Partnerworkshops sowie die allgemeine Öffentlichkeitsarbeit. Die erzielten Ergebnisse innerhalb dieser einzelnen Teilbereiche werden im Folgenden kurz zusammenfassend dargestellt.

Wissenschaftliche Publikationen waren – auch vor dem Hintergrund des Förderprogrammes mit dem Schwerpunkt kooperative Promotion – ein Kerngebiet dieses Arbeitspaketes. So wurden die Forschungsergebnisse der Arbeitspakete 2-5 (siehe II.1.2, II.1.3, II.1.4, II.1.5) in sechs Journal-Artikel in unterschiedlichen peer-reviewed Journals (open access) und sieben Konferenzbeiträgen publiziert, die entsprechende Auflistung der Beiträge findet sich im Abschnitt II.6. Hierbei wurde stets Wert darauf gelegt, eine Reproduzierbarkeit und Validierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, unter anderem auch durch eine Veröffentlichung der entsprechenden Softwarestände im Quelltext.

Da ein wesentliches Ergebnis des Projektes roVer in der Entwicklung des gekoppelten Simulationsframeworks CrowNet liegt und dieses langfristig eine Grundlage für weitere Forschungsprojekte in den Bereichen intelligente Mobilität, Fußgängerschutz durch Kommunikation und Lenkung von Personenströmen bilden kann, wurde diese von Beginn an als Open Source Lösung konzipiert. Bereits projektbegleitend wurden kontinuierlich Softwarestände über die Plattform „github“ veröffentlicht<sup>3</sup>, diese werden auch nach Projektende weiter gepflegt. Die Hochschule München strebt an, dieses Framework auch in weiteren Forschungsprojekten in diesen Themenbereichen zu nutzen und gemeinsam mit der Community weiterzuentwickeln.

Zur Diskussion der erzielten Ergebnisse mit den Projektpartnern Stadtwerke München und accu:rate fanden regelmäßige Treffen und Workshops statt (in der Regel vor Ort an der Hochschule München oder bei einzelnen Partnern, in der Corona-Zeit online). Für eine genaue Auflistung der einzelnen Treffen wird aus Platzgründen auf die entsprechenden Zwischenberichte verwiesen. Des Weiteren fanden zum Projektauftakt, zur Zwischenevaluation sowie zum Projektende umfangreiche Workshops an der Hochschule München mit breiter Beteiligung aller Projektpartner statt.

Ein weiterer Schwerpunkt war die Vernetzung innerhalb der beteiligten Hochschulen: Projektergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsinstitutes für Anwendungen des maschinellen Lernens und intelligenter Systeme<sup>4</sup> eingebracht, regelmäßig in den Forschungsgruppen der beiden für die kooperativen Promotionsverfahren beteiligten Institute der TU München (siehe I.2) vorgestellt und die entwickelten Software-Werkzeuge wurden bereits in Lehrveranstaltungen (z.B. der Angewandten Mathematik und der Vertiefungsfächer Netzwerke II und Mobile Netze) eingesetzt.

Darüber hinaus wurde eine Dissemination der Projektergebnisse durch Arbeitstreffen und Kooperationen sowohl international als auch national angestrebt: Ein mehrwöchiger Aufenthalt von C. Mayr, einer der beiden Doktorand:innen des Projektes, an der University of Edinburgh festigte die Kooperation mit der international renommierten Crowd-Forscherin Dr. Anne Templeton, in Arbeitstreffen mit der Technischen Hochschule Ingolstadt wurden Fragen der Modellierung der Funkkommunikation diskutiert, es fanden fachliche Austauschtreffen mit Kollegen der Bergischen Universität Wuppertal und mit der Forschungsgruppe um Prof. Dr. Armin Seyfried am Forschungszentrum Jülich statt. Über die Präsentation der roVer Ergebnisse auf Fachkonferenzen (Auflistung siehe II.6.1) hinaus nahmen Projektmitarbeiter:innen an internationalen Konferenzen und Austauschforen teil, z.B. Workshop on ICT based Collision Avoidance for VRUs 2019 (Kassel), IEEE Vehicular Networking Conference 2020, Traffic and Granular Flow 2022 (Indien) oder Pedestrian and Evacuation Conference 2023 (Niederlande). Ein intensiver fachlicher Austausch fand zudem mit Universitäten und Forschungseinrichtungen zum Thema der Modellierung statt, z.B. zum 5G Modell mit der Universität Pisa, Italien.

Neben der Dissemination der Ergebnisse in der fachlichen Gemeinschaft wurde im Rahmen dieses Arbeitspaketes auch die Information der interessierten Öffentlichkeit angestrebt. Hier wurden (s. Abbildung 28) Pressemitteilungen herausgegeben, im Hochschulmagazin „HM Forschungsnews“ in 9/22 der Artikel „Sicher zu Großveranstaltungen mit Mobilitätsinformationen in Echtzeit“ veröffentlicht, im VDI Magazin „Technik in Bayern“ der Artikel „5G-Technologie und Personenstromanalyse verbinden – Robust vernetzt für sichere Mobilität“



**Abbildung 28: Beispiele für die Wissenschaftskommunikation (interessierte Öffentlichkeit):** a) Kampagne zu 5G, b) Instagram-Talk, c) VDI Magazin „Technik in Bayern“, d) Forschungsvideo der Hochschulkommunikation auf Youtube ([https://www.youtube.com/watch?v=N\\_9kbby8kCI](https://www.youtube.com/watch?v=N_9kbby8kCI))

<sup>3</sup> Abrufbar unter <https://github.com/roVer-HM/crownet>

<sup>4</sup> Siehe <https://www.hm.edu/sites/iamlis>

im Jahr 2022 publiziert, sowie im Rahmen der Kampagne „Bayern spricht über 5G“ der Bayerischen Staatsregierung ein Webartikel und ein Instagram-Talk durchgeführt.

Darüber hinaus trugen noch zwei Auszeichnungen des Projektes zur Dissemination der Projektergebnisse bei: Der Projektpartner Stadtwerke München, wurde im Mai 2023 – auch wegen der hervorragenden Zusammenarbeit im Projekt roVer - mit dem „Oskar der Praxis“ der HM ausgezeichnet. Von wissenschaftlicher Seite wurde die Publikation zum Einfluss der Modellierung der Fußgängermobilität [18], siehe auch II.1.3, mit dem „Best Paper Award“ der internationalen Fachkonferenz UUNET 2022 ausgezeichnet.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine Dissemination der Projektergebnisse über ein breites Spektrum erreicht werden konnte – von Experten in der Scientific Community bis hin zur allgemeinen Öffentlichkeitsarbeit.

## **II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Vor dem Hintergrund des Förderprogrammes – welches als ein wesentliches Ziel die Qualifizierung des wissenschaftlichen Nachwuchses über kooperative Promotionen zum Ziel hat – ist es naheliegend, dass die Personalkosten wichtigste Position darstellen, was auch in der Gesamtzuwendungsübersicht deutlich wird: Etwa 75% der Gesamtzuwendung wurden für Personalkosten aufgewendet. Der Rest spaltete sich auf in Projektpauschale (20%), Dienstreisen (2%), allgemeine Verwaltungsausgaben und Publikationskosten (2%) und Laborausstattung (1%). Zum Zweck der notwendigen Erweiterung des Simulationsclusters sowie zur Beschaffung eines Tablets zur Durchführung der Passantenbefragung zur Wegewahl (siehe II.1.1) wurden Mittel nach Genehmigung durch den Projektträger geringfügig umverteilt.

## **II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die geleisteten Arbeiten und damit die entsprechenden Kosten waren notwendig und angemessen, da alle Ziele des Antrags erreicht und zum Teil übertroffen wurden. Die Verzögerung des Projekts ist der verspäteten Einstellung der Mitarbeiter und Corona-bedingten Einschränkungen geschuldet. Zusätzliche Kosten sind hierdurch jedoch nicht entstanden (kostenneutrale Laufzeitverlängerung).

### **II.3.1 Notwendigkeit der geleisteten Arbeit**

Die Notwendigkeit der geleisteten Arbeit ist sowohl aus Sicht der Wissenschaft als auch aus Sicht der Öffentlichen Förderung und des Bundes gegeben: Aus wissenschaftlicher Sicht bestand hinsichtlich der Untersuchung des Wirkungskreislaufs zwischen Mobilität einzelner Personen und dem Einfluss auf Funknetzwerke und die darüber verbreiteten Informationen eine wesentliche Forschungslücke, die insbesondere durch die zunehmende Vernetzung in intelligenten Verkehrssystemen stetig an Bedeutung gewinnt. Dies betraf sowohl die systematische Untersuchung relevanter Fragestellungen durch entsprechende Modelle und Parameterstudien als auch die freie Verfügbarkeit passender Softwarewerkzeuge.

Aus Sicht der öffentlichen Förderung ist die geleistete Arbeit aus zwei Gründen notwendig: Zum einen bildet die robuste intelligente Vernetzung von Verkehrsteilnehmern eine wichtige Basis für die Verbesserung der Effizienz und der Sicherheit sowohl im Bereich der individuellen Mobilität als auch im öffentlichen Personen(nah)verkehr. Da die in roVer untersuchten neuartigen Mechanismen über eine Nutzung der direkten Kommunikation, wie für neue Mobilfunknetze standardisiert, bisher nur unzureichend für diese Anwendungsfelder erforscht sind, treten typische wissenschaftlich-technische Risiken auf, die eine öffentliche Förderung dieser Basismechanismen erforderlich machen. Zum anderen ist die Qualifizierung entsprechender Fachkräfte im Zukunftsfeld der vernetzten, intelligenten Mobilität von immenser Bedeutung, was die Notwendigkeit der Förderung – gerade auch durch eine Förderlinie wie „IngenieurNachwuchs – Kooperative Promotion“ über welche dieses Projekt finanziert wurde – verdeutlicht.

Aus Sicht des Bundes ist die Gewährleistung einer geeigneten öffentlichen Infrastruktur zur Gewährleistung sicherer, effizienter und ressourcenschonender Mobilität eine der Kernaufgaben des Staates. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, diese Infrastruktur kontinuierlich weiterzuentwickeln und neue Verfahren und Ansätze zu erforschend, möglichst mit Partnern aus Wirtschaft und Forschung.

## **II.3.2 Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Im Projekt roVer wurden anhand charakteristischer Szenarien und anhand von beispielhaften Anwendungen neue Methoden und Werkzeuge erforscht, die zu einer robusten Vernetzung in intelligenten Verkehrssystemen beitragen: Es wurde das neuartige gekoppelte Simulationswerkzeug CrowNet konzipiert und umgesetzt, welche die systematische Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Mobilität und drahtloser Kommunikation erlaubt, insbesondere auch in Szenarien mit Fußgängern und Personenströmen. Mit Hilfe dieses Werkzeugs wurden durch Parameterstudien die Szenarien untersucht und neue Verfahren zur adaptiven Informationsverbreitung und zur Lenkung von Personenströmen untersucht. Diese bilden eine Grundlage für eine Vielzahl weiterer Anwendungen, beispielsweise zur Auslegung und Steuerung des ÖPNV, zur Lenkung von Personenströmen auf Großveranstaltungen oder bei Gefährdungslagen, oder zur Verbesserung der individuellen Mobilität und Verkehrssicherheit. Daher ist aus Sicht der Hochschule München und der Projektpartner die Angemessenheit der geleisteten Arbeit eindeutig gewährleistet.

## **II.4 Voraussichtlicher Nutzen**

### **II.4.1 Wissenschaftliche Verbreitung der erzielten Ergebnisse**

Die wissenschaftliche Verbreitung der erzielten Ergebnisse wurde im Rahmen eines eigenen Arbeitspaketes (vergl. II.1.6) explizit gefördert. So konnte auf nationaler und internationaler Ebene eine breite Vernetzung erreicht werden. Wie bereits oben im Abschnitt zum Arbeitspaket dargestellt, wurden die Ergebnisse mit einer Vielzahl an Partnern diskutiert und sehr positiv aufgenommen.

Das in roVer entwickelte Simulationsframework CrowNet ist für die wissenschaftliche Gemeinschaft offen (open-source) und frei über die Softwareaustauschplattform github verfügbar, um die Chancen auf Verwertung zu erhöhen. Um den Einstieg für externe Nutzer:innen zu erleichtern, wurde eine ausführliche Dokumentation erstellt. Ein Installationsskript hilft bei der erstmaligen Einrichtung des Systems. Um die Einrichtungsaufwand weiter zu reduzieren, können CrowNet-Nutzer die für Simulationen benötigten Container (docker images) von github direkt herunterladen ohne diese selbst erstellen zu müssen. Dies gewährleistet zudem eine einfache Reproduzierbarkeit der in roVer durchgeführten Simulationsstudien, beispielsweise falls andere Forschende diese als Grundlage für eigene Arbeiten nutzen. Im Projektverlauf gab es bereits mehrere Anfragen von unterschiedlichen internationalen Forschungseinrichtungen sowie einige Hinweise zur Verbesserung des Frameworks, was ein hohes Interesse der wissenschaftlichen Community an entsprechenden Werkzeugen zeigt.

Im Laufe des Projekts wurden zahlreiche externe Simulatoren in CrowNet eingebunden und durch neue Funktionalitäten erweitert. Diese externen Simulatoren werden bereits heute von einer großen Forschungsgemeinschaft genutzt. Die in roVer entwickelten Erweiterungen dieser externen Simulatoren wurden mittlerweile von den Entwicklern übernommen. Dadurch kann eine große Anzahl an Nutzer:innen die in roVer entstandenen Erweiterungen verwerten.

Die in roVer entwickelten Verfahren, beispielsweise zur Generierung von dezentralen Personendichtekarten oder zur Lenkung von Personenströmen wurden auf internationalen Fachkonferenzen und in einer Vielzahl an Journal-Artikeln einem breiten Kreis von Wissenschaftler:innen zugänglich gemacht, eine detaillierte Auflistung befindet sich in Abschnitt II.6.

### **II.4.2 Verbesserung der Lehre**

Die Hochschule München strebt eine enge Verzahnung der angewandten Forschung mit der Lehre an. Dies zeigt sich auch daran, dass die Studierenden bereits während des Projektverlaufs über unterschiedliche Formen am Projekt roVer beteiligt waren:

- Forschendes Lernen – Studentische Projekte: Projektseminar im WS 20/21 mit Zählexperiment zu Personenströmen an der Haltestelle „Münchener Freiheit“ (Prof. Gerta Köster, Christina Mayr): Hierbei zählten an zwei Nachmittagen (22./29.10.2020) Studierende Personenankünfte an verschiedenen Messlinien in der Münchener Freiheit. Nachfolgend wurden die Messungen von den Studierenden ausgewertet und dienen nun zur realistischen Parametrisierung der in roVer untersuchten Szenarien.

- Master of Applied Research in Engineering Sciences: Dieser Master ermöglicht Studierenden, sich bereits während ihres Master-Studiums mit (Teil-)Projekten eines Forschungsprojektes auseinanderzusetzen. In roVer waren Studierende dieses Studiengangs beispielsweise beim Aufbau der Experimentalplattform, bei der Erforschung von Grundlagen zur Nachrichtenpriorisierung und bei der Untersuchung des Einflusses der ETSI Clusteringverfahren beteiligt (siehe II.1.3).
- Nutzung der roVer Simulatoren CrowNet und Vadere: Diese im Rahmen von roVer neu bzw. weiterentwickelten Simulatoren werden seit mehreren Jahren auch in der Lehre genutzt, beispielsweise in den Veranstaltungen „Projektstudium Modellierungsseminar“ im Bachelor Data Science und Scientific Computing, „Netzwerke II“ im Bachelor Informatik und „Modellbildung und Simulation“ sowie „Mobile Netze“ im Master Informatik.
- Abschlussarbeiten: Vom Forschungsprojekt roVer profitierte eine Vielzahl von Studierenden durch forschungsnahe Themenstellungen für Abschlussarbeiten in den Studiengängen Bachelor Informatik und Master Informatik. Eine detaillierte Aufstellung der erstellten Abschlussarbeiten findet sich in Abschnitt II.6.3.
- Dissertationen: Im Rahmen des Projektes entstanden zwei Dissertationen (Abschluss des Promotionsverfahrens geplant im März 2024) in Kooperation mit der TU München.

#### **II.4.3 Nutzung im Rahmen der Forschung**

Das Forschungsprojekt roVer ist an der Hochschule München am Forschungsinstitut für Anwendungen des maschinellen Lernens und intelligenter Systeme in der Forschungssäule „Connected Mobility“ angesiedelt. Hierüber erfolgt eine fakultätsübergreifende Vernetzung mit dem Ziel, Synergien zu nutzen und gemeinsam Forschung zu intensivieren. Die im Projektverlauf gewonnenen Erkenntnisse zum Wirkungskreislauf Mobilität-Funkvernetzung-Informationsverbreitung – und dabei insbesondere die neu entwickelten Verfahren zur Generierung dezentraler Personendichtekarten, den darauf basierenden Informationsverbreitungs- und Personenlenkungsverfahren – sind eine vielversprechende Basis für weitere Forschungsaktivitäten sowohl an der Hochschule München als auch an anderen Forschungsinstituten. Dies gilt insbesondere auch für die in roVer entwickelten Modellierungs- und Simulationswerkzeuge, die auch für andere Forschungsbereiche, in denen detaillierte Fußgängerbewegungsmodelle mit Funkkommunikation zusammenkommen, z.B. im Bereich des Fußgängerschutzes durch aktive Funkkommunikation.

#### **II.4.4 Verwertbarkeit im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Eine Verwertung im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans findet seitens der Hochschule über die Weiterentwicklung und Nutzung des Simulationswerkzeuges CrowNet für Forschung und Lehre statt. Die entwickelten Modelle und deren Implementierung bilden die Grundlage für weitere Forschungsarbeiten im Bereich der Personenstromanalyse und der intelligenten Mobilität. Seitens des Projektpartners Stadtwerke München findet eine Verwertung der Erkenntnisse bei der Planung und der technischen Ausstattung von Verkehrsknotenpunkten und der Ausrüstung von Mitarbeiter:innen statt. Der Projektpartner accu:rate evaluiert im Augenblick die Erschließung der Funknetzplanung als neues Geschäftsfeld für die Simulationswerkzeuge des Unternehmens.

#### **II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Während der Projektlaufzeit wurden seitens der ETSI die bereits im Abschnitt II.1.3 erwähnten Verfahren für Vulnerable Road User Awareness (VAMs) standardisiert. Diese wurden noch im Projektverlauf für die Modellierung der Funkkommunikation mitberücksichtigt und werden vom roVer Simulationsframework seit 2021 mit unterstützt. Insgesamt war über die Projektlaufzeit ein deutlich steigendes Interesse an der in roVer modellierten drahtlosen Fußgängerkommunikation zu verzeichnen, was sich unter anderem in der steigenden Anzahl entsprechender Fachkonferenzen und Publikationen äußerte. Im Augenblick liegt der Schwerpunkt der verwandten Arbeiten jedoch bei der Frage des Unfallvermeidung. Die Nutzung der direkten Kommunikation für eine effizientere Mobilität und Lenkung von Personenströmen, wie sie den Schwerpunkt des Projektes roVer bildet, ist von anderen Stellen bisher nicht bekannt.

Die Umleitung von Personen mithilfe von Mobilfunk-Applikationen hat über die Projektlaufzeit ebenfalls zunehmend Aufmerksamkeit in der Forschung bekommen. Der in Japan forschende Crowd-Wissenschaftler Dr. Claudio Feliciani untersuchte das Leiten von Menschenmengen mithilfe von Smartphones in Laborexperimenten [20] und stellte seine Ergebnisse auf der virtuellen Pedestrian and Evacuation (PED) Konferenz 2021 vor. Christina Mayr trug auf der zwei Jahre später stattfindenden Folge-Veranstaltung über die menschliche Reaktion auf Routenempfehlungen und die daraus resultierenden Personenflüsse vor. Dadurch wurde der bereits bestehende Kontakt zu Dr. Yunhe Tong, University of Edinburgh, vertieft, der seine Forschung zur Modellierung der menschlichen Reaktion auf Christina Mayrs Arbeit aufbauen möchte.

Darüber hinaus sind dem ZE keine weiteren Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bekannt.

## II.6 Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen

### II.6.1 Erfolgte Veröffentlichungen

#### Journal Veröffentlichungen (chronologisch)

C. M. Mayr und G. Köster, „Social distancing with the Optimal Steps Model,“ Collective Dynamics, Bd. 6, 2021. DOI: [10.17815/CD.2021.116](https://doi.org/10.17815/CD.2021.116)

C. M. Mayr, S. Schuhbäck, L. Wischhof und G. Köster, „Analysis of information dissemination through direct communication in a moving crowd,“ Safety Science, Bd. 142, p. 105386, 2021. DOI: [10.1016/j.ssci.2021.105386](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105386)

C. M. Mayr und G. Köster, „Guiding crowds when facing limited compliance: Simulating strategies,“ PLOS ONE, Bd. 17, p. 1–24, November 2022. DOI: [10.1371/journal.pone.0276229](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276229)

C. M. Mayr, A. Templeton und G. Köster, „Designing mobile application messages to impact route choice: A survey and simulation study,“ PLOS ONE, Bd. 18, p. 1–20, April 2023. DOI: [10.1371/journal.pone.0284540](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0284540)

S. Schuhbäck, L. Wischhof und J. Ott, „Cellular Sidelink Enabled Decentralized Pedestrian Sensing,“ IEEE Access, Bd. 11, p. 13349–13369, 2023. DOI: [10.1109/access.2023.3242946](https://doi.org/10.1109/access.2023.3242946)

L. Wischhof, M. Kilian, S. Schuhbäck, M. Rupp, G. Köster. Mobility in pedestrian communication simulations: Impact of microscopic models and solutions for integration, Computer Communications, Oct. 2023. DOI: [10.1016/j.comcom.2023.09.029](https://doi.org/10.1016/j.comcom.2023.09.029)

#### Konferenzen und Proceedings (chronologisch)

S. Schuhbäck, N. Daßler, L. Wischhof und G. Köster, „Towards a Bidirectional Coupling of Pedestrian Dynamics and Mobile Communication Simulation,“ in Proceedings of the OMNeT++ Community Summit 2019, 2019. DOI: [10.29007/nnfj](https://doi.org/10.29007/nnfj)

L. Wischhof, F. Schaipp, S. Schuhbäck und G. Köster, „Simulation vs. Testbed: Small Scale Experimental Validation of an Open-Source LTE-A Model,“ in Proceedings of the IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2020), 2020. DOI: [10.1109/pimrc48278.2020.9217163](https://doi.org/10.1109/pimrc48278.2020.9217163)

M. Rupp, S. Schuhbäck und L. Wischhof, „Coupling Microscopic Mobility and Mobile Network Emulation for Pedestrian Communication Applications,“ CoRR, Bd. abs/2109.12018, 2021. DOI: [abs/2109.12018v1](https://doi.org/abs/2109.12018v1)

S. Schuhbäck und L. Wischhof, „Decentralized Pedestrian Density Maps Based On Sidelink Communication,“ in ICC 2021 - 2021 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2021. DOI: [10.1109/iccworkshops50388.2021.9473545](https://doi.org/10.1109/iccworkshops50388.2021.9473545)

L. Wischhof, M. Kilian, S. Schuhbäck und G. Köster, „On the Influence of Microscopic Mobility in Modelling Pedestrian Communication,“ in Proc. of 7th International Symposium on Ubiquitous Networking (UNet'22), 2022. DOI: [10.1007/978-3-031-29419-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-29419-8_1)

M. Rupp und L. Wischhof, „Prioritization for Latency Reduction in 5G MEC-Based VRU Protection Systems,“ in 2022 18th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2022. DOI: [10.1109/wimob55322.2022.9941690](https://doi.org/10.1109/wimob55322.2022.9941690)

M. Rupp und L. Wischhof, „Evaluation of the Effectiveness of Vulnerable Road User Clustering in C-V2X Systems,“ in 2023 IEEE International Conference on Omni-layer Intelligent Systems (COINS), 2023. DOI: [10.1109/COINS57856.2023.10189204](https://doi.org/10.1109/COINS57856.2023.10189204)

## II.6.2 Geplante Veröffentlichungen

Preprint-Bereich (chronologisch)

Christina Mayr und Gerta Köster, Social distancing with the Optimal Steps Model, arXiv, 2020, [arxiv.org/abs/2007.01634](https://arxiv.org/abs/2007.01634)

M. Rupp, L. Wischhof und, S. Schuhbäck, „5G Sidelink for Vulnerable Road User Awareness: On Benefits and Drawbacks of Clustering“, eingereicht Q4/23 bei IEEE Access (noch in Begutachtung)

## II.6.3 Abschlussarbeiten

Neben den beiden im Projekt durchgeführten kooperativen Promotionsverfahren wurden an der Hochschule München eine Reihe an Abschlussarbeiten in den Studiengängen Bachelor Informatik, Master Informatik und Master of Applied Research durchgeführt. Diese trugen wesentlich zum Projektfortschritt bei und ermöglichen den Studierenden eine Mitarbeit an einem aktuellen Forschungsthema.

*Bachelor Informatik (chronologisch)*

T. Klein, Untersuchung eines neuen Physical Layer Simulationsansatzes anhand von Beispiel-Szenarien im Rahmen des Forschungsprojektes rover, 2020.

M. Tripolt, Sammlung anonymisierter Bewegungsdaten- und Coverage-Profile für Forschungszwecke, 2020.

M. Rupp, Mobile App for Experimental Measurement and Display of Person Density, 2021.

M. Hertle, Guiding of Crowds at the “Münchener Freiheit”: Concretization and Further Development of a Simulation Model, 2022.

M. Vogginger, Relevanz von Network Slicing bei 5G-SA hinsichtlich des autonomen Fahrens (V2X), 2023.

S. Kiunke, Design and Implementation of a 3D Simulation for the Representation of People Flows and 5G Network Communication in Unity, 2023.

P. Eschrich, Konzeption, prototypische Implementierung und Evaluierung eines Frameworks zur Verteilung von gekoppelten Funk- und Mobilitätssimulationen in einem Cluster, 2023.

*Master Informatik (chronologisch)*

L. Grigoryev, Analyse und Erweiterung des LTE eNodeB Schedulers in der Open-Source Mobilfunkumgebung OpenAirInterface, 2019.

M. Kilian: Analyzing the impact of different mobility models on informationdissemination for pedestrian communication in urban environments, 2021.

S. Benz: Investigation of Direct Pedestrian Communication with 5G: Vulnerable Road User Awareness, 2022.

*Master of Applied Research (Forschungsmaster, chronologisch)*

F. Schaipp, Analyse und Optimierung bei der Übertragung von Cooperative Awareness Messages über ein Open Source LTE Netz sowie der Vergleich über eine Open Source LTE-V2X PC5 Schnittstelle, 2020.

M. Rupp, Clustering of Vulnerable Road Users in Cellular Vehicular Communication Systems, 2023.

### **III ERFOLGSKONTROLLBERICHT**

(wird nicht veröffentlicht, separates Dokument)

## BERICHTSBLATT

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) <b>Schlussbericht</b>	
3. Titel <b>Leistungsfähigere Verkehrsinfrastrukturen durch robuste Vernetzung (roVer): Schlussbericht – Kurzbericht und eingehende Darstellung</b>		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prof. Dr. Köster, Gerta Prof. Dr. Wischhof, Lars Mayr, Christina Maria Schuhbäck, Stefan		5. Abschlussdatum des Vorhabens <b>30.09.2023</b>
		6. Veröffentlichungsdatum <b>Dezember 2023</b>
		7. Form der Publikation <b>Schlussbericht (elektronisch)</b>
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Hochschule München Fakultät für Informatik und Mathematik Lothstraße 64 80335 München		9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
		10. Förderkennzeichen <b>13FH669IX6</b>
		11. Seitenzahl <b>32</b>
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		13. Literaturangaben <b>23</b>
		14. Tabellen <b>1</b>
		15. Abbildungen <b>28</b>
16. Zusätzliche Angaben -		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -		
18. Kurzfassung Aktuelle Mobilfunkstandards wie 5G oder die ETSI-Standards für kooperative Wahrnehmung (Cooperative Awareness) erlauben einen Informationsaustausch zwischen mobilen Personen und Fahrzeugen zur Steigerung von Verkehrssicherheit und -effizienz. Dabei ist eine wesentliche Herausforderung, dass drahtlos übertragene Informationen das Verhalten von Verkehrsteilnehmern beeinflussen, was wiederum die Kommunikationsinfrastruktur beeinflusst – im lokalen Überlastfall bis hin zu einem vollständigen Ausfall der Kommunikation. Im Projekt roVer wurde daher konkret die Wechselwirkung zwischen dem Mobilitätsverhalten von Verkehrsteilnehmern und drahtloser Vernetzung untersucht. Anhand charakteristischer Mobilitätsszenarien wurden dann geeignete Verfahren für eine robuste Vernetzung und Informationsverbreitung entwickelt. Wesentliches Projektergebnis ist zum einen die Schaffung eines neuartigen Simulationswerkzeugs welches Personenstrom- und Mobilfunkt simulation koppelt, um die Wechselwirkung von Menschenmengen und drahtloser Vernetzung untersuchen zu können. Zum anderen wurde eine Untersuchung charakteristischer, multi-modaler Verkehrssituationen durchgeführt, bei denen auch Fußgänger am Verkehr teilnehmen, Mobilitätsinformationen generieren und verbreiten. Des Weiteren wurde ein neuartiges Verfahren entwickelt, welches eine dezentrale Generierung hochaktueller Personendichtekarten erlaubt. Auf Grundlage dieser Dichtekarten erfolgt dann die Lenkung von Personenströmen, beispielsweise durch dynamische Wegempfehlungen.		
19. Schlagwörter <b>intelligente Mobilität, Personenstromsimulation, Fußgängerkommunikation, Fahrzeugkommunikation</b>		
20. Verlag <b>ohne / Eigenveröffentlichung</b>	21. Preis <b>kostenlos</b>	

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] C. M. Mayr, A. Templeton und G. Köster, „Designing mobile application messages to impact route choice: A survey and simulation study,“ *PLOS ONE*, Bd. 18, p. 1–20, April 2023.
- [2] U. Möncke, „Rechtsfragen des roVer-Projekts und eines roVer-basierten Verkehrsleitdienstes,“ 2023. online abrufbar <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bvb:m347-opus-4753>
- [3] C. M. Mayr, S. Schuhbäck, L. Wischhof und G. Köster, „Analysis of information dissemination through direct communication in a moving crowd,“ *Safety Science*, Bd. 142, p. 105386, 2021.
- [4] C. M. Mayr und G. Köster, „Guiding crowds when facing limited compliance: Simulating strategies,“ *PLOS ONE*, Bd. 17, p. 1–24, November 2022.
- [5] G. Nardini, A. Virdis und G. Stea, „Modeling Network-Controlled Device-to-Device Communications in SimuLTE,“ *Sensors*, Bd. 18, p. 3551, October 2018.
- [6] INET, *INET Framework - Open-Source OMNeT++ Model Suite for Wired, Wireless and Mobile Networks*, 2022.
- [7] G. Nardini, G. Stea., A. Virdis. und D. Sabella., „Simu5G: A System-level Simulator for 5G Networks,“ in *Proceedings of the 10th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications - SIMULTECH*, 2020.
- [8] L. Wischhof, F. Schaipp, S. Schuhbäck und G. Köster, „Simulation vs. Testbed: Small Scale Experimental Validation of an Open-Source LTE-A Model,“ in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2020)*, 2020.
- [9] S. Schuhbäck und L. Wischhof, „Decentralized Pedestrian Density Maps Based On Sidelink Communication,“ in *ICC 2021 - 2021 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2021.
- [10] S. Schuhbäck, L. Wischhof und J. Ott, „Cellular Sidelink Enabled Decentralized Pedestrian Sensing,“ *IEEE Access*, Bd. 11, p. 13349–13369, 2023.
- [11] M. Rupp und L. Wischhof, „Prioritization for Latency Reduction in 5G MEC-Based VRU Protection Systems,“ in *2022 18th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 2022.
- [12] ETSI, „TR 103 300-1 V2.3.1 (2022-11), Intelligent Transport System (ITS);Vulnerable Road Users (VRU) awareness;Part 1: Use Cases definition;Release 2,“ 2022.
- [13] ETSI, „TS 103 300-2 V2.2.1 (2021-04), Intelligent Transport System (ITS);Vulnerable Road Users (VRU) awareness;Part 2: Functional Architecture and Requirements definition;Release 2,“ 2021.
- [14] ETSI, „TS 103 300-3 V2.1.2 (2021-04), Intelligent Transport System (ITS);Vulnerable Road Users (VRU) awareness;Part 3: Specification of VRU awareness basic service;Release 2,“ 2021.
- [15] M. Rupp und L. Wischhof, „Evaluation of the Effectiveness of Vulnerable Road User Clustering in C-V2X Systems,“ in *2023 IEEE International Conference on Omni-layer Intelligent Systems (COINS)*, 2023.

- [16] S. Schuhbäck, N. Daßler, L. Wischhof und G. Köster, „Towards a Bidirectional Coupling of Pedestrian Dynamics and Mobile Communication Simulation,“ in *Proceedings of the OMNeT++ Community Summit 2019*, 2019.
- [17] B. Kleinmeier, B. Zönnchen, M. Gödel und G. Köster, „Vadere: An Open-Source Simulation Framework to Promote Interdisciplinary Understanding,“ *Collective Dynamics*, Bd. 4, 2019.
- [18] R. Riebl, H.-J. Gunther, C. Facchi und L. Wolf, „Artery: Extending Veins for VANET applications,“ in *2015 International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, 2015.
- [19] L. Wischhof, M. Kilian, S. Schuhbäck und G. Köster, „On the Influence of Microscopic Mobility in Modelling Pedestrian Communication,“ in *Proc. of 7th International Symposium on Ubiquitous Networking (UNet'22)*, 2022.
- [20] M. Rupp, S. Schuhbäck und L. Wischhof, „Coupling Microscopic Mobility and Mobile Network Emulation for Pedestrian Communication Applications,“ *CoRR*, Bd. abs/2109.12018, 2021.
- [21] C. Feliciani, H. Murakami, K. Shimura und K. Nishinari, „Efficiently informing crowds - Experiments and simulations on route choice and decision making in pedestrian crowds with wheelchair users,“ *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 114, p. 484–503, 2020.
- [22] C. M. Mayr und G. Köster, „Social distancing with the Optimal Steps Model,“ *Collective Dynamics*, Bd. 6, 2021.
- [23] C. M. Mayr und G. Köster, „Social distancing with the Optimal Steps Model,“ *arXiv*, 2020.