



Schwarmbasierte Mobilität im ländlichen Raum:

Anforderungen und Lösungsideen zur
integrierten Flotten- und Betriebsoptimierung

Abstract

Die Mobilitätswende ist eine der größten gesellschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit. Während im urbanen Raum zunehmend neue Mobilitätslösungen das bereits gute Angebot des öffentlichen Personennahverkehrs sinnvoll ergänzen, gestaltet sich in ländlichen Regionen die Transformation hin zu einem zukunftsfähigen Mobilitätssystem aktuell noch schwierig. Hier setzt das Projekt *NeMo.bil* an, mit dem Ziel ein schwarmbasiertes On-Demand-Mobilitätssystem für einen nachhaltigen und bedarfsgerechten Personen- und Warentransport zu

entwickeln. Diese Arbeit gibt einen Überblick auf dieses neue Mobilitätssystem, beschreibt die zu lösenden Optimierungsaufgaben zur Planung und Auslegung des Mobilitätssystems, ordnet das Planungsproblem in die bestehende Literatur ein und spezifiziert schließlich Anforderungen für die Entwicklung von Optimierungsansätzen und liefert konzeptionelle Überlegungen zu einem Lösungsansatz. Abschließend erfolgt ein Ausblick auf potenzielle Stoßrichtungen für die Forschung.



Inhalt

Transformation des Mobilitätssystems im ländlichen Raum	4
Ein schwarmbasiertes Mobilitätssystem für einen nachhaltigen und bedarfsgerechten Transport..	6
Funktionsweise des schwarmartigen Mobilitätssystems	6
Optimierungsaufgaben zur Planung und Auslegung des Mobilitätssystems.....	7
Stand der Technik.....	10
Analyse des Optimierungsproblems	12
Problembeschreibung und Einordnung in Problemklassen aus der Literatur	12
Randbedingungen der Planung.....	12
Nutzerspezifische, ökonomische und ökologische Kriterien zur Berücksichtigung in der Zielfunktion	14
Lösungsidee zur integrierten Planung.....	16
Zusammenfassung und Forschungsbedarf	18
Literatur	19

Impressum

Autor*innen

Dr. Lisa Kleinjohann
Universität Paderborn
E-Mail: lisa.kleinjohann@sicp.de

Dr. Christoph Weskamp
Universität Paderborn
E-Mail: weskamp@sicp.de

Satz und Design

FIR e. V. an der RWTH Aachen

Bildnachweise

S. 1 & 4: © ChatGPT
S. 2: © Finn – stock.adobe.com
S. 4: © NeMo.bil
S. 7: © Ekkarat_Studio – stock.adobe.com
S. 11: © Photography09 – stock.adobe.com
S. 14: © Lotti – stock.adobe.com

Lizenzbestimmung/Copyright

Open Access: Dieses Whitepaper wird unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International (CC BY-SA 4.0) veröffentlicht (creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de).



Projekt DiSerHub
FIR e. V. an der RWTH Aachen
Campus-Boulevard 55 | 52074 Aachen

E-Mail: projekt.DiSerHub@fir.rwth-aachen.de
diserhub.de

Transformation des Mobilitätssystems im ländlichen Raum

Die Mobilitätswende ist eine der größten gesellschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit. Nicht zuletzt der Klimawandel und die Alterung der Gesellschaft erfordern ein radikales Neudenken des heutigen Mobilitätssystems mit dem Ziel, dieses umweltfreundlicher, effizienter, nutzerfreundlicher und sozial gerechter zu gestalten. Dabei spielen neue Formen der vernetzten Mobilität eine zentrale Rolle, die im Vergleich zum klassischem Fahrzeugbesitz einige Vorteile bieten: Die sogenannten Shared-Mobility-Dienste¹, wie Car-Sharing oder Taxi-Ride-Sharing, ermöglichen Nutzern zeitlich begrenzten Zugang zu entsprechenden Verkehrsmitteln und bieten ihnen dabei Kosteneinsparungspotenziale und steigern die Nachhaltigkeit, indem individuelle Fahrzeuganschaffungen vermieden werden. On-Demand-Mobilitätsdienste² bedeuten für Nutzer flexible Mobilität auf

Nachfrage, ermöglichen im Fall von Tür-zu-Tür-Angeboten einen hohen Komfort und fördern mehr soziale Teilhabe. Bei Kombination des Angebots mit dem Prinzip Ride-Pooling werden Fahrten konsolidiert, wodurch sich die Auslastung von Fahrzeugen steigern und die Anzahl der Fahrten sowie die Fahrleistung insgesamt reduzieren lassen. Insbesondere in urbanen Ballungsräumen funktionieren solche Mobilitätsangebote in Kombination mit einem gut ausgebauten öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) bereits heute sehr gut und freuen sich daher bei ihren Nutzern über eine wachsende Beliebtheit.

Doch gerade im ländlichen Raum kann der ÖPNV in Kombination mit diesen neuen Mobilitätsdiensten das Potenzial zur Bündelung von Fahrten und zur Reduzierung des Verkehrsaufkommens heute weitge-



hend noch nicht ausschöpfen³. Die Ursache liegt in der niedrigen Siedlungsdichte, welche dazu führt, dass der Betrieb eines entsprechenden Angebots sehr teuer ist und er gleichzeitig aufgrund von langen Fahrt- und Wartezeiten eine schlechte Akzeptanz erfährt. Dies führt dazu, dass der motorisierte Individualverkehr (MIV) gerade in ländlichen Regionen die vorherrschende Mobilitätsform ist und in den letzten Jahren sogar noch an Bedeutung gewonnen hat⁴.

Hieraus resultiert die Frage, wie im ländlichen Raum die Transformation hin zu einem zukunftsfähigen Mobilitätssystem gelingen kann. Im Fokus soll dabei der Weg vom MIV zu einem nachhaltigen, kosteneffizienten und nutzerzentrierten On-Demand-Mobilitätssystem stehen. Im Projekt *NeMo.bil*, welches vom

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert wird, werden dazu die Potenziale eines neuen schwarmartigen Mobilitätssystems untersucht, um einen umweltfreundlichen und bedarfsgerechten Personentransport im ländlichen Raum zu ermöglichen. Im Projekt wird ein neuer systemischer Ansatz verfolgt, der aus kleinen automatisierten Fahrzeugen besteht, die in Schwärmen fahren können. Die erste und letzte Meile einer Fahrt werden in Form von Einzelfahrten in sogenannten *NeMo.Cabs* durchgeführt. Über längere Distanzen können sich die *NeMo.Cabs* zu einem Konvoi zusammenschließen, der dann von einem größeren automatisierten Fahrzeug (*NeMo.Pro*) gezogen wird. Die *NeMo.Pros* ermöglichen im Konvoi höhere Reichweiten und Geschwindigkeiten. Durch das Zusammenspiel der beiden Fahrzeugtypen soll das Gesamtsystem eine bisher unerreichte energetische Effizienz erlangen⁵.

Das schwarmartige Mobilitätssystem stellt eine neue Form von On-Demand-Mobilitätsangeboten dar und bietet damit das Potenzial für eine kosteneffiziente und nachhaltige Mobilität. Um dieses Potenzial zu nutzen, muss die Durchführung von Fahrten möglichst koordiniert erfolgen, was eine strategische und operative Systemplanung voraussetzt. Diese Arbeit spezifiziert die Anforderungen an eine solche Planung. Sie gibt zunächst einen Überblick über die Funktionsweise des Mobilitätssystems und das damit verbundene Optimierungsproblem. Das anschließende Kapitel fasst den Stand der Technik hinsichtlich der Optimierung von ähnlichen Mobilitätssystemen zusammen und stellt den Neuheitsgrad des Planungsproblems dar. Es folgt eine detaillierte Analyse des Optimierungsproblems mit Ableitung der Anforderungen an eine integrierte Flotten- und Betriebsplanung des schwarmartigen Mobilitätssystems. Konzeptionelle Überlegungen zu einem möglichen Lösungsansatz werden im darauf folgenden Kapitel vorgestellt. Die Arbeit schließt mit einem Ausblick auf zukünftige Forschungstätigkeiten.



Ein schwarmbasiertes Mobilitätssystem für einen nachhaltigen und bedarfsgerechten Transport

Funktionsweise des schwarmartigen Mobilitätssystems

Die Basis des Systems bilden zwei verschiedene, skalierbare Fahrzeuge, die sogenannten *NeMo.Cab*- und *NeMo.Pro*-Fahrzeuge, die im Schwarm vernetzt On-Demand Mobilitätsdienste erbringen (vgl. Abbildung 1). Das extrem leichte, autonom fahrende *NeMo.Cab* bedient als E-Fahrzeug im On-Demand-Betrieb die erste und letzte Meile für den Personen- und Warentransport und erlaubt damit einen Tür-zu-Tür-Transport. Das *NeMo.Cab* verfügt über eine geringere Ladekapazität und ist auf niedrige Geschwindigkeiten

ausgelegt. Für größere Distanzen und höhere Geschwindigkeiten, wie sie z. B. bei Überlandfahrten notwendig sind, werden mehrere *NeMo.Cab* mit einem *NeMo.Pro* zu einem Verbund gekoppelt. Das autonom fahrende *NeMo.Pro* ist mit Wasserstoff betrieben, realisiert damit eine höhere Antriebsleistung und ermöglicht schnellere Geschwindigkeiten. Durch die Konvoi-Fahrt wird der Luftwiderstand der hinterherfahrenden Fahrzeuge reduziert, wodurch sich der Energiebedarf des Gesamtsystems insgesamt verringert. Zudem fungiert das *NeMo.Pro* als mobile Ladestation für die *NeMo.Cabs*, sodass diese während der Fahrt geladen werden können. Mobili-

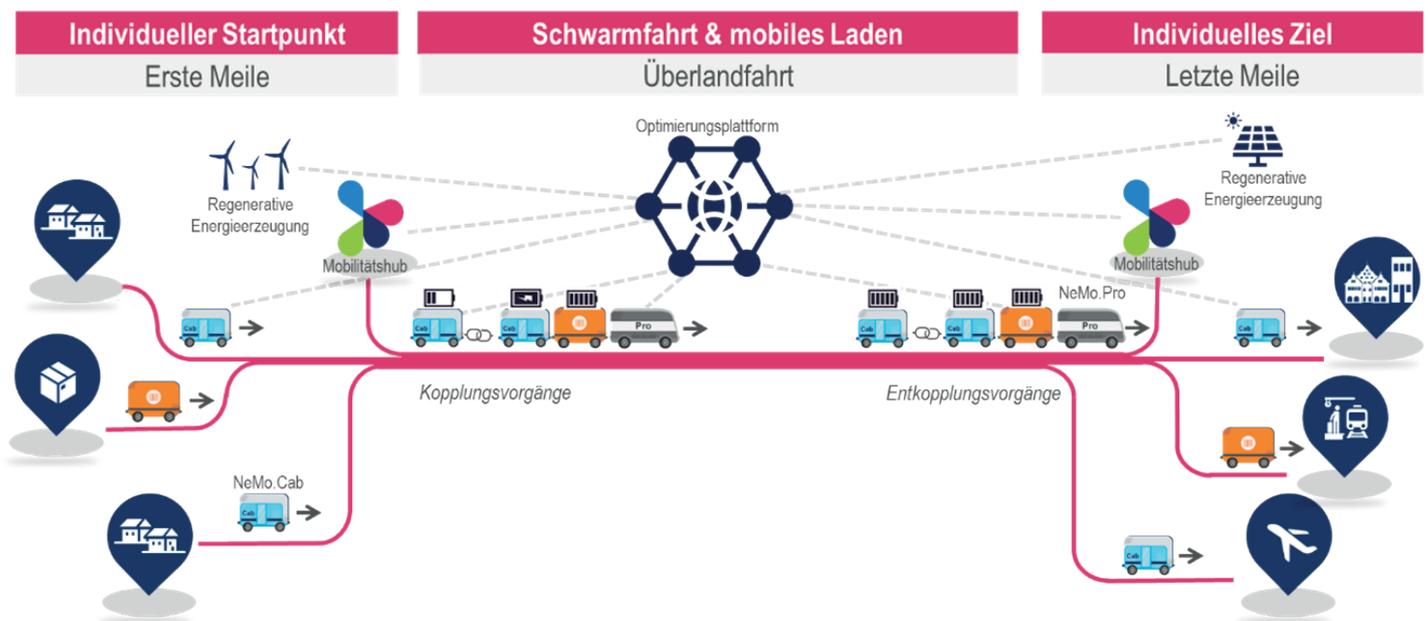
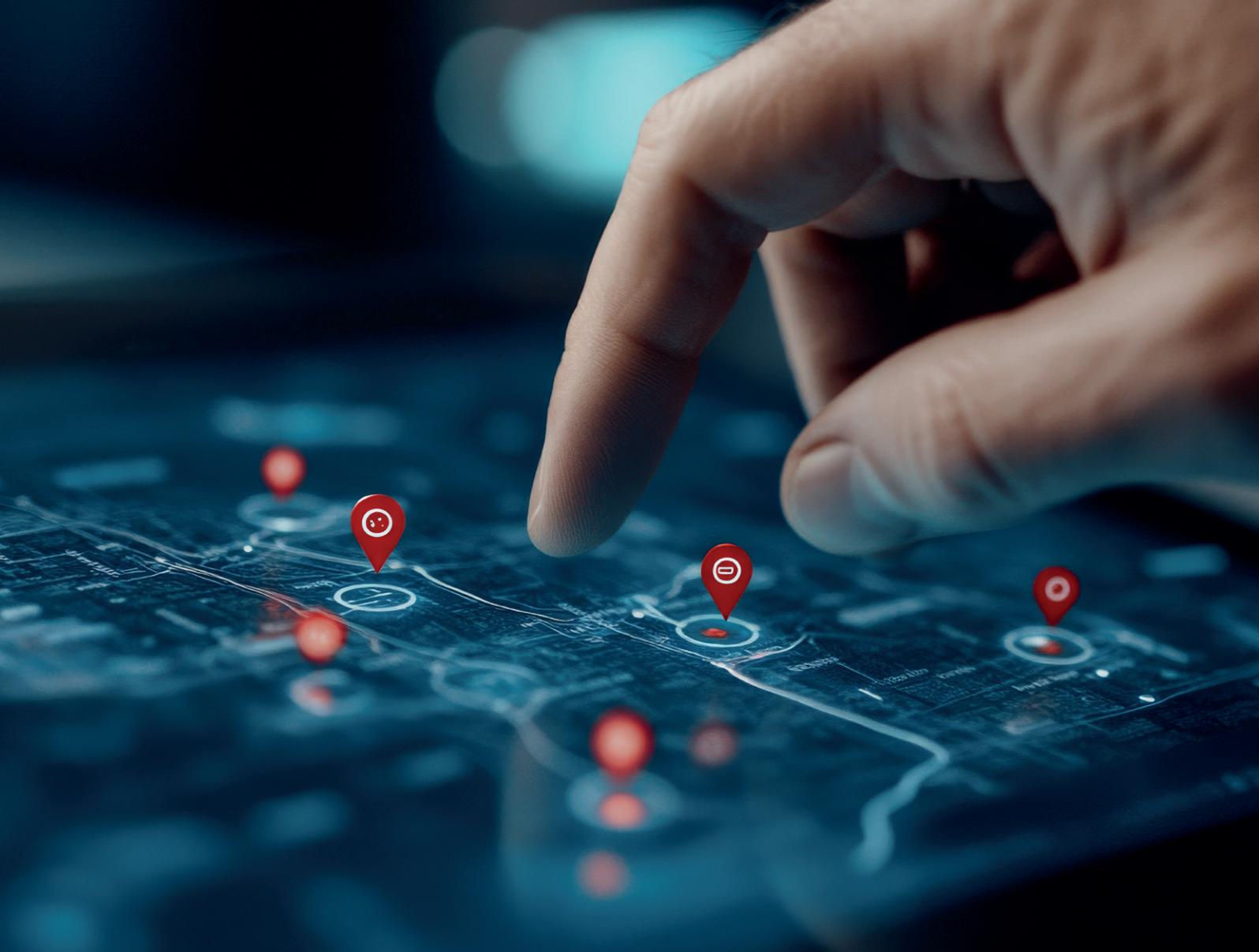


Abbildung 1: Konzeptionelle Darstellung des schwarmartigen Mobilitätssystems (in Anlehnung an⁵)



tätshubs stellen die nötige Infrastruktur zur Versorgung der *NeMo.Pro* mit Wasserstoff bereit. Zur nachhaltigen Energieversorgung sind die Mobilitätshubs an verschiedene regenerative Energiequellen angeschlossen⁵.

Optimierungsaufgaben zur Planung und Auslegung des Mobilitätssystems

Das schwarmartige Mobilitätssystem stellt eine neue Form von On-Demand-Mobilitätsangeboten dar und bietet damit zukünftig das Potenzial für eine kosteneffiziente und nachhaltige Mobilität. Insbesondere die Kombination von Konvoi- und Einzelfahrten bietet für den ländlichen Raum Chancen, den ÖPNV zu stärken. Um dieses Potenzial zu nutzen, muss die Durchführung von Fahrten möglichst koordiniert erfolgen, was eine strategische und operative Systemplanung voraussetzt. Dabei ist die Fra-

ge zu beantworten, wie das schwarmartige Mobilitätssystem mit den *NeMo.Pro*- und *NeMo.Cab*-Fahrzeugen für unterschiedliche Nutzungsszenarien effizient ausgelegt und betrieben werden kann. Dazu sind eine strategische Flottenplanung und eine operative Betriebsplanung notwendig. Im Folgenden wird ein Überblick über die dabei zu lösenden Planungsaufgaben gegeben. Die von Zardini et al. erstellte Problemklassifikation dient dabei als Grundlage⁶ und wird bezogen auf die neuen Herausforderungen des betrachteten schwarmbasierten Mobilitätssystems in dieser Arbeit erweitert.

Strategische Flottenplanung

Die strategische Flottenplanung umfasst die für die Auslegung des schwarmartigen Mobilitätssystems zu beantwortenden Fragestellungen zur Gestaltung der Fahrzeugeigenschaften (d. h. bspw. die verbaute

Batteriegröße in den *NeMo.Cabs*), Fragestellungen bezüglich der Gestaltung des Flottenportfolios (d. h. Anzahl der in einer Region benötigten Fahrzeuge) sowie Fragestellungen zur Auslegung der Mobilitätshubs (bspw. Standortwahl):

- **Gestaltung der technischen Fahrzeugeigenschaften:** Zunächst müssen die technischen Fahrzeugeigenschaften der *NeMo.Pros* und der *NeMo.Cabs* festgelegt werden. Dazu zählen die Antriebsleistung und damit die maximale Fahrzeuggeschwindigkeit. Für die *NeMo.Cabs* sind weiterhin die Batteriegröße und Transportkapazität (d. h. die Anzahl der Sitzplätze bzw. das Transportvolumen) festzulegen. Da die *NeMo.Pros* auch als mobile Ladesäule für die *NeMo.Cabs* dienen, ist zudem deren maximale Ladeleistung zu bestimmen.
- **Festlegen des Flottenportfolios:** Nachdem die technischen Fahrzeugeigenschaften definiert wurden, wird das Flottenportfolio festgelegt. Dabei wird die Anzahl an *NeMo.Pro*- und *NeMo.Cab*-Fahrzeugen bestimmt, die für die betrachtete Region angeschafft werden sollen. Aufgrund der Möglichkeit von Konvoifahrten ist insbesondere auch das Verhältnis der *NeMo.Pros* und *NeMo-Cabs* zueinander wichtig, sodass später ein möglichst optimaler Betrieb ermöglicht wird.
- **Auslegung der Mobilitätshubs (Infrastruktur):** Die Mobilitätshubs dienen als Umstiegspunkt auf andere Verkehrsmittel und gleichzeitig zur Versorgung der *NeMo-Pro-Fahrzeuge* mit Wasserstoff. Entsprechend muss eine adäquate Wasserstoffinfrastruktur bereitgestellt werden, deren Dimensionierung im Rahmen der Planung zu definieren ist. Zudem sind die Anzahl der Mobilitätshubs und der jeweilige Ort des Hubs im Rahmen der Planung festzulegen.

Operative Betriebsplanung

Die operative Betriebsplanung umfasst alle Planungsaufgaben zur Durchführung eines effizienten Betriebs des schwarmbasierten Mobilitätssystems. Dazu zählen die Fahrzeugdisposition, eine Routenplanung für die *NeMo.Pros* und *NeMo.Cabs* sowie eine zeitliche Ablaufplanung:

- **Fahrzeugdisposition, Routenplanung, Ablaufplanung:** Hier sind zunächst Fahrpläne für die Pro-Fahrzeuge bzw. Konvois zu ermitteln sowie anschließend eine integrierte Fahrzeugdisposition (Dispatching), Routenplanung (Routing) und Terminplanung für Tür-zu-Tür-Fahrtanfragen, die dynamisch an das Mobilitätssystem gestellt werden, durchzuführen. Diese müssen ebenfalls den ökonomischen, ökologischen und nutzerspezifischen Anforderungen gerecht werden. Dabei müssen Fahraufträge auf eine heterogene Fahrzeugflotte abgebildet sowie Touren und Zeiten für die Fahrzeuge festgelegt werden.
- **Repositionierung:** Die autonomen Fahrzeuge müssen designierte Parkräume / Depots anfahren, wenn sie keine Fahraufträge erfüllen. Die dadurch erforderlichen Leerfahrten müssen ebenfalls eingeplant werden und sollten die Fahrzeuge so repositionieren, dass zukünftiger Bedarf möglichst effizient bedient werden kann (Rebalancing).
- **Ride-Pooling:** Um die Auslastung der Fahrzeuge zu erhöhen und damit Kosten und Energieverbrauch zu senken, sollen potentiell überlappende Fahrtanfragen gebündelt und durch dasselbe Fahrzeug erfüllt werden. Dazu muss bei der Routenplanung geprüft werden, ob es durch geringe Umwege möglich ist, weitere Personen auf einer Fahrstrecke aufzunehmen und Teile der Fahrt gemeinsam durchzuführen.

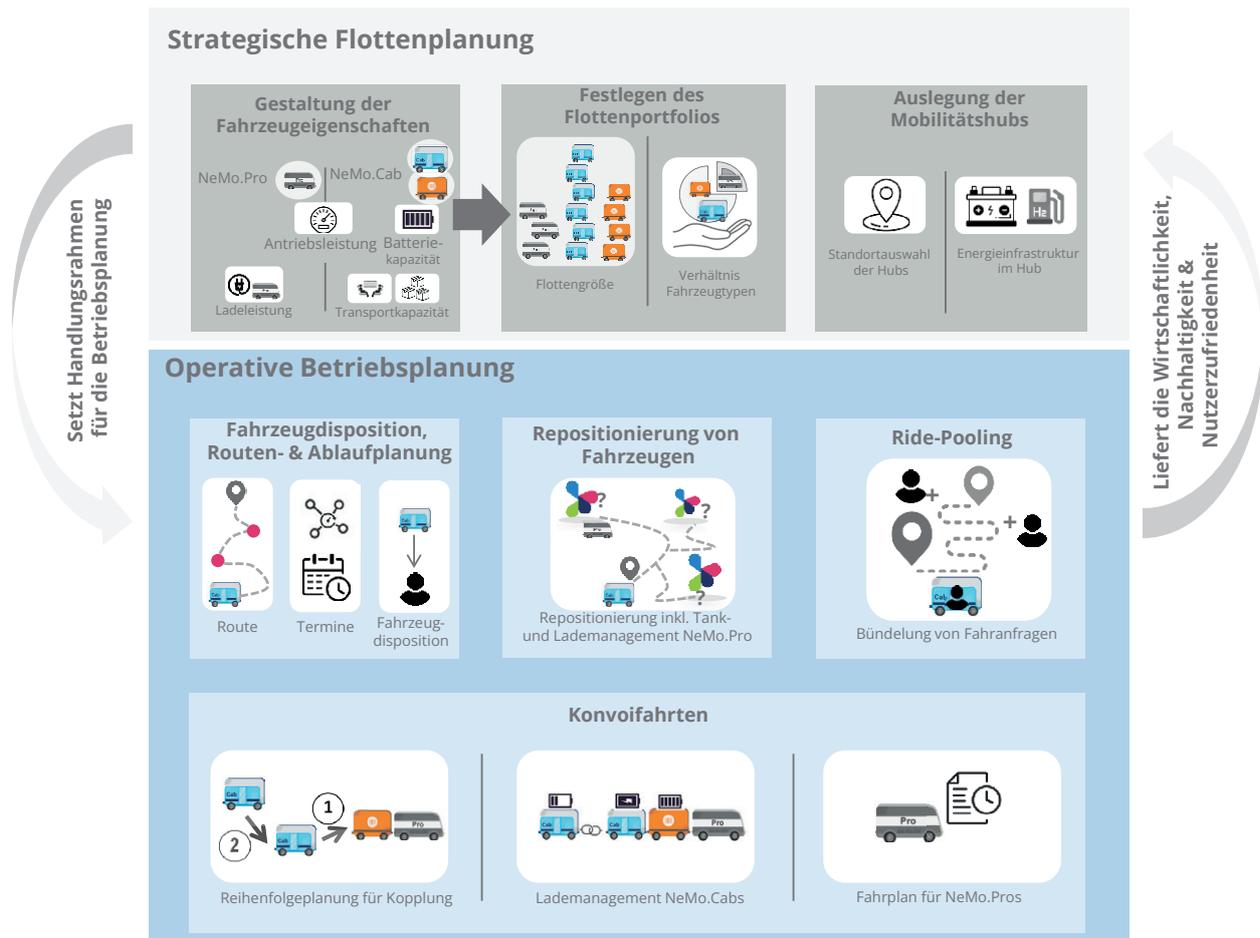


Abbildung 2: Übersicht der Planungsaufgaben für die Flotten- und Betriebsplanung des schwarmbasierten Mobilitätssystems

- Konvoifahrten:** Über die von Zardini et al. beschriebenen Problemklassen von Planungsaufgaben⁶ hinaus, muss für das hier betrachtete Mobilitätssystem insbesondere die Bildung von Schwärmen (Konvois) aus einem *NeMo.Pro* und mehreren *NeMo.Cabs* mit berücksichtigt werden inklusive der Reihung von *NeMo.Cabs* in Abhängigkeit von ihren jeweiligen Routen und deren entsprechenden Ein- und Auskoppelpunkten. Da die *NeMo.Cabs* während der Konvoifahrt von den *NeMo.Pros* aufgeladen werden sollen, müssen auch die Ladezustände der Batterien in verschiedenen Fahrzeugen bei der Konvoibildung berücksichtigt werden.

Abbildung 2 fasst die Optimierungsaufgaben zur Planung und Auslegung des schwarmartigen Mobilitätssystems graphisch zusammen. Das Ziel dieser Optimierung ist es, das System sowohl unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten – wie Investitions- und Betriebskosten und Ressourcenverbrauch – als auch unter dem Aspekt der Nut-

zerzufriedenheit, z. B. durch die Minimierung von Warte- oder Fahrzeiten, möglichst effizient zu gestalten. Grundsätzlich liefert die strategische Flottenplanung den Handlungsrahmen für die Betriebsplanung und definiert die Höhe der Investitionskosten. Die operative Betriebsplanung löst schließlich alle für den effizienten Betrieb des schwarmbasierten Mobilitätssystems notwendigen Fragestellungen und ermittelt die Kennzahlen der Güte der Lösung (d. h. Kosten, Wartezeiten / Fahrzeiten, Energieverbrauch).

Zwischen der strategischen und der operativen Planung bestehen Wechselwirkungen. Beispielsweise führt eine größere Fahrzeugflotte, die höhere Investitionskosten mit sich bringt, typischerweise zu kürzeren Wartezeiten und damit zu einer höheren Nutzerzufriedenheit. Um diesen Wechselwirkungen Rechnung zu tragen, ist eine integrierte Flotten- und Betriebsplanoptimierung durchzuführen, die im Vergleich zur sequentiellen Planung eine bessere Lösungsqualität verspricht.

Stand der Technik

Mourad et al. geben im Bereich der Optimierung einen umfassenden Überblick an Modellierungsmöglichkeiten und Lösungsverfahren für verschiedene Varianten von Shared-Mobility-Systemen. Dabei werden insbesondere Ansätze des Real-time Ride-Pooling, des Ride-Pooling mit autonom fahrenden Fahrzeugen sowie der kombinierte Transport von Personen und Waren analysiert⁷. Speziell im Bereich von autonom fahrenden Fahrzeugen in On-Demand-Systemen liefern Zardini et al. einen Überblick an Methoden und Werkzeugen zur Modellierung und Lösung entsprechender Planungsprobleme⁶. Sie identifizieren mit der strategischen Planung (bspw. Ladeinfrastruktur) und der betrieblichen Steuerung der Systeme zwei Problemklassen. Zur Lösung dieser Planungs- und Steuerungsprobleme werden dabei in der Literatur bisher mathematische Optimierung, maschinelles Lernen sowie individuelle Algorithmen verwendet.

Zudem existieren heute bereits zahlreiche Pilotprojekte zur Erprobung von Shared-Mobility-Systemen im urbanen Raum (bspw. Projekt HEAT in Hamburg^{*}) sowie in ländlichen Regionen (bspw. Projekt Holibri in Höxter^{**}). Hier transportieren kleine elektrisch betriebene Fahrzeuge zu beliebigen Zeiten innerhalb eines Bedienzeitraums ihre Fahrgäste meistens zwischen sogenannten virtuellen Haltestellen, die im Abstand von einigen hundert Metern voneinander im umgrenzten Bedienegebiet verteilt sind. Häufig wird in diesen Pilotprojekten das Ride-Pooling von Fahrgästen unterstützt, sodass ein Fahrzeug unter Ausnutzung zeitlicher Flexibilität der Fahrgäste und durch geschickte Routenführung mehrere Fahrfragen in einer Tour bündelt.

Im Vergleich zu den bisherigen Ansätzen aus der Literatur bzw. den Pilotprojekten liegt die maßgebliche Innovation im hier beschriebenen schwarm-

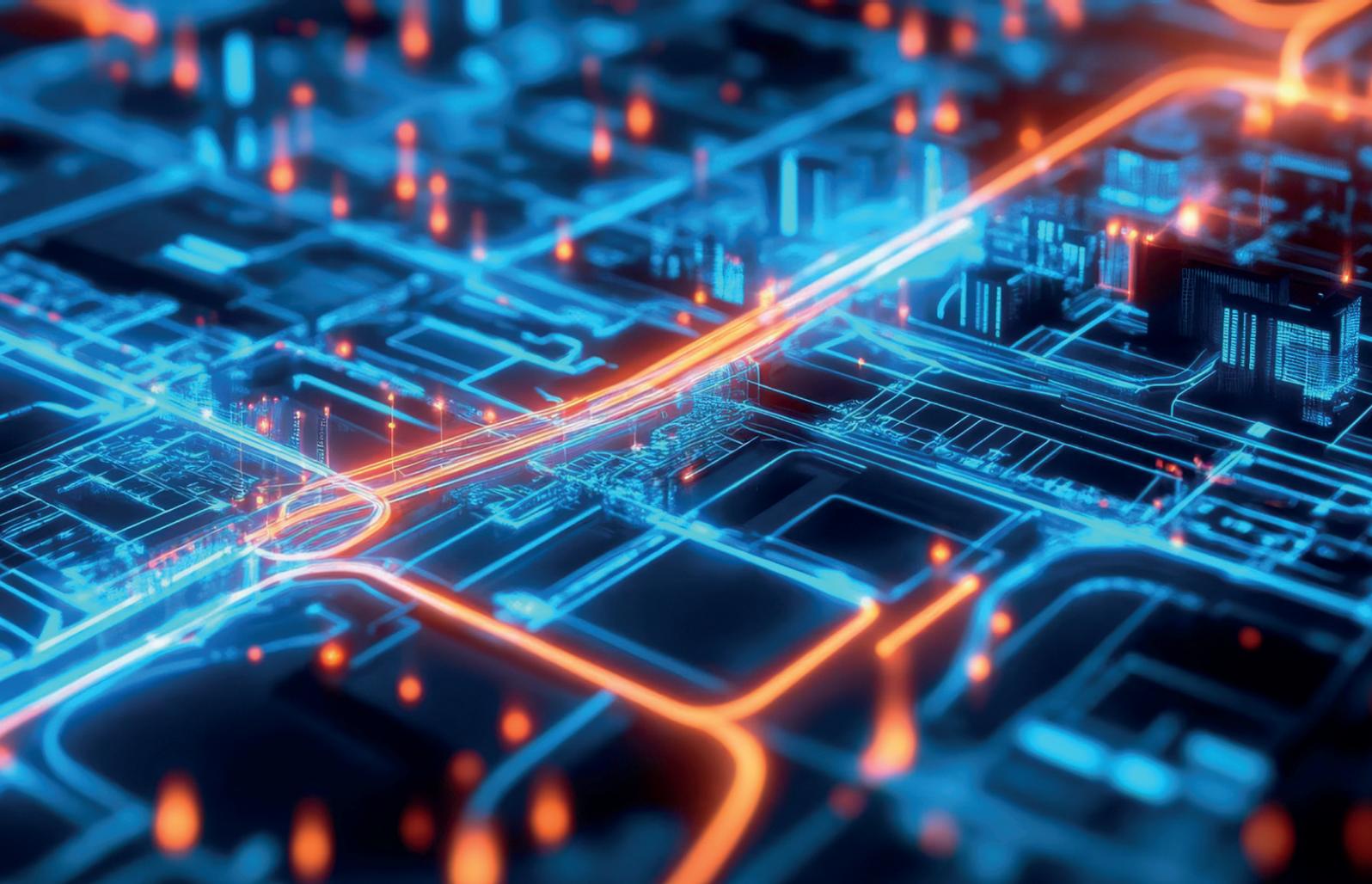
basierten Mobilitätssystem in der Betrachtung zweier autonomer Fahrzeugtypen *NeMo.Pro* und *NeMo.Cab* sowie deren Schwarmbildung für Fahrten im Konvoi. Hierdurch entsteht neben dem Pooling von Fahrgästen zusätzliches Optimierungspotenzial durch ein Pooling von Fahrzeugen und damit eine neue Problemklasse. Da während der Fahrt im Konvoi die *NeMo.Cabs* mit Energie versorgt werden können, ist zudem ein dynamisches Lademanagement möglich.

Konzepte der Konvoibildung werden in der Literatur auf makroskopischer oder mikroskopischer Ebene betrachtet^{8,9}. Auf der makroskopischen, kartenbasierten Ebene findet die Koordinierung von Konvois (sog. Platoon Coordination) statt, d. h. es werden Fahrzeuge für die Konvoibildung identifiziert sowie ihre Routen inklusive Routenabschnitte für die Konvoifahrt auf der Kartenebene geplant. Die mikroskopische Ebene betrifft die Steuerung und Regelung der Fahrzeuge beim Konvoifahren (sog. Platoon Control). Hier wird die Feinplanung hinsichtlich der benötigten Geschwindigkeiten und Fahrmanöver für das Ein- und Ausscheren sowie die Konvoifahrt durchgeführt.

Frühere Projekte zum Platooning betrachten häufig das Konvoifahren von Lastkraftwagen auf Autobahnen¹⁰. Im Vordergrund steht dabei die Durchführung von Fahrmanövern sowie die damit verbundenen technischen Erfordernisse zur Feinabstimmung dieser Manöver zwischen den Fahrzeugen wie Regelungsverfahren, Sensorik oder Fahrzeugkommunikation. Neuere Arbeiten betrachten auch den Koordinierungsaspekt. Im COMPANION Projekt erfolgt beispielsweise für bereits disponierte Fahrtaufträge eine Routen- und Konvoiplanung der Fahrzeuge mit dem Ziel den Energieverbrauch zu minimieren¹¹. Ein Überblick über weitere Optimie-

* siehe <https://www.hochbahn.de/de/projekte/das-projekt-heat>

** siehe <https://www.holibri.info/holibri/index.php>



rungskriterien, die für die Koordinierung betrachtet werden ist in der Arbeit von Sturm et al. zu finden¹². Dazu zählen die Fahrzeugsicherheit, der Verkehrsfluss, die Zeit, der Nutzerkomfort, die Entfernung oder die Kosten.

In den letzten Jahren gab es zunehmend Interesse am Konvoifahren für den Personentransport: Autonome modulare Fahrzeuge wie das NEXT-Shuttle, bei dem sich mehrere gleichartige Module zu größeren Fahrzeugeinheiten zusammenfügen und wieder entkoppeln können, wurden bereits kurzzeitig in Dubai getestet¹³. In Dong et al. wurde im Rahmen einer Simulationsstudie untersucht, wie Betriebskosten, die durch die Überwachung solcher kleinen Shuttles entstehen, mittels Konvoibildung reduziert werden können¹⁴. Für eine Flotte von 500 Fahrzeugen in städtischen Umgebungen ergab die Simulationsstudie bei hohem Verkehrsaufkommen bis zu 20 % Kostenreduzierung durch Konvoibildung. Adler et al. untersuchen mittels Pareto-Optimierung den Tradeoff zwischen Energieverbrauch und Transportverzögerung. Fahrzeuge kommen an einer sogenannten Station an, die entscheidet, wann sie gebündelt im Konvoi zu ihrem gemeinsamen Ziel fahren¹⁵. Die

Fahrzeugankunft wird als Poisson-Prozess modelliert. Es werden Pareto-optimale Strategien vorgeschlagen, um einerseits die Wartezeiten der Fahrzeuge an der Station zu minimieren und andererseits die Energieersparnis durch das Konvoifahren zu maximieren. Es werden jedoch nur Szenarien für Fahrten zwischen einem Start- und einem Zielpunkt betrachtet und keine Fahrten zwischen mehreren unterschiedlichen Start- und Zielpunkten. Chen et al. untersuchen mittels Kontinuum Analyse die Optimierung von Energieverbrauch und Wartezeit bei der Disposition von modularen Fahrzeugen in einem Transportkorridor¹⁶.

Im Unterschied zu den existierenden Ansätzen sollen in dem hier beschriebenen neuartigen schwarmbasierten Mobilitätssystem zwei autonome Fahrzeugtypen mit unterschiedlichen Eigenschaften eingesetzt werden. Durch die Möglichkeit, die Batterien der *NeMo.Cabs* während der Konvoifahrt durch ein *NeMo.Pro* zu laden, entstehen völlig neue Herausforderungen für die Konvoibildung, die bisher in der Literatur so nicht betrachtet wurden.

Analyse des Optimierungsproblems

Um das schwarmartige Mobilitätssystem unter ökologischen, ökonomischen und Nutzer-Gesichtspunkten effizient auszulegen und zu betreiben, muss ein komplexes multikriterielles Optimierungsproblem gelöst werden, bei dem die Fragestellungen der strategischen Flottenplanung und der operativen Betriebsplanung integriert betrachtet werden. Nachfolgend wird das Planungsproblem näher analysiert, in Teilproblemen entsprechend der existierenden Literatur gegliedert und Anforderungen an einen Lösungsansatz spezifiziert.

Problembeschreibung und Einordnung in Problemklassen aus der Literatur

Das oben beschriebene Mobilitätssystem wird maßgeblich durch die beiden autonomen Fahrzeugtypen *NeMo.Pro* und *NeMo.Cab* und ihr Zusammenwirken bei der Erfüllung seiner exogenen und endogenen Aufgaben, gekennzeichnet. Exogene Aufgaben betreffen den eigentlichen Transport und werden von außen an das System herangetragen. Endogene Aufgaben entstehen im System selbst, um die ordnungsgemäße Erfüllung der exogenen Aufgaben sicherzustellen. Dazu gehören das Laden der Fahrzeuge, die Bildung und Auflösung von Konvois oder die Repositionierung von Fahrzeugen (Rebalancing).

Die exogenen Aufgaben sind somit die Hauptaufgaben der autonomen Fahrzeugflotte. Dies kann durch ein Pickup-and-Delivery-Problem beschrieben werden, in dem ein Fahrgast (oder Waren) von einem Startpunkt (Pickup) zu einem Zielpunkt (Delivery) transportiert werden muss. Dabei soll ein wechselnder, aktueller Bedarf, der durch die Kunden an das System herangetragen wird, bestmöglich erfüllt werden. Damit handelt es sich um ein Dial-a-Ride-Problem (DARP). Zusätzlich soll eine gemeinsame Nut-

zung eines Fahrzeugs für mehrere Anfragen auf übereinstimmenden (Teil-)Routen unterstützt werden. Damit handelt es sich um ein Shared DARP (SDARP) oder Taxi-Sharing-Problem. Die Anfragen können dynamisch an das System gestellt werden, d. h. während schon Transportaufgaben durchgeführt werden oder ihre Durchführung geplant wird, können neue Anfragen hinzukommen oder Anfragen storniert werden.

Bei dem betrachteten Mobilitätssystem können sich mehrere *NeMo.Cabs* untereinander oder mit einem *NeMo.Pro* zu einem Konvoi (Platoon) im Sinn eines modularen Fahrzeugs (Modular Vehicle) zwecks Transports mehrerer Personen oder größerer Warenmengen zusammenschließen und die *NeMo.Cabs* können dabei mit Energie versorgt werden. Dadurch wird das Problem erweitert zu einem Modular DARP (MDARP)¹⁷.

Randbedingungen der Planung

Bei der Planung sind eine Vielzahl von unterschiedlichen Randbedingungen zu berücksichtigen. In der Arbeit von Mourad et. al werden Randbedingungen bezüglich Routing, Zeit, Kapazität und Kosten und sogenannte Synchronisationsrandbedingungen (Synchronization Constraints) beschrieben⁷. Synchronisationsrandbedingungen können hierbei fünf Aspekte betreffen, bezüglich derer eine Synchronisation (S.) erfolgen muss¹⁸: Aufgaben (Task S.), Betrieb (Operation S.), Bewegung (Movement S.), Ladung (Load S.) und Ressourcen (Resource S.). Nachfolgend werden die Anforderungen an das schwarmbasierte Mobilitätssystem bzgl. der oben genannten Aufgaben näher analysiert.

- **Task Synchronisation, Dispatching, Routing:** Die Synchronisation von Aufgaben betrifft im Wesentlichen die Zuweisung der exogenen Auf-

gaben an Fahrzeuge (Dispatching) und die Routenfindung zu ihrer Erfüllung. Im einfachsten Fall bleibt das Dispatching vom Startort bis zum Zielort gleich. Das heißt einmal eingestiegene Personen steigen nicht um bzw. Waren werden nicht umgeladen. Hierbei wird jede Kundenanfrage genau einem Fahrzeug zugewiesen, das diese Anfrage erfüllt. Um größeres Potenzial beim Pooling zu heben, müssen auch Transportketten (Multi-Hop) betrachtet werden, in denen mehrere Fahrzeuge einen Fahrauftrag erfüllen. Dabei können einem Fahrzeug mehrere Anfragen bis zum Erreichen seiner Kapazitätsgrenze zugewiesen werden. Hierbei findet ein Ride-Pooling von Personen und/oder Waren statt, wodurch die Auslastung der Fahrzeuge verbessert wird. Darüber hinaus ist nach einer zurückgelegten Teilstrecke ein Re-Dispatching möglich, um die Effizienz bzgl. der Fahrzeugauslastung noch weiter zu steigern.

Bei der Routenfindung muss ein Fahrzeug die Start- und Zielpositionen der zu erfüllenden Aufträge immer in der angegebenen Reihenfolge besuchen. Zunächst gehen wir von einem Tür-zu-Tür Transport aus, so dass es beliebig viele unterschiedliche Pickup- und Delivery-Punkte geben kann. Inwieweit die Einführung virtueller Haltepunkte oder von Routing-Korridoren das Teilen von Fahrzeugen befördern kann, ohne die Kundenakzeptanz negativ zu beeinflussen, muss untersucht werden. Die Routenfindung muss auch endogene Aufgaben zur Repositionierung von Fahrzeugen (Rebalancing) erfüllen: Autonomen Fahrzeuge müssen nach Beendigung ihrer Fahrt spezifische Orte (Depots / Hubs) anfahren, an denen sie parken können, wenn sie keine weiteren Fahraufträge erfüllen müssen. Diese sollten so gewählt werden, dass Leerfahrten zum Abstellplatz - aber auch vorausschauend zum nächsten Einsatzort - minimiert werden.

- **Zeit, Operation Synchronisation, Scheduling:**

Um die Flexibilität für das Dispatching und Routing zu charakterisieren, werden Kundenanfragen mit Zeitfenstern für die Abfahrt und die Ankunft sowie der maximal zulässigen zusätzlichen Reisezeit, die durch das Ride-Pooling mit weiteren Personen oder Waren entstehen, annotiert. Zusätzliche Reisezeit entsteht durch das Fahren von Umwegen, die gemeinsame Wegstrecken für unterschiedliche Kundenanfragen oder die Konvoibildung bspw. zum Laden der *NeMo.Cabs* ermöglichen, oder durch Wartezeiten beim Ein- und Ausstieg von Personen oder dem Be- / Entladen von Waren. Diese zeitlichen Randbedingungen werden von außen an das System herangetragen. Dadurch entstehen Randbedingungen für die Fahrdurchführung, die die zeitliche Synchronisation von Operationen verschiedener Fahrzeuge am selben oder unterschiedlichen Orten erfordern. Sollen beispielsweise Personentransporte höher priorisiert werden als Warentransporte, erzeugt dies eine (zeitliche) Reihenfolge bei der Fahrdurchführung. Für das Umladen von Waren ist darüber hinaus sogar eine gleichzeitige Anwesenheit zweier Fahrzeuge am selben Ort erforderlich, wenn keine Möglichkeit zum Lagern besteht.

- **Movement Synchronisation:**

Bei der Movement Synchronisation müssen Fahrzeuge ihre Operationen nicht nur zeitlich, sondern auch räumlich synchronisieren und damit ihre gesamte Bewegung aufeinander abstimmen. In dem hier betrachteten Mobilitätssystem ist die Konvoibildung der entscheidende Auslöser, der eine Synchronisation der Bewegung mehrerer *NeMo.Cabs* untereinander oder mit einem *NeMo.Pro* erfordert. Sie verschmelzen während der Konvoifahrt quasi zu einem verbundenen / zusammengesetzten modularen Fahrzeug (sog. Modular Vehicle) und passieren den Ort der Konvoibildung und -Auflösung sowie die dazwischenliegende Fahrstrecke zur selben Zeit.



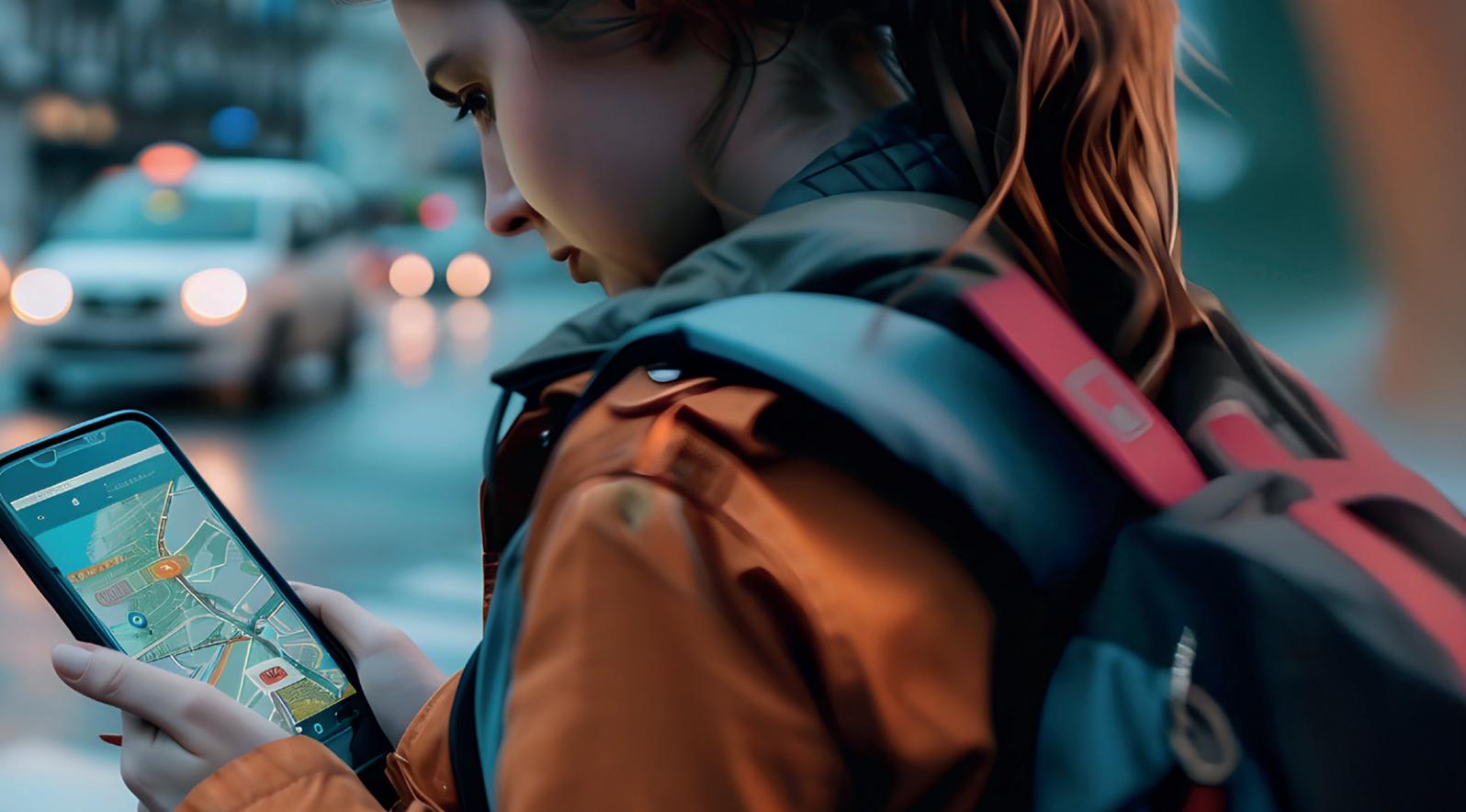
- **Kapazität, Load Synchronisation:** Jedes Fahrzeug hat eine bestimmte Kapazität an Personen und Lademöglichkeiten für Waren, die nicht überschritten werden darf. Diese Kapazitätsgrenzen müssen insbesondere auch bei der gemeinsamen Nutzung von Fahrzeugen für mehrere Fahrtenfragen durch das Ride-Pooling berücksichtigt werden. Zudem ist die Anzahl der Fahrzeuge und damit die Kapazität des Gesamtsystems beschränkt. Dadurch kann es auch dazu kommen, dass Fahrtenfragen abgelehnt werden müssen. Bei der Betrachtung von Multi-Hop-Transporten ergeben sich weitere Randbedingungen zur Load-Synchronisation, die garantieren müssen, dass Personen / Waren, die mit einem Fahrzeug an einem Ort ankommen, auch bis zum Ziel weiter transportiert werden.
- **Resource Synchronisation:** Bei der Load-Synchronisation (s. o.) werden die Fahrzeuge als Ressourcen hinsichtlich der Erfüllung von Fahrtaufträgen mehrerer Kunden betrachtet. Aber auch die Fahrzeuge selbst können um Ressourcen konkurrieren. Abstellplätze auf Parkflächen / in Depots oder Lademöglichkeiten für Fahrzeuge sind Beispiele für Ressourcen, deren Nutzung durch mehrere Fahrzeuge synchronisiert werden muss. In dem hier betrachteten Mobilitätssystem können die *NeMo.Cabs* während der Fahrt von einem *NeMo.*

Pro geladen werden. Damit werden die *NeMo.Pro*-Fahrzeuge und die bei ihnen verfügbare Energie zu einer Ressource, um die die *NeMo.Cabs* konkurrieren. Die *NeMo.Pros* werden mit Wasserstoff betrieben und konkurrieren ggf. um Lademöglichkeiten und Vorräte an Wasserstofftankstellen.

Nutzerspezifische, ökonomische und ökologische Kriterien zur Berücksichtigung in der Zielfunktion

Die Optimierung des schwarmbasierten Mobilitätssystems betrifft ökonomische, ökologische und nutzerspezifische Gesichtspunkte und richtet sich damit an drei Adressaten: Mobilitätsbetreiber, Umwelt und Mobilitätsnutzer. Damit muss ein multikriterielles Optimierungsmodell gelöst werden. In der Literatur werden bereits eine Reihe von Optimierungskriterien beschrieben^{7,19,20}, die ökonomische, ökologische und nutzerspezifische Aspekte betreffen, die für die Modellierung des beschriebenen schwarmbasierten Mobilitätssystems wie folgt berücksichtigt werden sollten:

- **Nutzerspezifische Faktoren:** Für die Optimierung des schwarmbasierten Mobilitätssystems ist aus Nutzersicht insbesondere die Zufriedenheit



hinsichtlich der Erfüllung ihrer Transportanfragen von Bedeutung. Um die Zufriedenheit von Kunden zu ermitteln, unterscheiden Rehme et al. Kriterien zur Qualität des Angebotes und zum Betrieb des Mobilitätssystems¹⁹. Um die Qualität des Angebots zu bewerten, wird die zeitliche und räumliche Abdeckung des Angebots, die Erreichbarkeit, Informationen über Fahrten und die Flexibilität bei der Planung herangezogen. Weiterhin müssen Kriterien zum Betrieb des Mobilitätssystems berücksichtigt werden. Dazu zählen zum Beispiel die Häufigkeit von Umstiegen, Wartezeiten, Dauer der Fahrten, Zuverlässigkeit oder Reisekosten. Allgemeine Akzeptanzgesichtspunkte, wie individuelle Vorlieben oder soziale Faktoren, die die Bereitschaft zur Nutzung von neuartigen Mobilitätssystemen beeinflussen, haben zudem Auswirkungen auf die zu erwartende Anzahl von Kundenanfragen und damit auf die im Folgenden betrachteten ökonomischen Gesichtspunkte²¹.

- **Ökonomische Faktoren:** Aus ökonomischer Sicht soll das Mobilitätssystem effizient und kostengünstig betrieben werden. Die Systemeffizienz wird durch unterschiedliche Faktoren bei der Erfüllung der Transportaufgaben beeinflusst²⁰. Dazu zählen bspw. der Umwegefaktor, die Fahrzeugbesetzung bzw. der Auslastungsfaktor, ein Pooling-Index, der Leerkilometeranteil, die ge-

buchten Personenkilometer sowie die gefahrenen Fahrzeugkilometer. Diese Faktoren werden wesentlich durch die Nachfrage / Inanspruchnahme an Mobilitätsleistungen beeinflusst.

Für die Flottenplanung sind weiterhin die Investitionskosten für die Anschaffung der Fahrzeuge relevant²². Darüber hinaus müssen Fixkosten wie Versicherungen und Gemeinkosten zur Verwaltung der Fahrzeugflotte berücksichtigt werden.

- **Ökologische Faktoren:** Hierzu zählen der Ressourcenverbrauch sowie die durch das schwarmbasierte Mobilitätssystem verursachten Emissionen. Bei der Optimierung des beschriebenen Mobilitätssystems ist der Energieverbrauch zu betrachten, der durch den Betrieb der Fahrzeuge verursacht wird. Da die Fahrzeuge mit regenerativer Energie betrieben werden, werden beim Betrieb keine Treibhausgase emittiert. Produktion und Entsorgung der Fahrzeuge sowie der Bedarf an Infrastruktur wie Straßen, Parkraum, Fahrzeugdepots, Tankstellen/Ladepunkte etc. und der dadurch verursachte Energie- und Flächenverbrauch sind weitere Faktoren, die im Rahmen einer ökologischen Bewertung des Mobilitätssystems Eingang finden können.

Lösungsidee zur integrierten Planung

Im vorherigen Kapitel wurden die Randbedingungen und Zielkriterien des Optimierungsproblems analysiert. Im Vergleich zur sequentiellen Planung bietet die integrierte Planung die Möglichkeit, die Planungsprobleme der strategischen Flottenplanung und der operativen Betriebsplanung simultan zu analysieren, wodurch die Lösungsqualität verbessert werden soll. Die Optimierungsaufgaben lassen sich aus einer Kombination von SDARP- und MDARP-Problem spezifizieren. Dieses weist für sich genommen schon eine hohe Problemkomplexität auf und wird durch die gleichzeitige Berücksichtigung strategischer und operativer Fragestellungen zusätzlich erschwert. Zudem stellen potenzielle Unsicherheiten bezüglich der Nachfrage eine weitere Komplexitätsdimension dar.

Um dieser hohen Problemkomplexität in einem Lösungsansatz gerecht zu werden, schlagen wir eine Dekomposition des Planungsproblems in drei Komponenten vor:

1. **Flottenplanung** unter Verwendung einer (Meta-) Heuristik,
2. **Betriebsplanung & -simulation** und
3. Sicherstellen von robusten Lösungen durch **Sensitivitätsanalysen**.

Abbildung 3 stellt die Komponenten und deren Zusammenhang schematisch dar. Nachfolgend werden die einzelnen Komponenten erläutert.

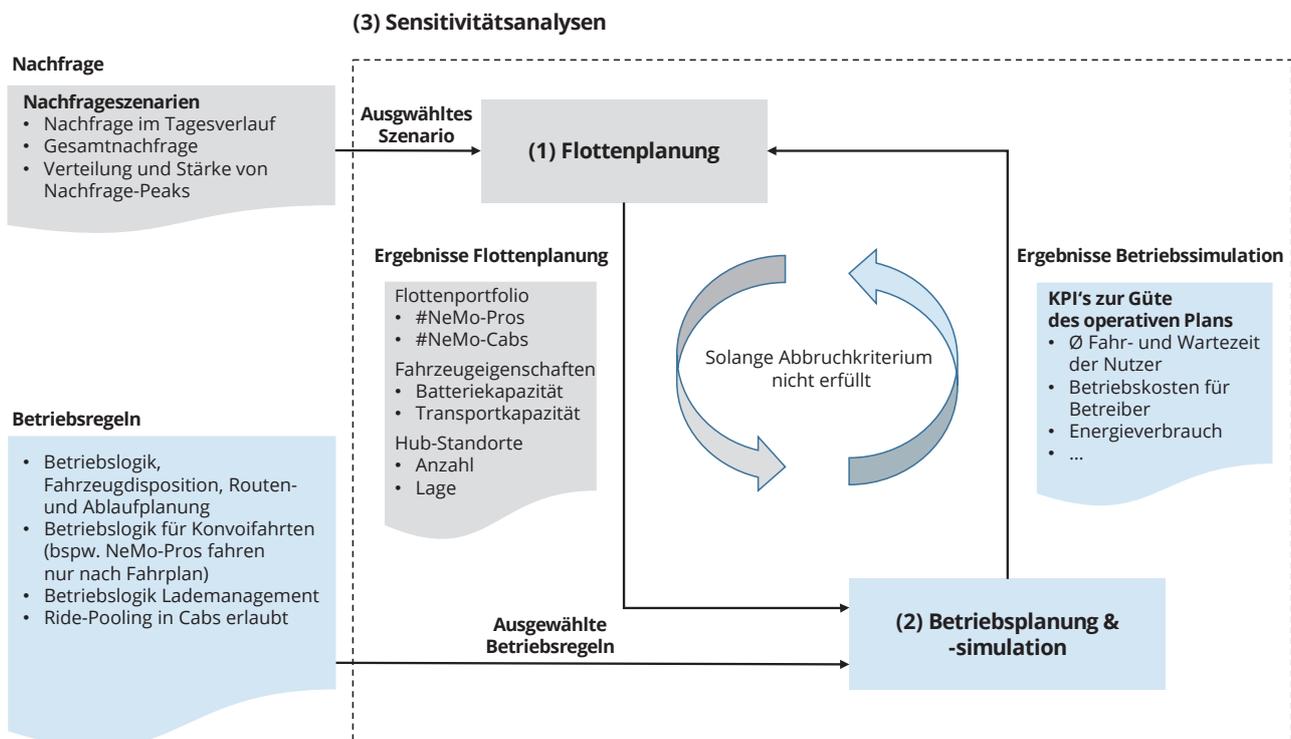


Abbildung 3: Komponenten für die integrierte Flotten- und Betriebsplanung

1. Flottenplanung

Aufgabe der Flottenplanung ist es, ein möglichst optimales Flottenportfolio zu bestimmen, das sowohl die Anzahl der Fahrzeuge als auch die Fahrzeugeigenschaften festlegt und gleichzeitig die Standorte der Hubs bestimmt. Hierzu wird auf eine Metaheuristik²³ zurückgegriffen – Verfahren, das auf intelligenten Suchstrategien basiert, um in großen Suchräumen effiziente Lösungen zu identifizieren. Hier eignen sich beispielsweise Large Neighborhood Search (LNS), Simulated Annealing (SA) oder Genetische Algorithmen (GA).

Der Ablauf der Flottenplanung beginnt mit der Auswahl eines Nachfrageszenarios. Die gewählte Metaheuristik generiert anschließend eine Startlösung. Diese und auch spätere Nachbarschaftslösungen werden hinsichtlich ihrer Güte durch eine Verkehrssimulation (Schritt 2) bewertet. Es werden verschiedene Kenngrößen (KPI) ermittelt. Diese Kennzahlen geben Aufschluss darüber, wie effizient das vorgeschlagene Flottenportfolio (d. h. die aktuelle Lösung) im operativen Betrieb funktioniert. Die KPI's sind dann die Grundlage, um in der nächsten Iteration der Flottenplanung neue Nachbarschaftslösungen zu generieren. Die Metaheuristik durchläuft diese Iterationen solange, bis schließlich ein definiertes Abbruchkriterium erfüllt ist (bspw. falls die Lösung über n Iterationen nicht mehr verbessert werden konnte).

2. Betriebsplanung & -simulation

Aufgabe der Betriebsplanung ist es, die Durchführung von Fahrten zur Erfüllung von Transportanfragen möglichst optimal zu planen. In dem hier betrachteten Optimierungskontext wird die Fahrtdurchführung mittels einer Verkehrssimulation nachgebildet. Dazu eignen sich bspw. Open-Source Werkzeuge zur

mikroskopischen Simulation, wie SUMO (Simulation of Urban Mobility)²⁴. Als Eingabe bekommt die Betriebsplanung die zu bewertende Nachbarschaftslösung und damit ein fixiertes Flottenportfolio und Hub-Standorte übergeben. Zudem müssen die *NeMo*-spezifischen Betriebsregeln, beispielsweise für das Fahren im Konvoi, und die Betriebslogiken für die Fahrzeugdisposition, die Routen- und Ablaufplanung sowie das Lademanagement in der Simulation abgebildet werden. Dies kann beispielsweise durch Generierung spezifischer Simulationsmodelle oder entsprechende Konfiguration / Steuerung der Simulation erfolgen. Hier sind auch verschiedene Varianten (bspw. für das Fahren im Konvoi) möglich. Beim Aufruf der Verkehrssimulation werden die gewünschten Betriebsregeln ausgewählt. Anschließend startet die Verkehrssimulation und ermittelt unter Berücksichtigung der Betriebsregeln die Kennzahlen zur Güte des operativen Plans. Hier werden beispielsweise die durchschnittliche Fahr- und Wartezeit der Nutzer oder die Betriebskosten für den Betreiber berechnet, die dann an die Flottenplanung zurückgegeben werden.

3. Sensitivitätsanalysen

Im Rahmen von Sensitivitätsanalysen wird das kombinierte Vorgehen aus 1. Flottenplanung und 2. Betriebsplanung für zu analysierende Nachfrageszenarien iterativ durchlaufen. Ziel ist es, für unterschiedliche Nachfrageszenarien, die sich beispielsweise durch eine schwankende Nachfrage im Tagesverlauf auszeichnen, die Sensitivität der Lösungen zu untersuchen. Zudem soll analysiert werden, inwiefern Anpassungen der Betriebsregeln für unterschiedliche Nachfrageszenarien sinnvoll sind. Insgesamt sollen durch die Sensitivitätsanalysen möglichst robuste Planungslösungen identifiziert werden.

Zusammenfassung und Forschungsbedarf

Ausgehend vom Projekt *NeMo.bil* wurde in dieser Arbeit ein neuer Ansatz für ein schwarmbasiertes On-Demand-Mobilitätssystem vorgestellt, welches zukünftig einen umweltfreundlichen und bedarfsgerechten Personen- und Warentransport im ländlichen Raum ermöglichen soll. Das damit verbundene Optimierungsproblem wurde spezifiziert und im Rahmen einer Literaturanalyse konnte der Neuheitsgrad des Planungsproblems festgestellt werden. In einer umfassenden Analyse des Optimierungsproblems wurden anschließend Anforderungen an die Randbedingungen und die Zielfunktionen für eine Flotten- und Betriebsplanung des schwarmartigen Mobilitätssystems spezifiziert und darauf aufbauend eine erste Lösungsidee für die integrierte Flotten- und Betriebsplanung vorgestellt.

Diese Arbeit soll eine Grundlage und einen Impuls für die zukünftige Forschung zur Lösung des vorgestellten Planungsproblems bieten. Zusammenfassend ergeben sich die folgenden zentralen Herausforderungen:

Modellierung und Optimierung der komplexen Wechselwirkungen zwischen strategischer Flottenplanung und operativer Betriebsplanung:

Eine zentrale Herausforderung besteht darin, diese Wechselwirkungen präzise zu modellieren. Dies umfasst die Auswahl und Anpassung geeigneter methodischer Ansätze, wie Metaheuristiken und Simulationen. Darüber hinaus wäre die Entwicklung mathematischer Optimierungsmodelle, die trotz der hohen Problemkomplexität handhabbar sind, ein vielversprechender Forschungsansatz.

Berücksichtigung von Zielkonflikten zwischen verschiedenen Optimierungszielen:

Um die Qualität von Flotten- und Betriebsplänen zu bewerten, müssen die richtigen KPIs identifiziert werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass einige der Zielkriterien oftmals im Zielkonflikt zueinanderstehen. Die

Identifikation von Pareto-optimalen Lösungen, die einen Vergleich zwischen entgegengesetzten Zielen ermöglichen, ist ein vielversprechender Ansatz zur Bewältigung dieser Herausforderung.

Übertragbarkeit der Planungs- und Betriebsstrategien:

Eine weitere Forschungsfrage besteht darin, wie die entwickelten Ansätze auf reale Umgebungen und Verkehrsszenarien angewendet werden können und wie dabei eine akzeptable Performance der Lösungsverfahren erreicht werden kann. Ein weiterer mindestens ebenso wichtiger Aspekt ist die Übertragbarkeit der Lösungsbausteine (wie Daten / Modelle, Lösungsverfahren / Algorithmen, etc.) auf unterschiedliche ländliche oder urbane Gebiete und Betreiber. In diesem Zusammenhang bieten die Verwendung von (Daten-)Plattformen oder Konzepte wie Datenräume und GAIA-X eine potenzielle Grundlage zur Standardisierung und Vereinfachung der Übertragbarkeit auf andere Städte und Verkehrsszenarien.

Danksagung

Das dieser Arbeit zugrundeliegende Vorhaben „NeMo.bil – System kooperierender Fahrzeuge für einen individualisierten Öffentlichen Verkehr“ wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 19S23003Q gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literaturverzeichnis

- 1 Machado, C. A. S., de Salles Hue, N. P. M., Berssaneti, F. T., & Quintanilha, J. A. (2018). An overview of shared mobility. *Sustainability*, 10(12), 4342.
- 2 Liyanage, S., Dia, H., Abduljabbar, R., & Bagloee, S. A. (2019). Flexible mobility on-demand: An environmental scan. *Sustainability*, 11(5), 1262.
- 3 Weiss, C. (2020). Stand der Mobilitätswende in ländlichen Regionen. Online verfügbar unter <https://www.zukunft-mobilitaet.net/171427/analyse/laendliche-regionen-mobilitaetswende-zukunft-der-mobilitaet-auf-dem-land/#fn-171427-4>, abgerufen am 28.09.2023
- 4 Sörensen, L., Bossert, A., Jokinen, J. P., & Schlüter, J. (2021). How much flexibility does rural public transport need? – Implications from a fully flexible DRT system. *Transport Policy*, 100, 5 – 20.
- 5 Ostermann, M., Behm, J., Marten, T., Tröster, T., Weyer, J., Cepera, K., & Adelt, F. (2023). Individualization of Public Transport–Integration of Technical and Social Dimensions of Sustainable Mobility. In *Towards the New Normal in Mobility: Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte* (pp. 427-446). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- 6 Zardini, G., Lanzetti, N., Pavone, M., & Frazzoli, E. (2022). Analysis and control of autonomous mobility-on-demand systems. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 5, 633 – 658.
- 7 Mourad, A., Puchinger, J., & Chu, C. (2019). A survey of models and algorithms for optimizing shared mobility. *Transportation Research Part B: Methodological*, 123, 323 – 346.
- 8 Hou, J., Chen, G., Huang, J., Qiao, Y., Xiong, L., Wen, F., & Jiang, C. (2023). Large-Scale Vehicle Platooning: Advances and Challenges in Scheduling and Planning Techniques. *Engineering*.
- 9 Lesch, V., Breitbach, M., Segata, M., Becker, C., Kounev, S., & Krupitzer, C. (2021). An overview on approaches for coordination of platoons. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(8), 10049 – 10065.
- 10 Robinson, T., Chan, E., & Coelingh, E. (2010, October). Operating platoons on public motorways: An introduction to the sartre platooning programme. In *17th world congress on intelligent transport systems* (Vol. 1, p. 12).
- 11 Eilers, S., Mårtensson, J., Pettersson, H., Pillado, M., Gallegos, D., Tobar, M., ... & Adolfson, M. (2015, September). COMPANION-Towards Co-operative Platoon Management of Heavy-Duty Vehicles. In *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems* (pp. 1267 – 1273). IEEE.
- 12 Sturm, T., Krupitzer, C., Segata, M., & Becker, C. (2020). A taxonomy of optimization factors for platooning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(10), 6097 – 6114.
- 13 Next Future Transportation (2023). Next Future Transportation Inc. <http://www.next-future-mobility.com/>. abgerufen am 28.09.2023.
- 14 Dong, R., Woodman, R., Jennings, P. A., Brewerton, S., Birrell, S. A., & Higgins, M. D. (2021). A simulation study of platooning AV fleet service in shared urban environments with uncertainties. *Transportation Engineering*, 4, 100062.
- 15 Adler, A., Miculescu, D., & Karaman, S. (2020). Optimal policies for platooning and ride sharing in autonomy-enabled transportation. In *Algorithmic Foundations of Robotics XII: Proceedings of the Twelfth Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics* (pp. 848 – 863). Springer International Publishing.
- 16 Chen, Z., Li, X., & Qu, X. (2022). A continuous model for designing corridor systems with modular autonomous vehicles enabling station-wise docking. *Transportation Science*, 56(1), 1 – 30.
- 17 Fu, Z., & Chow, J. Y. (2023). Dial-a-ride problem with modular platooning and en-route transfers. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 152, 104191.
- 18 Drexler, M. (2012). Synchronization in vehicle routing – a survey of VRPs with multiple synchronization constraints. *Transportation Science*, 46(3), 297 – 316.
- 19 Rehme, M., Rauh, N., Döring, J., Wehner, U., Mach, S., & Götze, U. (2023). Nutzerevaluation eines vernetzten, multimodalen Mobilitätskonzeptes für ländliche Räume – Erkenntnisse aus Befragungen in der Erzgebirgsregion. In *Towards the New Normal in Mobility: Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte* (pp. 355 – 375). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- 20 Liebchen, C., Lehnert, M., Mehlert, C., & Schiefelbusch, M. (2021). Betriebliche Effizienzgrößen für Ridepooling-Systeme (pp. 135 – 150). Springer Fachmedien Wiesbaden.
- 21 Herrenkind, B., Brendel, A. B., Nastjuk, I., Greve, M., & Kolbe, L. M. (2019). Investigating end-user acceptance of autonomous electric buses to accelerate diffusion. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 74, 255 – 276.
- 22 Jaspers, D., Driesch, P., & Schramm, D. (2021). Wirtschaftlichkeitsmodell zur Gesamtkostenbetrachtung von mobilen Maschinen unterschiedlicher Antriebskonzepte. *Making Connected Mobility Work: Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte*, 203 – 222.
- 23 Gendreau, M., & Potvin, J. Y. (Eds.). (2010). *Handbook of metaheuristics* (Vol. 2). New York: Springer.
- 24 Lopez, P.A., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y.-P., Hilbrich, R., Lücken, L., Rummel, J., Wagner, P. and Wießner, E. (2018). Microscopic Traffic Simulation using SUMO. *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC 2018)*.



Zuwendungsgeber:

Gefördert durch:



Förderkennzeichen: 16THB0004A

Laufzeit: 01.09.2022 - 30.06.2025

Projektträger:



VDI / VDE Innovation + Technik GmbH

5 Partner. 5 Standorte. 1 Netzwerk.



diserhub.de