



Planung nachhaltiger urbaner Mobilität

Am Beispiel von Elektrobussen
und On-Demand-Ridesharing

Inhalt

Motivation.....	3
Batterieelektrische Bussysteme	4
Investitionsplanung für Elektrifizierung.....	6
Ladeinfrastrukturplanung	7
Umlaufplanung für Elektrobusse.....	8
On-Demand Ridesharing.....	9
Tür-zu-Tür Ridesharing	10
Rolling Horizon Ansätze	10
Eventbasierte Ansätze.....	10
Einführung von Treffpunkten	11
Herausforderungen und Potenziale der Planung	12
Bedarf an integrierten Planungsansätzen für die Elektrobusplanung.....	12
Dynamische, antizipatorische Planung für Ridesharing mit Treffpunkten	13
Fazit und Ausblick	15
Literaturverzeichnis.....	16

Impressum

Autor*innen

Dr. Miriam Stumpe
Universität Paderborn

Satz und Design

FIR e. V. an der RWTH Aachen

Bildnachweise

S. 1: © aero – stock.adobe.com
S. 3: © fotofabrik – stock.adobe.com
S. 4: © alpegor – stock.adobe.com
S. 6: © UMAR SALAM – stock.adobe.com
S. 9: © terovesalainen – stock.adobe.com
S. 13: © InputUX – stock.adobe.com
S. 14: © Akarat Phasura – stock.adobe.com

Lizenzbestimmung/Copyright

Open Access: Dieses Whitepaper wird unter der Creative-Commons-Lizenz ‚CC BY-SA 4.0 – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International‘ veröffentlicht.



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

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

Motivation

Die fortschreitende Urbanisierung stellt Städte weltweit vor Herausforderungen in der Verkehrsplanung. Bereits heute lebt mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung in urbanen Räumen – Tendenz steigend (UN, 2019). Damit verbunden ist ein wachsender Mobilitätsbedarf, der soziale, ökologische und ökonomische Spannungsfelder erzeugt. Städtische Verkehrssysteme leiden häufig unter Überlastung, Luftverschmutzung und ineffizienter Raumnutzung – insbesondere durch die Dominanz des motorisierten Individualverkehrs (Ceder, 2021; Shah et al., 2021). Ein zukunftsfähiger Weg aus dieser Problemstellung führt über eine Stärkung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV). Dieser kann signifikant zur Reduktion von Emissionen, zur Entlastung der Verkehrsnetze und zur Förderung sozialer Teilhabe beitragen (Winkler et al., 2023). Dabei reicht das heutige Verständnis von öffentlichem Verkehr über klassische Linienangebote hinaus: Auch flexible, nachfragebasierte Systeme wie Rufbusse oder Sammeltaxis zählen zunehmend dazu (Ceder, 2021; Vuchic, 2007).

Zwei zentrale Entwicklungstrends prägen derzeit die Transformation des öffentlichen Nahverkehrs im Kontext nachhaltiger urbaner Mobilität: Dekarbonisierung und Flexibilisierung (Cao et al., 2024; Kuo et al., 2023). Die Dekarbonisierung zielt auf eine umfassende Reduktion verkehrsbedingter Treibhausgasemissionen ab und erfordert die Integration emissionsfreier Antriebstechnologien in bestehende Verkehrssysteme. Parallel dazu gewinnt die Flexibilisierung öffentlicher Verkehrsangebote zunehmend an Bedeutung.

Sie umfasst die Entwicklung nachfrageorientierter, digital gesteuerter Mobilitätsdienste, die eine Ergänzung zum konventionellen Linienverkehr darstellen. Solche Systeme ermöglichen eine stärkere Individualisierung des Verkehrsangebots und eröffnen neue Potenziale insbesondere in peripheren oder infrastrukturell unterversorgten Räumen.

Diese Entwicklungen tragen maßgeblich zur Erreichung der Sustainable Development Goals (SDGs) der Vereinten Nationen bei, insbesondere SDG 11 („Nachhaltige Städte und Gemeinden“) sowie SDG 13 („Klimaschutz“). Vor diesem Hintergrund behandelt das vorliegende Whitepaper zwei exemplarische Handlungsfelder nachhaltiger urbaner Mobilität: die Elektrifizierung des Busverkehrs durch batterieelektrischer Bussysteme sowie die Bereitstellung flexibler On-Demand-Ridesharing-Services.

Die Einführung dieser innovativen Mobilitätskonzepte stellt die Verkehrsplanung vor komplexe Herausforderungen, deren Bewältigung zunehmend durch quantitative, präskriptive Methoden des Operations Research unterstützt wird. Ziel dieses Whitepapers ist es, einen strukturierten Überblick über zentrale Planungsprobleme und Lösungsansätze im Rahmen der Planung nachhaltiger urbaner Mobilität zu geben. Anhand der beiden Handlungsfelder – batterieelektrische Bussysteme und On-Demand-Ridesharing – werden ausgewählte Modelle, Verfahren und Planungsstrategien vorgestellt und durch einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungsperspektiven ergänzt.



Batterieelektrische Bussysteme

Die Elektrifizierung des öffentlichen Nahverkehrs gilt als ein zentraler Hebel zur Reduktion verkehrsbedingter Emissionen und zur Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern. Im urbanen Kontext rücken dabei batterieelektrische Busse (Battery Electric Buses, BEBs) zunehmend in den Fokus, da sie im Vergleich zu Dieselnissen lokal keine CO₂- und NO₂-Emissionen verursachen und deutlich geringere Lärmemissionen aufweisen (Muñoz et al., 2022). Neben BEBs stellen auch Wasserstoff-Brennstoffzellenbusse (Hydrogen Fuel Cell Buses, HFCBs) eine emissionsarme Alternative dar. Letztere ermöglichen größere Reichweiten und kurze Betankungszeiten, sind jedoch bislang durch hohe Anschaffungskosten und die Abhängigkeit von einer dekarbonisierten Wasserstoffwertschöpfungskette in ihrer Verbreitung limitiert (Ajanovic et al., 2021). BEBs hingegen gelten aufgrund höherer Energieeffizienz und geringerer Betriebskosten als praxistauglicher und sind bereits in vielen Städten im Einsatz (Deliali et al., 2021; Hensher et al., 2022).

Trotz ihrer Vorteile bringt die Integration von BEBs neue betriebliche und planerische Herausforderungen mit sich. Technische Restriktionen wie begrenzte Reichweiten, lange Ladezeiten und die Notwendigkeit einer geeigneten Ladeinfrastruktur machen eine direkte Übertragung bestehender Planungsprozesse aus dem konventionellen Dieselnbetrieb unmöglich (Li, 2016). Ein zentraler Einflussfaktor auf die planerischen Anforderungen und Restriktionen ist die Ladetechnologie.

Aktuell dominieren vier Konzepte den Markt: Depotladung (Overnight Charging), bei der Busse über Nacht am Betriebshof mit Plug-in-Ladegeräten mit geringer Ladeleistung geladen werden; Gelegenheitsladung (Opportunity Charging), bei der Schnellladeeinrichtungen an Endhaltestellen oder Knotenpunkten zum kurzen Zwischenladen mit hoher Ladeleistung genutzt werden; Batteriewechsel (Battery Swapping), das einen Austausch entleerter gegen vollgeladene Batterien vorsieht; sowie Laden



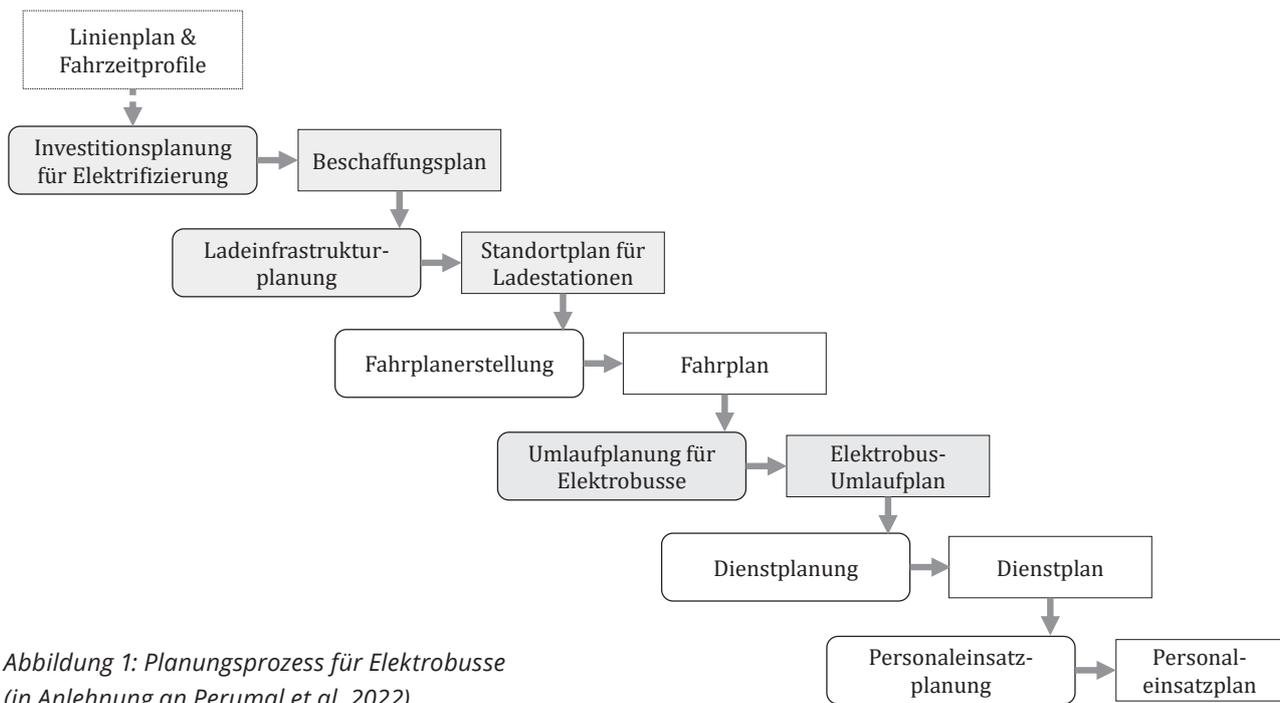


Abbildung 1: Planungsprozess für Elektrobusse (in Anlehnung an Perumal et al. 2022)

während der Fahrt (In-Motion Charging), bei dem Busse während des Betriebs kontinuierlich über Oberleitungen oder induktive Systeme mit Energie versorgt werden (Zhou et al., 2024).

Obwohl Batteriewechsel und In-Motion Charging aus technologischer Sicht vielversprechende Optionen darstellen, haben sich insbesondere in Europa Depot- und Gelegenheitsladung als wirtschaftlich tragfähige Lösungen durchgesetzt – vor allem aufgrund geringerer Infrastrukturkosten und besserer Kompatibilität mit bestehenden Betriebskonzepten. Für eine vergleichende Bewertung der unterschiedlichen Ladekonzepte im Hinblick auf Investitions- und Betriebskosten sei auf die Studie von Chen et al. (2018), in der alle vier Technologien analysiert werden, sowie auf die Studie von Lajunen (2018), die Depot- und Gelegenheitsladung gegenüberstellt, verwiesen.

Die Einführung batterieelektrischer Bussysteme verändert nicht nur die technologischen Grundlagen des Busbetriebs, sondern hat auch tiefgreifende Auswirkungen auf bestehende Planungsprozesse. Die Forschung im Bereich der Busnetzplanung konzentrierte sich bislang vor allem auf konventionelle Dieselsysteme und hat dabei ein sequenzielles Vorgehen etabliert, das in mehreren aufeinander aufbauenden Schritten erfolgt (Desaulniers & Hickman, 2007; Ibarra-Rojas et al., 2015). Dazu zählen die Netzplanung, bei der Linienführungen und Haltestel-

lenabstände definiert werden, um Nutzerkomfort und Betriebskosten in ein ausgewogenes Verhältnis zu bringen; die Fahrplanerstellung, bei der Ankunfts- und Abfahrtszeiten unter Berücksichtigung von Nachfrageverläufen und Anschlussbeziehungen festgelegt werden; die Umlaufplanung, in der einzelnen Service-Fahrten Fahrzeuge zugewiesen werden, wobei betriebliche Effizienz und Ressourcenauslastung im Fokus stehen; die Dienstplanung, die tägliche Schichten für das Fahrpersonal unter Einhaltung arbeitsrechtlicher Vorgaben erstellt; sowie die Personaleinsatzplanung, die eine längerfristige Zuordnung dieser Schichten zu Personen über mehrere Tage oder Wochen hinweg organisiert.

Abbildung 1 veranschaulicht diesen Planungsprozess und zeigt gleichzeitig, wie er im Kontext von batterieelektrischen Bussystemen erweitert werden muss. Die zusätzlichen Anforderungen resultieren vor allem aus den spezifischen technischen Eigenschaften batterieelektrischer Busse, insbesondere im Hinblick auf Reichweite, Ladezeiten und den Bedarf an geeigneter Ladeinfrastruktur. Im erweiterten Planungsprozess, wie in Abbildung 1 durch grau hinterlegte Elemente dargestellt, nehmen drei Planungsprobleme eine besondere Rolle ein: die Investitionsplanung, die Ladeinfrastrukturplanung und die Umlaufplanung für Elektrobusse. Sie bilden die Grundlage für den erfolgreichen Einsatz batterieelektrischer Bussysteme und werden im Folgenden einzeln erläutert.

Investitionsplanung für Elektrifizierung

Die Anschaffung von Elektrobussen und der Aufbau einer passenden Ladeinfrastruktur für die vollständige Elektrifizierung eines Busnetzwerks gehen über das jährlich verfügbare Budget von Verkehrsunternehmen hinaus. Deshalb ist eine vorausschauende, mehrjährige Investitionsplanung notwendig. Ziel ist es, schrittweise festzulegen, wann und in welchem Umfang neue Elektrobusse und Ladestationen beschafft oder ggf. geleast werden sollen (Pelletier et al., 2019). In der Forschung werden solche Fragestellungen häufig als sogenannte Flottenaustauschprobleme („Fleet Replacement Problems“) bezeichnet.

Grundlage für die Planung sind meist bereits bestehende Netz- und Fahrplandaten. Diese werden genutzt, um eine stufenweise Elektrifizierungsstrategie zu entwickeln, die sowohl die Einführung neuer Fahrzeuge als auch die notwendige Ladeinfrastruktur umfasst. Erste Studien konzentrieren sich vor allem

auf die Anzahl und den Anschaffungszeitpunkt der Elektrobusse, während Aspekte der Ladeinfrastruktur oft nur vereinfacht berücksichtigt oder vollständig vernachlässigt wurden (Islam & Lownes, 2019; Li et al., 2018). Zunehmend kommt jedoch eine ganzheitlichere Betrachtungsweise zum Einsatz, die über die reinen Anschaffungskosten hinausgeht. Modelle zu Total Cost of Ownership (TCO) oder Lebenszykluskosten (Life Cycle Cost, LCC) berücksichtigen zusätzlich Betriebskosten, Wartungsaufwand und Energieverbrauch über den gesamten Nutzungszeitraum der Fahrzeuge und Infrastruktur hinweg (Dirks et al., 2022).

In der Praxis wird zur Lösung dieser komplexen Planungsprobleme meist konventionelle Optimierungsoftware eingesetzt. Sie ermöglicht es, verschiedene Elektrifizierungsszenarien zu berechnen und die jeweils beste Lösung im Hinblick auf Kosten und technische Machbarkeit zu identifizieren. Üblicherweise werden dafür gemischt-ganzzahlige lineare Programme (Mixed Integer Linear Programs, MILP) modelliert, die sich in realitätsnahen Anwendungen als effizient lösbar erwiesen haben (Pelletier et al., 2019).



Ladeinfrastrukturplanung

Ein zentraler Erfolgsfaktor bei der Einführung batterieelektrischer Busse ist die richtige Planung der Ladeinfrastruktur. Besonders bei Systemen, die auf Gelegenheitsladung (Opportunity Charging) setzen, müssen frühzeitig strategische Entscheidungen getroffen werden: Wo sollen Ladeeinrichtungen installiert werden? Wie viele Ladepunkte werden benötigt? Und welche Ladeleistungen sind technisch sinnvoll?

Während bei der Depotladung die Busse über Nacht im Betriebshof geladen werden – was eine relativ einfache Planung erlaubt –, ist bei der Gelegenheitsladung eine komplexere Infrastruktur notwendig. Hierbei erfolgt das Nachladen während des Tages an Endhaltestellen. Diese Ladestellen müssen so platziert werden, dass sie zur Linienführung, zu den Umlaufplänen und zur begrenzten Reichweite der Fahrzeuge passen – und gleichzeitig möglichst geringe Investitions- und Betriebskosten verursachen.

Erste Studien konzentrieren sich dabei oft auf einfache Planungsmodelle, in denen nur eine Periode betrachtet wird und sowohl elektrische als auch konventionelle Busse gemeinsam berücksichtigt werden (Hsu et al., 2021; Xylia et al., 2017). Andere Arbeiten untersuchen die Frage, wie groß die Batteriekapazitäten sein sollten, um eine effiziente Ladeplanung zu ermöglichen (He et al., 2019; Kunith et al., 2017). Neuere Forschungsansätze gehen über diese Grundlagen hinaus und berücksichtigen Unsicherheiten, die im realen Betrieb eine große Rolle spielen. Dazu zählen schwankende Strompreise je nach Tageszeit, der allmähliche Verschleiß der Batterien sowie Unterschiede im Energieverbrauch durch Wetter oder Verkehrslage (An, 2020; Azadeh et al., 2022; Zhou et al., 2023). Auch die Kapazität des Stromnetzes am gewünschten Ladeort und mögliche Engpässe in der Versorgung werden zunehmend einbezogen (Guschinsky et al., 2021; Lin et al., 2019).

Zur Lösung dieser Planungsprobleme kommen in der Regel mathematische Optimierungsmodelle in Kombination mit konventioneller Optimierungssoftware zum Einsatz. Für besonders komplexe Fragestellun-



gen stellen einige Studien weiterentwickelte Lösungsverfahren vor – etwa die zweistufige stochastische Programmierung, um mit Unsicherheiten bei Fahrzeiten oder Batteriealterung umzugehen (Zhou et al., 2023), oder Lagrange-Relaxationen zur Berücksichtigung von Strompreisschwankungen (An, 2020).

Umlaufplanung für Elektrobusse

Die Umlaufplanung ist ein zentrales Element in der betrieblichen Organisation von Busverkehren. Sie bestimmt, welche Fahrten einem Fahrzeug zugewiesen werden – also wann und wo ein Bus im Laufe eines Tages unterwegs ist. Bei batterieelektrischen Bussen ist diese Planung deutlich komplexer als bei Dieselnissen, da zusätzliche technische Einschränkungen wie begrenzte Reichweiten, Ladezeiten und Ladeinfrastruktur berücksichtigt werden müssen. In der Forschung spricht man in diesem Zusammenhang vom Electric Vehicle Scheduling Problem (EVSP), das eine Erweiterung des klassischen Vehicle Scheduling Problems (VSP) darstellt (Reuer et al., 2015).

Die Komplexität der Umlaufplanung für Elektrobusse ergibt sich nicht allein aus der Vielzahl möglicher Fahrtenkombinationen, sondern auch aus zusätzlichen technischen Restriktionen. Dazu zählen Reichweitenbegrenzungen, Ladezeiten sowie die Verfügbarkeit geeigneter Ladeinfrastruktur entlang der geplanten Umläufe. So muss etwa geprüft werden, ob ein Fahrzeug die ihm zugewiesenen Fahrten mit der gegebenen Batteriekapazität bewältigen kann, ob Ladezeiten mit dem Fahrplan vereinbar sind und ob Ladestationen an strategisch sinnvollen Punkten verfügbar sind. Diese zusätzlichen Anforderungen erhöhen den planerischen Aufwand erheblich. Bereits klassische Varianten des Vehicle Scheduling Problems mit Einschränkungen hinsichtlich der ma-

ximalen Weglänge gelten als rechnerisch schwierig (NP-schwer), was die Komplexität des Electric Vehicle Scheduling Problems unterstreicht (Bodin & Golden, 1981).

Frühe Ansätze vereinfachen das Problem daher durch Annahmen wie feste Ladezeiten, vollständige Ladungen und lineares Ladeverhalten der Batterien (Adler & Mirchandani, 2017; Chao & Xiaohong, 2013). Diese Modelle sind zwar rechnerisch effizient, bilden die Realität aber nur unzureichend ab. Neuere Studien berücksichtigen realistischere Faktoren, etwa Teilauf Ladungen und nicht-lineares Ladeverhalten (Liu & Ceder, 2020; Olsen & Kliewer, 2020; van Kooten Niekerk et al., 2017).

Zur Lösung des EVSP kommen unterschiedliche algorithmische Verfahren zum Einsatz. Für kleinere und mittlere Busnetze eignen sich exakte Verfahren wie die gemischt-ganzzahlige Programmierung oder sogenannte Column-Generation-Methoden (Li, 2014; Janovec & Koháni, 2019). Für größere Netze, bei denen viele hundert oder tausende Servicefahrten geplant werden müssen, wird zunehmend auf heuristische und metaheuristische Verfahren gesetzt. Ein Beispiel ist der Ansatz von Olsen et al. (2022), der ein großes Verkehrsnetz mit bis zu 10.000 Fahrten durch eine Kombination aus Zeit-Raum-Netzwerk und Flusszerlegungs-Mechanismen unter Berücksichtigung von Ladeprozessen effizient lösen kann.

In der Praxis gelten Metaheuristiken als der bevorzugte Ansatz zur Lösung des EVSP – dazu gehören populationsbasierte Verfahren wie genetische Algorithmen (Rogge et al., 2018; Yao et al., 2020) sowie nicht-populationsbasierte Verfahren wie die Adaptive Large Neighborhood Search (Wen et al., 2016).. Sie ermöglichen es, in vertretbarer Zeit gute Lösungen für hochkomplexe Umlaufplanungen zu finden – auch dann, wenn kurze Ladeprozesse, mehrere Betriebshöfe oder andere reale Betriebsbedingungen berücksichtigt werden müssen.

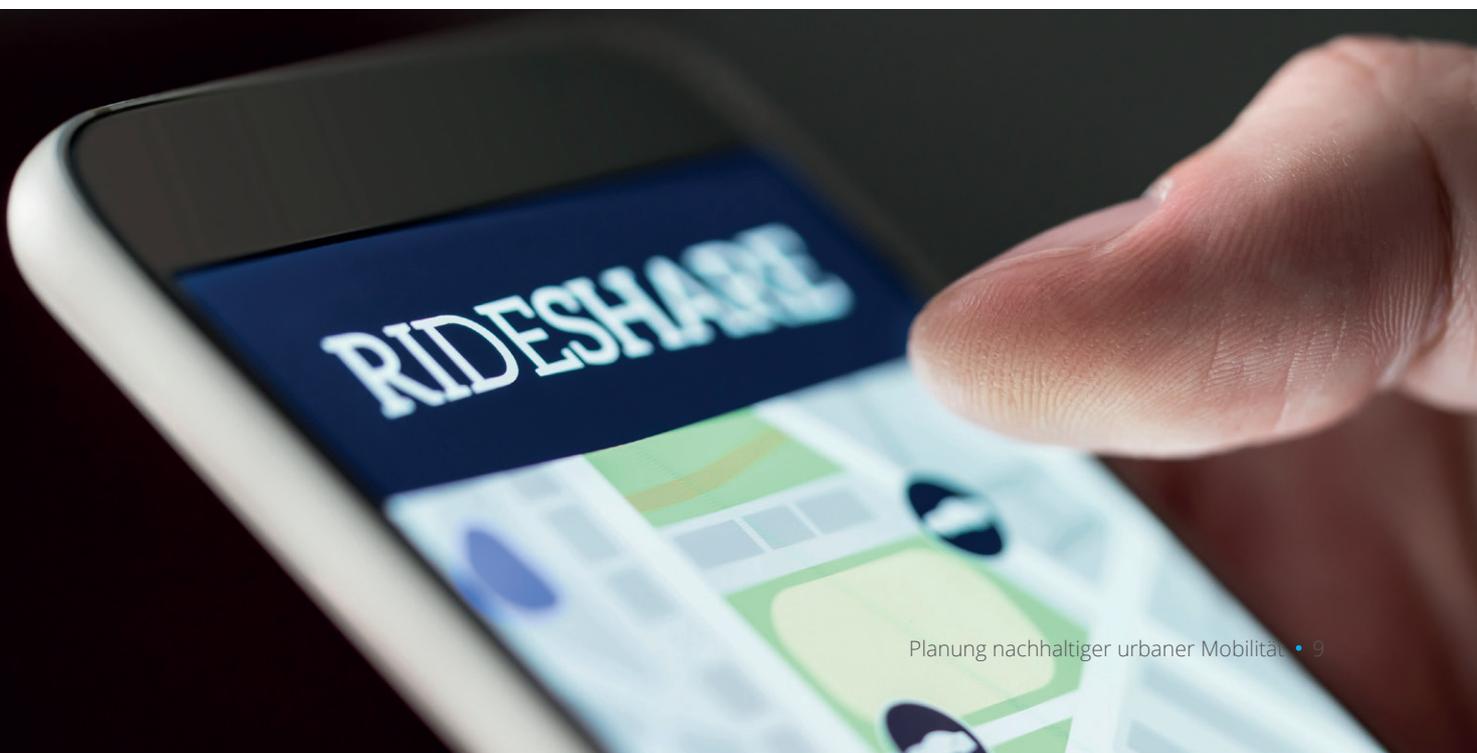
On-Demand Ridesharing

On-Demand Ridesharing (ODR) steht für eine neue Generation digital gestützter Mobilitätsangebote, die sich flexibel an die Nachfrage der Fahrgäste anpassen. Im Gegensatz zu konventionellen öffentlichen Verkehrssystemen, die auf festen Linien und Fahrplänen basieren, ermöglichen ODR-Systeme die Buchung von Fahrten in Echtzeit – typischerweise über mobile Anwendungen. Dabei teilen sich mehrere Personen mit ähnlichem Fahrtziel ein Fahrzeug und profitieren von geringeren Kosten und einer bedarfsgerechten Bedienung (Furuhata et al., 2013; Shaheen & Cohen, 2019). Der Ursprung solcher Konzepte liegt im klassischen Carpooling, das vor allem in Zeiten von Energiekrisen an Bedeutung gewann (Chan & Shaheen, 2012). Heute sind es technologische Fortschritte wie GPS-Ortung, leistungsfähige Algorithmen und mobile Endgeräte, die eine dynamische Vermittlung von Fahrten ermöglichen – ohne Vorabbuchung, ohne feste Routen.

ODR umfasst verschiedene Ausprägungen, insbesondere Peer-to-Peer-Ridesharing, bei dem Privatpersonen ihre eigene Fahrt teilen, sowie Taxi-Ridesharing, bei dem zentral organisierte Fahrdienste mehrere Fahrgäste mit ähnlichem Ziel gemeinsam bedienen. Eine wichtige Unterscheidung betrifft da-

bei die Art des sogenannten „Matching“-Prozesses zwischen Fahrgästen und Fahrzeugen: Bei zweiseitigem Matching – wie im Peer-to-Peer-Ridesharing – bieten sowohl Fahrgäste als auch Fahrer aktiv Fahrten bzw. Fahrtwünsche an, die dann durch eine Plattform in Echtzeit abgeglichen werden. Beim einseitigen Matching hingegen – wie im Taxi-Ridesharing – werden Fahrten zentral durch einen Betreiber koordiniert: Fahrgäste geben lediglich ihre Anfrage auf, und das System weist ein verfügbares Fahrzeug zu (Shaheen & Cohen, 2019; Tafreshian et al., 2020). Diese Unterscheidung beeinflusst die Systemgestaltung maßgeblich – etwa in Bezug auf Koordinationsaufwand, Matchingqualität und Nutzererwartungen.

Ein zentrales Charakteristikum von ODR-Systemen ist ihre dynamische Informationslage: Fahrtanfragen, aktuelle Fahrzeugstandorte, Verkehrszustand und Nutzerverhalten ändern sich kontinuierlich und lassen sich im Voraus nicht vollständig vorhersagen. Diese Unsicherheit stellt enorme Anforderungen an die operative Planung. Im Gegensatz zu statischen Systemen müssen Entscheidungen – etwa zur Fahrzeugzuteilung oder Routenführung – in Echtzeit unter unvollständiger Information getroffen werden.



Gleichzeitig müssen diese kurzfristigen Entscheidungen mit der langfristigen Systemeffizienz in Einklang gebracht werden (Agatz et al., 2012; Ulmer et al., 2017).

In der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit ODR kristallisieren sich zwei zentrale Dimensionen heraus, entlang derer Optimierungsansätze entwickelt und bewertet werden: (1) die zeitliche Entscheidungslogik, also ob Fahrthanfragen in Batches (Rolling Horizon) oder einzeln und sofort (event-basiert) verarbeitet werden, und (2) die Form der Bedienung, insbesondere ob eine individuelle Tür-zu-Tür-Bedienung erfolgt oder Treffpunkte (Meeting Points) eingeführt werden, um Umwege zu reduzieren und die Effizienz des Gesamtsystems zu steigern.

Die folgenden beiden Unterkapitel greifen diese Struktur auf und beleuchten zunächst die klassische Tür-zu-Tür-Bedienung als Grundform des On-Demand Ridesharing. Anschließend wird das Konzept der Treffpunkte vorgestellt, das in Forschung und Praxis zunehmend als vielversprechende Strategie zur Verbesserung der Systemleistung gilt.

Tür-zu-Tür Ridesharing

Ein zentrales Merkmal vieler On-Demand-Ridesharing-Systeme ist die Tür-zu-Tür-Bedienung: Fahrgäste werden an ihrem individuellen Startpunkt abgeholt und direkt an ihr gewünschtes Ziel gebracht. Diese Bedienform bietet hohe Nutzerfreundlichkeit, führt jedoch zu erheblichen planerischen Herausforderungen, insbesondere bei wachsender Nachfrage und hoher geografischer Streuung der Anfragen. Die effiziente Bündelung und Zuweisung solcher individueller Fahrten unterliegt dabei einer dynamischen Informationslage und muss häufig in Echtzeit erfolgen. Zwei grundlegende algorithmische Strategien haben sich zur Bewältigung dieser Anforderungen etabliert: Rolling-Horizon-Ansätze und eventbasierte Ansätze.

Rolling Horizon Ansätze

Rolling-Horizon-Verfahren verarbeiten Fahrthanfragen in regelmäßigen Zeitintervallen, indem sie diese über kurze Zeitfenster sammeln und gebündelt optimieren. Dadurch können mehrere Anfragen gleichzeitig berücksichtigt und effizienter auf Fahrzeuge verteilt werden. Die Leistungsfähigkeit solcher Systeme hängt wesentlich von Parametern wie der Länge des Zeitfensters und der verfügbaren Rechenzeit pro Zyklus ab.

Bei Rolling-Horizon-Verfahren steht häufig der Zielkonflikt zwischen Effizienz und Reaktionsgeschwindigkeit im Vordergrund. Effizienzorientierte Modelle, wie bei Najmi et al. (2017), verzögern bewusst Rückmeldungen, um spätere Anfragen besser integrieren zu können. Reaktionsorientierte Ansätze, etwa bei Agatz et al. (2011), bevorzugen hingegen eine häufige Reoptimierung, um Wartezeiten zu minimieren. Einen adaptiven Mittelweg schlagen Qin et al. (2021) vor, indem sie die Fensterlänge mithilfe von Reinforcement Learning dynamisch anpassen.

Auch die Matching-Logik prägt den Planungsansatz maßgeblich: In zweiseitigen Peer-to-Peer-Systemen erfolgt die Zuordnung auf Basis individueller Fahrgast- und Fahrerpräferenzen, was einer lokal und dezentral gesteuerten Optimierung entspricht (Wang et al., 2018; Kucharski & Cats, 2020). Einseitig organisierte Systeme hingegen ermöglichen eine zentrale, globale Routenoptimierung auf Flottenebene, wie sie etwa von Santi et al. (2014) und Alonso-Mora et al. (2017) realisiert wurde. Insgesamt bietet der Rolling-Horizon-Ansatz eine bewährte Grundlage zur Verarbeitung dynamischer Anfragen – erfordert jedoch eine sorgfältige Abstimmung von Planungslogik und systemspezifischen Parametern.

Eventbasierte Ansätze

Eventbasierte Ansätze reagieren unmittelbar auf einzelne Ereignisse – meist neue Fahrthanfragen – und lösen bei deren Eintreffen sofort eine Planungsentscheidung aus.

dung aus. Im Gegensatz zu Rolling-Horizon-Methoden, bei denen Anfragen gesammelt und in Batches verarbeitet werden, steht hier die Echtzeitreaktion im Vordergrund. Ziel ist es, spontane Mobilitätsbedarfe möglichst schnell und nutzerfreundlich zu bedienen.

Der größte Vorteil liegt in der hohen Reaktionsgeschwindigkeit: Durch effiziente Datenstrukturen wie spatio-temporale Indizes lassen sich passende Fahrzeuge in Echtzeit identifizieren, wie Ma et al. (2014) am Beispiel von Taxi-Ridesharing demonstrieren. Diese Systeme sind besonders geeignet für Umgebungen mit hoher Volatilität, in denen schnelle Rückmeldungen entscheidend sind.

Gleichzeitig stellt der Verzicht auf aggregierte Planung ein zentrales Problem dar: Entscheidungen müssen unter unvollständiger Information getroffen werden, da zukünftige Anfragen nicht berücksichtigt werden können. Viele Systeme greifen daher auf einfache, myopische Entscheidungsregeln zurück, wie die Zuweisung des jeweils nächstgelegenen Fahrzeugs. Dies kann zu ineffizienten Gesamtergebnissen führen – etwa bei räumlich oder zeitlich ungleich verteilter Nachfrage (Hyland & Mahmassani, 2018; Özkan & Ward, 2020).

Um dieser Schwäche zu begegnen, entwickelt sich der Fokus zunehmend von rein reaktiven zu proaktiven Verfahren. Reaktive Methoden basieren ausschließlich auf dem aktuellen Systemzustand, sind einfach zu implementieren, aber anfällig für Ineffizienzen. Proaktive Strategien hingegen versuchen, zukünftige Entwicklungen zu antizipieren. Masoud & Jayakrishnan (2017) zeigen dies anhand eines dynamischen Programmierverfahrens, das mögliche Reiseoptionen bewertet und kontextabhängig Entscheidungen trifft. Auch Yu & Shen (2019) integrieren Approximate Dynamic Programming, um erwartete Nachfrageverteilungen in die Zuweisung einzubeziehen.

Ein weiteres Potenzial liegt in der Nutzung von Nachfrageprognosen. Van Engelen et al. (2018) belegen, dass durch vorausschauende Fahrzeugpositionie-

rung die Systemleistung erheblich verbessert werden kann. Solche Ansätze, die etwa in der Essenslieferung bereits verbreitet sind (Ulmer et al., 2021), finden im Ride-Matching bislang nur begrenzte Anwendung. Insgesamt bieten eventbasierte Ansätze ein hohes Maß an Flexibilität und Reaktionsfähigkeit. Ihre Weiterentwicklung hängt jedoch stark davon ab, wie gut Systeme mit Unsicherheit umgehen können. Die Integration vorausschauender und lernbasierter Komponenten gilt daher als vielversprechender Pfad für künftige Forschung und Praxis.

Einführung von Treffpunkten

Ein zentrales Problem des Tür-zu-Tür-Ridesharing besteht in der Vielzahl individueller Start- und Zielpunkte, die zu langen Umwegen, hohem Koordinationsaufwand und ineffizienter Fahrzeugauslastung führen können. Eine vielversprechende Strategie zur Reduktion dieser Effekte ist die Einführung von Treffpunkten, an denen Fahrgäste zu- oder aussteigen, anstatt direkt vor der Haustür bedient zu werden. Dadurch verringert sich die Anzahl der Stopps pro Tour, was sowohl die Fahrzeit als auch die Komplexität der Routenplanung deutlich reduziert (Stiglic et al., 2015).

Die operative Umsetzung solcher Konzepte erfordert jedoch die dynamische Auswahl und Zuweisung geeigneter Haltepunkte unter Berücksichtigung von Erreichbarkeit, Bündelungspotenzial und Systemleistung – bei gleichzeitig akzeptabler zusätzlicher Gehzeit für die Fahrgäste. Während die meisten bisherigen Arbeiten von statischer Nachfrage ausgehen, wurde das Konzept dynamisch bislang nur vereinzelt untersucht, etwa durch einen Rolling-Horizon-Ansatz von Fielbaum et al. (2021) oder ein Event-basiertes Verfahren von Lotze et al. (2022). Treffpunkte gelten insgesamt als Schlüssel zur Skalierbarkeit und Effizienz dynamischer Ridesharing-Systeme – besonders in städtischen Umgebungen mit hoher Nachfrage und begrenzten Ressourcen.

Herausforderungen und Potenziale der Planung

Sowohl bei der Elektrifizierung des Busverkehrs als auch bei der Einführung von On-Demand-Ridesharing mit Treffpunkten zeigt sich: Technologische Lösungen allein reichen nicht aus – ihr Erfolg hängt maßgeblich von der Qualität der planerischen Konzepte ab. Die folgenden Abschnitte beleuchten zwei zentrale Herausforderungen: den Bedarf an integrierten Planungsansätzen in der Elektrobusplanung und die Entwicklung dynamischer, antizipatorischer Verfahren für ridesharingbasierte Systeme mit Treffpunkten.

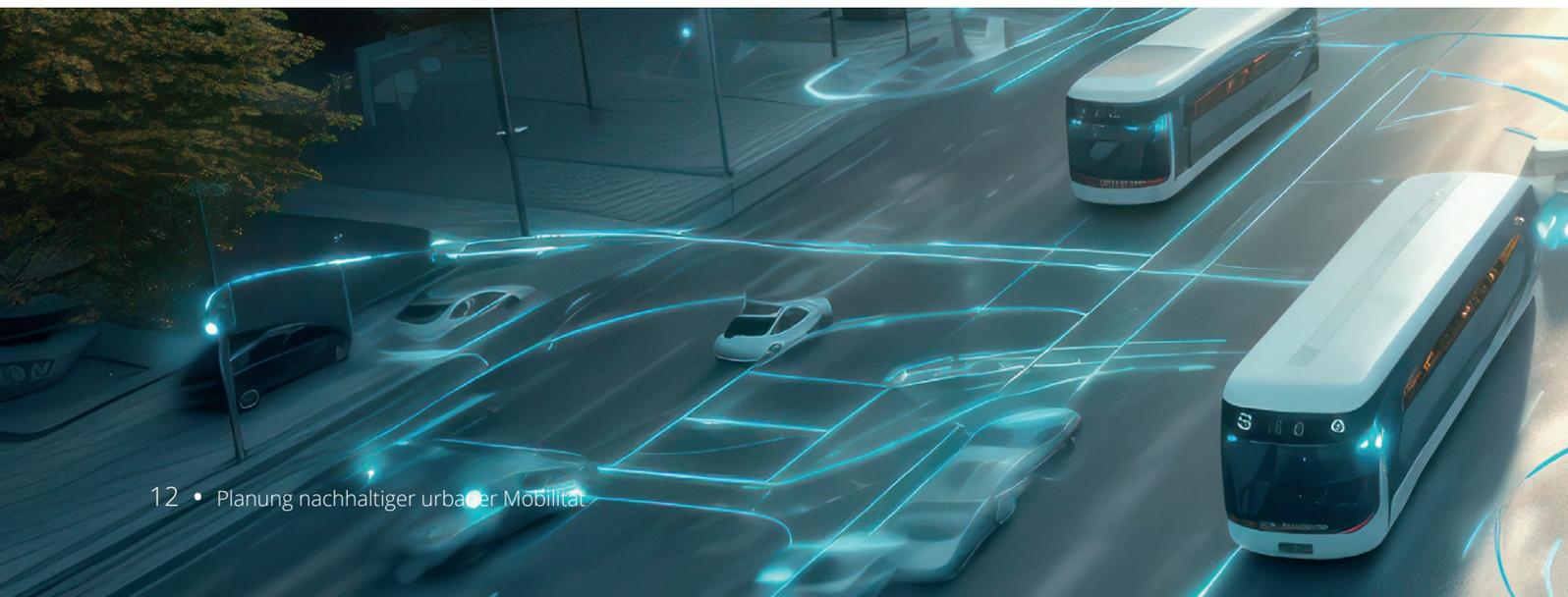
Bedarf an integrierten Planungsansätzen für die Elektrobusplanung

Obwohl sich Flottenbeschaffung, Ladeinfrastrukturplatzierung und Umlaufplanung inhaltlich stark überlappen und gegenseitig bedingen, werden sie in der wissenschaftlichen Literatur bisher meist isoliert betrachtet. Diese fehlende Integration führt in der Praxis zu ineffizienten Lösungen: So beeinflussen Investitionsentscheidungen nicht nur die Anzahl beschaffter Fahrzeuge, sondern auch den zeitlichen Aufbau und die räumliche Verteilung der Ladeinfrastruktur. Gleichzeitig wirken sich Standortwahl und Kapazitäten der Ladepunkte unmittelbar auf die Umlaufgestaltung aus. Diese wiederum definiert den täglichen Energiebedarf und die Mindestverfügbarkeit der Fahrzeuge – und schließt damit

den Planungszyklus zur Fahrzeugdimensionierung.

Einzelne Studien greifen bereits Teilaspekte dieser Interdependenzen auf. Rogge et al. (2018) kombinieren beispielsweise Infrastruktur- und Umlaufplanung, beschränken sich jedoch auf Depotladung und betrachten lediglich eine Planungsperiode. Andere Arbeiten wie He et al. (2023) oder Lin et al. (2019) integrieren mehrperiodische Investitionsplanung und Ladeinfrastrukturdesign, lassen dabei jedoch die Umlaufplanung außen vor. Stumpe et al. (2021) sowie Stumpe (2024) gehen einen Schritt weiter und modellieren die gleichzeitige Optimierung von Ladeinfrastruktur und Umlaufplanung, beschränken sich dabei jedoch auf die Betrachtung einer einzelnen Periode.

Ein durchgängig modellierter, integrierter Planungsansatz, der alle drei zentralen Aufgabenbereiche in einem konsistenten Rahmen abbildet und über mehrere Planungsperioden hinweg strategisch verknüpft, fehlt bislang. Diese Forschungslücke limitiert die Möglichkeiten, die Elektrifizierung des öffentlichen Nahverkehrs ganzheitlich und kostenoptimiert umzusetzen. Erst durch eine enge Verzahnung



nung der Planungsebenen lassen sich technologische Restriktionen effizient berücksichtigen und tragfähige Investitionsentscheidungen für die Zukunft treffen.

Dynamische, antizipatorische Planung für Ridesharing mit Treffpunkten

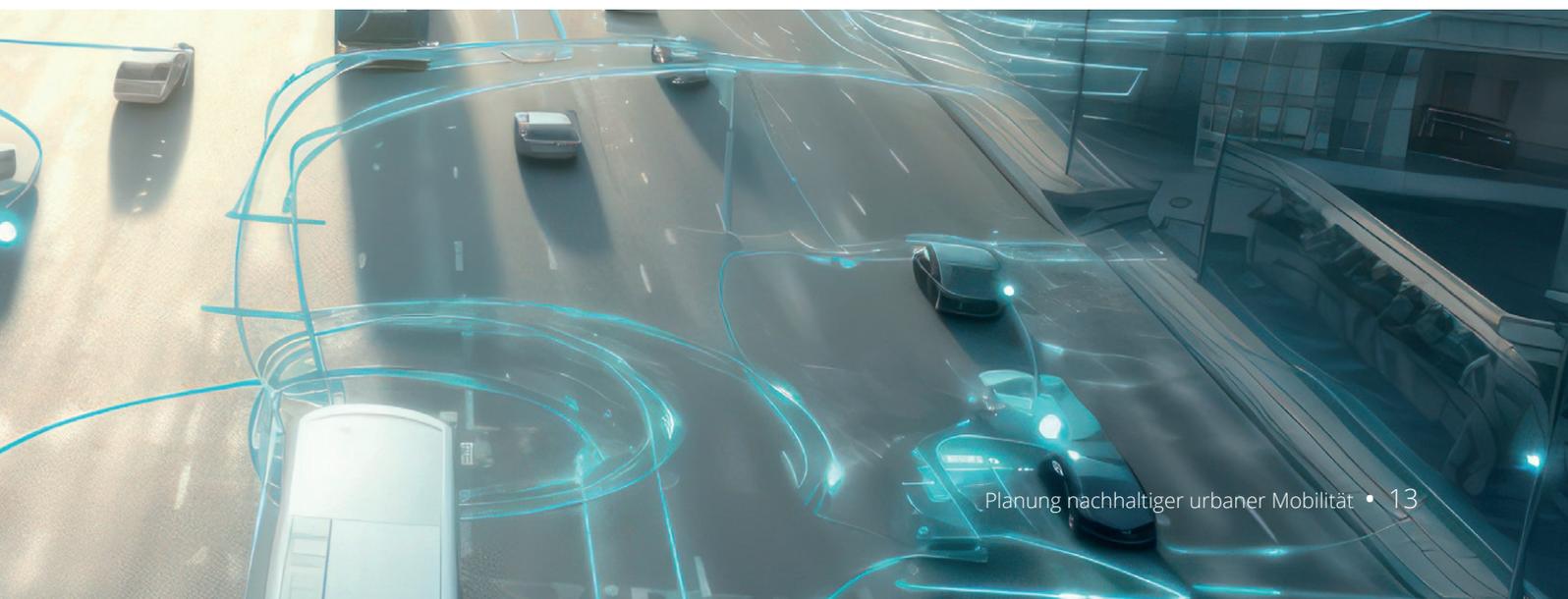
Auch im Bereich des On-Demand-Ridesharing mit Meeting Points zeigen sich bislang unzureichend adressierte planerische Herausforderungen. Während Treffpunkte grundsätzlich große Potenziale zur Reduktion von Umwegen und zur Erhöhung der Systemeffizienz bieten, entstehen daraus neue Zielkonflikte zwischen Nutzerkomfort und betrieblicher Leistung. Kundenseitig sind insbesondere notwendige Fußwege zu beachten, die für bestimmte Nutzergruppen – etwa mobilitätseingeschränkte Personen – problematisch sein können. Systemseitig ermöglichen Treffpunkte zwar eine bessere Bündelung paralleler Anfragen, erfordern dafür jedoch eine situationspezifische, kontextabhängige Zuweisung.

Diese Komplexität wird durch die dynamische Natur von Ridesharing-Systemen weiter verschärft. Entscheidungen müssen nicht nur in Echtzeit getroffen, sondern auch fortlaufend an sich ändernde Bedingungen wie Nachfragevolatilität, Verkehrsfluss oder Fahrzeugverfügbarkeit angepasst werden.

Besonders herausfordernd ist dabei die gleichzeitige Optimierung von Effizienzkennzahlen (z. B. Auslastung, Fahrzeugkilometer) und Nutzerparametern (z. B. Wartezeit, Laufwege).

Während klassische Ansätze meist statisch oder reaktiv agieren, gewinnt die Entwicklung dynamischer und antizipatorischer Steuerungsverfahren zunehmend an Bedeutung. Dieter et al. (2023) präsentieren hierzu einen eventbasierten, antizipatorischen Ansatz, der Nachfrageprognosen zur frühzeitigen Treffpunktzuweisung nutzt. Stumpe et al. (2024) hingegen verfolgen einen Rolling-Horizon-Ansatz, der zeigt, wie stark die Systemleistung von der richtigen Parametrisierung des Planungsmodells abhängt – etwa hinsichtlich Zeithorizont und Reoptimierungsfrequenz.

Insgesamt unterstreichen beide Arbeiten den Bedarf an intelligenter, adaptiver Planung, die dynamische Systembedingungen berücksichtigt. Die Kombination prädiktiver Elemente mit flexiblen Optimierungsstrategien bietet hier großes Potenzial – ein Forschungsfeld, das vielversprechende Perspektiven eröffnet.





Fazit und Ausblick

Die Planung nachhaltiger urbaner Mobilität steht vor komplexen Herausforderungen. Dieses Whitepaper hat zwei zentrale Handlungsfelder beleuchtet: die Einführung batterieelektrischer Bussysteme und die Gestaltung flexibler On-Demand-Ridesharing-Angebote mit Treffpunkten. In beiden Bereichen zeigt sich, dass der technologische Fortschritt planerische Innovationen notwendig macht, um Potenziale tatsächlich realisieren zu können.

Ein nächster logischer Entwicklungsschritt in der Elektrobusplanung besteht in der Integration bislang isolierter Teilplanungen. Die gemeinsame Modellierung von Investitionen, Ladeinfrastruktur und Umlaufplanung bietet die Möglichkeit, Synergien besser zu nutzen, Koordinationsverluste zu vermeiden und systemweite Effizienzgewinne zu realisieren. Bestehende Modelle arbeiten oft sequenziell und verlieren dadurch an Gesamteffektivität.

Gleichzeitig gilt es, Unsicherheiten systematisch zu berücksichtigen. Batterielebensdauer, Ladeverhalten, Strompreisdynamik oder Nachfragefluktuationen lassen sich nur bedingt vorhersagen. Robuste und stochastische Optimierungsverfahren, ergänzt durch simulationsbasierte Entscheidungsunterstützung, bieten hier ein vielversprechendes Instrumentarium für belastbare Planung unter realen Bedingungen.

Zunehmend an Bedeutung gewinnen zudem multikriterielle Ansätze, die helfen, Zielkonflikte zum Beispiel zwischen Kosten und Emissionen transparent zu machen. Mehrziel-Optimierungsverfahren eröffnen Entscheidungsträgern neue Handlungsspielräume, um verschiedene Stakeholder-Interessen in strategischen Kompromisslösungen zu vereinen.

Auch im Bereich des On-Demand-Ridesharing mit Treffpunkten zeichnen sich wichtige Weiterentwicklungen ab. Insbesondere die Kombination von Rolling-Horizon- oder eventabsierten Lösungsverfahren mit antizipativen Rebalancing-Strategien bietet Potenzial, um Fahrzeuge vorausschauend zu positionieren und auf erwartete Nachfrage-schwerpunkte auszurichten.

Ein weiterer zentraler Forschungsschwerpunkt liegt in der Anpassung bestehender Ansätze an unterschiedliche regionale Anforderungen. Während viele Studien auf urbane Kontexte fokussieren, besteht vor allem in ländlichen Regionen erheblicher Bedarf an flexiblen, kosteneffizienten Mobilitätslösungen. Die Übertragung und Weiterentwicklung bestehender Methoden auf Regionen mit geringer Dichte, unregelmäßiger Nachfrage und längeren Distanzen ist entscheidend für die Schaffung flächendeckend attraktiver Mobilitätsangebote.

Langfristig eröffnet sich ein vielversprechendes Zukunftsfeld in der Zusammenführung von elektrifizierten Linienverkehren und On-Demand-Ridesharing. Letzteres könnte dabei als flexibler Zubringer für Hauptachsen im ÖPNV dienen und so zur flächendeckenden Erreichbarkeit und zur Attraktivitätssteigerung öffentlicher Verkehrssysteme beitragen. Die strategische Verzahnung beider Systeme – technologisch, organisatorisch und planerisch – ist ein entscheidender Schritt auf dem Weg zu einem nahtlosen, nachhaltigen Mobilitätsangebot.

Die diesem Artikel zugrundeliegenden Arbeiten wurden teilweise 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

- Adler, J. D., & Mirchandani, P. B. (2017). The vehicle scheduling problem for fleets with alternative-fuel vehicles. *Transportation Science*, 51 (2), 441–456. <https://doi.org/10.1287/trsc.2015.0615>
- Agatz, N., Erera, A. L., Savelsbergh, M. W., & Wang, X. (2011). Dynamic ride-sharing: A simulation study in metro Atlanta. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 17, 532–550. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.04.530>
- Agatz, N., Erera, A., Savelsbergh, M., & Wang, X. (2012). Optimization for dynamic ride-sharing: A review. *European Journal of Operational Research*, 223(2), 295–303. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.05.028>
- Ajanovic, A., Glatt, A., & Haas, R. (2021). Prospects and impediments for hydrogen fuel cell buses. *Energy*, 235, 121340. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121340>
- Alonso-Mora, J., Samaranayake, S., Wallar, A., Frazzoli, E., & Rus, D. (2017). On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114 (3), 462–467. <https://doi.org/10.1073/pnas.1611675114>
- An, K. (2020). Battery electric bus infrastructure planning under demand uncertainty. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 111, 572–587. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.01.009>
- Azadeh, S. S., Vester, J., & Maknoon, M. (2022). Electrification of a bus system with fast charging stations: Impact of battery degradation on design decisions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 142, 103807. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103807>
- Bodin, L., & Golden, B. (1981). Classification in vehicle routing and scheduling. *Networks*, 11 (2), 97–108. <https://doi.org/10.1002/net.3230110204>
- Cao, Y., Derrible, S., Le Pira, M., & Du, H. (2024). Advanced transport systems: The future is sustainable and technology-enabled. *Scientific Reports*, 14(1), 9429. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59438-0>
- Ceder, A. (2021). Urban mobility and public transport: Future perspectives and review. *International Journal of Urban Sciences*, 25(4), 455–479. <https://doi.org/10.1080/12265934.2020.1799846>
- Chan, N. D., & Shaheen, S. A. (2012). Ridesharing in north america: Past, present, and future. *Transport reviews*, 32 (1), 93–112. <https://doi.org/10.1080/01441647.2011.621557>
- Chao, Z., & Xiaohong, C. (2013). Optimizing battery electric bus transit vehicle scheduling with battery exchanging: Model and case study. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 96, 2725–2736. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.306>
- Chen, Z., Yin, Y., & Song, Z. (2018). A cost-competitiveness analysis of charging infrastructure for electric bus operations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 93, 351–366. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.06.006>
- Deliali, A., Chhan, D., Oliver, J., Sayess, R., Godri Pollitt, K. J., & Christofa, E. (2021). Transitioning to zero-emission bus fleets: State of practice of implementations in the United States. *Transport Reviews*, 41(2), 164–191. <https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1800132>
- Desaulniers, G., & Hickman, M. D. (2007). Public transit. *Handbooks in operations research and management science*, 14, 69–127. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14002-5](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14002-5)
- Dieter, P., Stumpe, M., Ulmer, M. W., & Schryen, G. (2023). Anticipatory assignment of passengers to meeting points for taxi-ridesharing. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 121, 103832. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103832>
- Dirks, N., Schiffer, M., & Walther, G. (2022). On the integration of battery electric buses into urban bus networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 139, 103628. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103628>
- Fielbaum, A., Bai, X., & Alonso-Mora, J. (2021). On-demand ridesharing with optimized pick-up and drop-off walking locations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 126, 103061. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103061>
- Furuhata, M., Dessouky, M., Ordóñez, F., Brunet, M.-E., Wang, X., & Koenig, S. (2013). Ridesharing: The state-of-the-art and future directions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 57, 28–46. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2013.08.012>
- Guschinsky, N., Kovalyov, M. Y., Rozin, B., & Brauner, N. (2021). Fleet and charging infrastructure decisions for fast-charging city electric bus service. *Computers & Operations Research*, 135, 105449. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105449>
- He, Y., Song, Z., & Liu, Z. (2019). Fast-charging station deployment for battery electric bus systems considering electricity demand charges. *Sustainable Cities and Society*, 48, 101530. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101530>

- He, Y., Liu, Z., Zhang, Y., & Song, Z. (2023). Time-dependent electric bus and charging station deployment problem. *Energy*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128227>
- Hensher, D. A., Wei, E., & Balbontin, C. (2022). Comparative assessment of zero emission electric and hydrogen buses in Australia. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 102, 103130. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103130>
- Hsu, Y.-T., Yan, S., & Huang, P. (2021). The depot and charging facility location problem for electrifying urban bus services. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 100, 103053. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103053>
- Hyland, M., & Mahmassani, H. S. (2018). Dynamic autonomous vehicle fleet operations: Optimization-based strategies to assign av to immediate traveler demand requests. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 92, 278–297. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.05.003>
- Ibarra-Rojas, O. J., Delgado, F., Giesen, R., & Muñoz, J. C. (2015). Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review. *Transportation Research Part B: Methodological*, 77, 38–75. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.03.002>
- Islam, A., & Lownes, N. (2019). When to go electric? a parallel bus fleet replacement study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 72, 299–311. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.05.007>
- Janovec, M., & Koháni, M. (2019). Exact approach to the electric bus fleet scheduling. *Transportation Research Procedia*, 40, 1380–1387. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.191>
- Kucharski, R., & Cats, O. (2020). Exact matching of attractive shared rides (exmas) for system-wide strategic evaluations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 139, 285–310. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.06.006>
- Kunith, A., Mendelevitch, R., & Goehlich, D. (2017). Electrification of a city bus network— an optimization model for cost-effective placing of charging infrastructure and battery sizing of fast-charging electric bus systems. *Intern. Journal of Sustainable Transportation*, 11 (10), 707–720. <https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1310962>
- Kuo, Y.-H., Leung, J. M., & Yan, Y. (2023). Public transport for smart cities: Recent innovations and future challenges. *European Journal of Operational Research*, 306(3), 1001–1026. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.06.057>
- Lajunen, A. (2018). Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods. *Journal of cleaner production*, 172, 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.066>
- Li, J.-Q. (2014). Transit bus scheduling with limited energy. *Transportation Science*, 48 (4), 521–539. <https://doi.org/10.1287/trsc.2013.0468>
- Li, J.-Q. (2016). Battery-electric transit bus developments and operations: A review. *International Journal of Sustainable Transportation*, 10 (3), 157–169. <https://doi.org/10.1080/15568318.2013.872737>
- Li, L., Lo, H. K., Xiao, F., & Cen, X. (2018). Mixed bus fleet management strategy for minimizing overall and emissions external costs. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 60, 104–118. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.10.001>
- Lin, Y., Zhang, K., Shen, Z.-J. M., Ye, B., & Miao, L. (2019). Multistage large-scale charging station planning for electric buses considering transportation network and power grid. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 107, 423–443. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.08.009>
- Liu, T., & Ceder, A. A. (2020). Battery-electric transit vehicle scheduling with optimal number of stationary chargers. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 114, 118–139. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.02.009>
- Lotze, C., Marszal, P., Schröder, M., & Timme, M. (2022). Dynamic stop pooling for flexible and sustainable ride sharing. *New Journal of Physics*, 24 (2), 023034. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/ac47c9>
- Ma, S., Zheng, Y., & Wolfson, O. (2014). Real-time city-scale taxi ridesharing. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 27(7), 1782–1795. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2014.2334313>
- Masoud, N., & Jayakrishnan, R. (2017). A real-time algorithm to solve the peer-to-peer ride-matching problem in a flexible ridesharing system. *Transportation Research Part B: Methodological*, 106, 218–236. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.10.006>
- Muñoz, P., Franceschini, E. A., Levitan, D., Rodriguez, C. R., Humana, T., & Perelmuter, G. C. (2022). Comparative analysis of cost, emissions and fuel consumption of diesel, natural gas, electric and hydrogen urban buses. *Energy Conversion and Management*, 257, 115412. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115412>
- Najmi, A., Rey, D., & Rashidi, T. H. (2017). Novel dynamic formulations for real-time ride-sharing systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 108, 122–140. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.10.009>

- Olsen, N., & Kliwer, N. (2020). Scheduling electric buses in public transport: Modeling of the charging process and analysis of assumptions. *Logist. Res.*, 13 (1), 4. https://doi.org/10.23773/2020_4
- Olsen, N., Kliwer, N., & Wolbeck, L. (2022). A study on flow decomposition methods for scheduling of electric buses in public transport based on aggregated time-space network models. *Central European Journal of Operations Research*, 883–919. <https://doi.org/10.1007/s10100-020-00705-6>
- Özkan, E., & Ward, A. R. (2020). Dynamic matching for real-time ride sharing. *Stochastic Systems*, 10 (1), 29–70. <https://doi.org/10.1287/stsy.2019.0037>
- Pelletier, S., Jabali, O., Mendoza, J. E., & Laporte, G. (2019). The electric bus fleet transition problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 109, 174–193. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.10.012>
- Perumal, S. S., Lusby, R. M., & Larsen, J. (2022). Electric bus planning & scheduling: A review of related problems and methodologies. *European Journal of Operational Research*, 301(2), 395–413. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.10.058>
- Qin, G., Luo, Q., Yin, Y., Sun, J., & Ye, J. (2021). Optimizing matching time intervals for ride-hailing services using reinforcement learning. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 129, 103239. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103239>
- Reuer, J., Kliwer, N., & Wolbeck, L. (2015). The electric vehicle scheduling problem: A study on time-space network based and heuristic solution. *Proceedings of the Conference on Advanced Systems in Public Transport (CASPT)*.
- Rogge, M., Van der Hurk, E., Larsen, A., & Sauer, D. U. (2018). Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure. *Applied Energy*, 211, 282–295. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.051>
- Santi, P., Resta, G., Szell, M., Sobolevsky, S., Strogatz, S. H., & Ratti, C. (2014). Quantifying the benefits of vehicle pooling with shareability networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (37), 13290–13294. <https://doi.org/10.1073/pnas.1403657111>
- Shaheen, S., & Cohen, A. (2019). Shared ride services in North America: Definitions, impacts, and the future of pooling. *Transport Reviews*, 39(4), 427–442. <https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1497728>
- Shah, K. J., Pan, S.-Y., Lee, I., Kim, H., You, Z., Zheng, J.-M., & Chiang, P.-C. (2021). Green transportation for sustainability: Review of current barriers, strategies, and innovative technologies. *Journal of Cleaner Production*, 326, 129392. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129392>
- Stiglic, M., Agatz, N., Savelsbergh, M., & Gradisar, M. (2015). The benefits of meeting points in ride-sharing systems. *Transportation Research Part B: Methodological*, 82, 36–53. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.07.025>
- Stumpe, M. (2024). A new mathematical formulation for the simultaneous optimization of charging infrastructure and vehicle schedules for electric bus systems. *Transportation Research Procedia*, 78, 402–409. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.02.051>
- Stumpe, M., Dieter, P., Schryen, G., Müller, O., & Beverungen, D. (2024). Designing taxi ridesharing systems with shared pick-up and drop-off locations: Insights from a computational study. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104063>
- Stumpe, M., Röbler, D., Schryen, G., & Kliwer, N. (2021). Study on sensitivity of electric bus systems under simultaneous optimization of charging infrastructure and vehicle schedules. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 10, 100049. <https://doi.org/10.1016/j.ejtl.2021.100049>
- Tafreshian, A., Masoud, N., & Yin, Y. (2020). *Frontiers in service science: Ride matching for peer-to-peer ride sharing: A review and future directions*. *Service Science*, 12(2-3), 44–60. <https://doi.org/10.1287/serv.2020.0258>
- Ulmer, M. W., Heilig, L., & Voß, S. (2017). On the value and challenge of real-time information in dynamic dispatching of service vehicles. *Business & Information Systems Engineering*, 59, 161–171. <https://doi.org/10.1007/s12599-017-0468-2>
- Ulmer, M. W., Thomas, B. W., Campbell, A. M., & Woyak, N. (2021). The restaurant meal delivery problem: Dynamic pickup and delivery with deadlines and random ready times. *Transportation Science*, 55 (1), 75–100. <https://doi.org/10.1287/trsc.2020.1000>
- UN. (2019). *World urbanization prospects: The 2018 revision*. <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>
- Van Engelen, M., Cats, O., Post, H., & Aardal, K. (2018). Enhancing flexible transport services with demand-anticipatory insertion heuristics. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 110, 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.12.015>

- van Kooten Niekerk, M. E., Van den Akker, J., & Hoogeveen, J. (2017). Scheduling electric vehicles. *Public Transport*, 9, 155–176. <https://doi.org/10.1007/s12469-017-0164-0>
- Vuchic, V. R. (2007). *Urban transit systems and technology*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470168066>
- Wang, X., Agatz, N., & Erera, A. (2018). Stable matching for dynamic ride-sharing systems. *Transportation Science*, 52 (4), 850–867. <https://doi.org/10.1287/trsc.2017.0768>
- Wen, M., Linde, E., Ropke, S., Mirchandani, P., & Larsen, A. (2016). An adaptive large neighborhood search heuristic for the electric vehicle scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 76, 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.06.013>
- Winkler, L., Pearce, D., Nelson, J., & Babacan, O. (2023). The effect of sustainable mobility transition policies on cumulative urban transport emissions and energy demand. *Nature Communications*, 14(1), 2357. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37728-x>
- Xylia, M., Leduc, S., Patrizio, P., Kraxner, F., & Silveira, S. (2017). Locating charging infrastructure for electric buses in Stockholm. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 78, 183–200. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.03.005>
- Yao, E., Liu, T., Lu, T., & Yang, Y. (2020). Optimization of electric vehicle scheduling with multiple vehicle types in public transport. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101862. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101862>
- Yu, X., & Shen, S. (2019). An integrated decomposition and approximate dynamic programming approach for on-demand ride pooling. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(9), 3811–3820. <https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2934423>
- Zhou, Y., Ong, G. P., Meng, Q., & Cui, H. (2023). Electric bus charging facility planning with uncertainties: Model formulation and algorithm design. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 150, 104108. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104108>
- Zhou, Y., Wang, H., Wang, Y., Yu, B., & Tang, T. (2024). Charging facility planning and scheduling problems for battery electric bus systems: A comprehensive review. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 183, 103463. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103463>

Die diesem Artikel zugrundeliegenden Arbeiten wurden teilweise mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 19S23003Q gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



Zuwendungsgeber:

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: 16THB0004A
Laufzeit: 01.09.2022 – 30.12.2025
Projekträger:

VDI | VDE | IT

VDI / VDE Innovation + Technik GmbH

5 Partner. 5 Standorte. 1 Netzwerk.



diserhub.de