

Evaluation von On-Demand-Verkehrssystemen im ÖPNV zur Förderung einer nachhaltigen Mobilität

Maurice Görgen¹, Marc Gennat²

Hochschule Niederrhein, SWK E² - Institut für Energietechnik & Energiemanagement,
Reinarzstraße 49, 47805 Krefeld,

+49 2151 822-6684¹, maurice.goergen@hs-niederrhein.de¹,

+49 2151 822-5112¹, marc.gennat@hs-niederrhein.de²,

<https://www.hs-niederrhein.de/swk-e2/>

Kurzfassung: Die Verbesserung des öffentlichen Nahverkehrs ist von zentraler Bedeutung für die Umsetzung der Ziele der Energiewende im deutschen Verkehrssektor. Längere Fahrzeiten gegenüber dem motorisierten Individualverkehr sind einer der Hauptgründe für die Nichtnutzung öffentlicher Verkehrsmittel. Daher sollte die Entwicklung neuer Ansätze zur Attraktivitätssteigerung des ÖPNV in Betracht gezogen werden. On-Demand-Konzepte sind wenig verbreitet und werden noch nicht in großem Umfang genutzt.

Dieses Papier soll dazu beitragen, das Potenzial solcher Konzepte für die erste und letzte Meile im öffentlichen Verkehr zu bewerten. Es konzentriert sich auf die konzeptionellen und algorithmischen Grundlagen. Am Beispiel der Stadt Krefeld wird ein Algorithmus entwickelt, mit dem mögliche Gebiete für ein Pilotangebot von On-Demand-Diensten identifiziert werden können. Nach der Bestimmung einer Quelle-Ziel-Zeit-Matrix zur Ermittlung der Nachfrage und der Ableitung von Straßengraphen und Katasterdaten werden Voronoi-Zellen mit ÖPNV-Haltestellen als Knotenpunkte gebildet und hierarchisch geclustert. In jeder Zelle wird On-Demand-Mobilität mikroskopisch simuliert. Es wird eine Kostenfunktion aufgestellt, die als Zielfunktion einer ganzzahligen linearen Optimierung dient und so eine optimale Kombination aus ungeclusterten und geclusterten Zellen bildet.

Keywords: On-Demand-Verkehr, Optimierung des öffentlichen Verkehrs, Voronoi-Zellen, Quelle-Ziel-Matrix, hierarchisches Clustering, ganzzahlige lineare Optimierung

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Mobilität ist eine der wichtigsten Komponenten des täglichen Lebens. Das beweist die Tatsache, dass jeder Deutsche durchschnittlich 80 Minuten pro Tag unterwegs ist [1]. Weniger Zeitaufwand für Mobilität ist gleichbedeutend mit mehr Lebensqualität und geringerer Umweltbelastung. Gleichzeitig soll die individuelle Mobilität aber nicht eingeschränkt werden, sondern sich durch Innovationen weiterentwickeln. Die Verkehrswende, beziehungsweise die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung ist der Teil der deutschen Energiewende, der ihre Ziele im Verkehrssektor verankern will [2]. Im Vergleich zum PKW können Busse und Straßen-/U-Bahnen im Nahverkehr 45 Prozent und 62 Prozent der Treibhausgasemissionen pro gefahrenen Personenkilometer einsparen, schon bei einer

durchschnittlichen Auslastung von 19 Prozent [3]. Neben der Umstellung auf klimafreundliche Kraftstoffe und Effizienzverbesserungen in der Antriebstechnik gilt daher auch die Stärkung des ÖPNV als zentraler Ansatz für die deutsche Verkehrswende [4].

1.1.1 Forschungsschwerpunkt

Der öffentliche Personennahverkehr wird in der Regel nicht kostendeckend betrieben. Ein Betriebsstopp ist wegen seiner Rolle in der Daseinsvorsorge aber nicht denkbar. Zusätzlich ist die Abdeckung der sogenannten letzten Meile logistisch komplex und teuer [5]. Diese letzte – und analog erste – Meile zu erschließen und an das konventionelle Liniennetz anzuschließen, kann die Aufgabe von On-Demand-Verkehren sein. Wo eine räumliche Ausdehnung oder Verdichtung des Netzes durch zusätzliche Linien oder Haltestellen nicht vorgesehen ist, können z.B. Kleinbusse nach Bedarf Fahrgäste zwischen variablen Standorten und Haltestellen befördern. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein solches Konzept ausgearbeitet.

Am Beispiel der Stadt Krefeld wird ein Modell entwickelt, mit dem die Potenziale für einen ergänzenden On-Demand-Verkehr evaluiert werden können. Ziel ist es, Kleinbusse möglichst optimal und kosteneffizient einzusetzen, ohne das bestehende ÖPNV-System anpassen zu müssen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der kombinatorischen Optimierung und Programmierung des Problems, weshalb die vorgestellte Arbeit als ein erster Schritt in Richtung einer realen, effizienten Umsetzung von On-Demand-Verkehr zu verstehen ist und als Hilfestellung zur flächendeckenden Versorgung durch On-Demand-Services dienen soll.

2 Methodik

Die Vorgehensweise der dargelegten Arbeit lässt sich in verschiedene Aufgabenpakete unterteilen, von denen jedes Arbeitspaket ein eigenes Vorgehen hat (siehe Abbildung 1). Zuerst müssen Daten gesammelt und aufbereitet werden. Diese werden in die Modellierung überführt. Anschließend wird eine Präkonditionierung mithilfe von Voronoi-Zellen und hierarchischem Clustering vorgenommen. Es folgt eine Verkehrssimulation der Zellen und die Ergebnisse der Simulation werden abschließend in ein Optimierungsmodell übergeben.

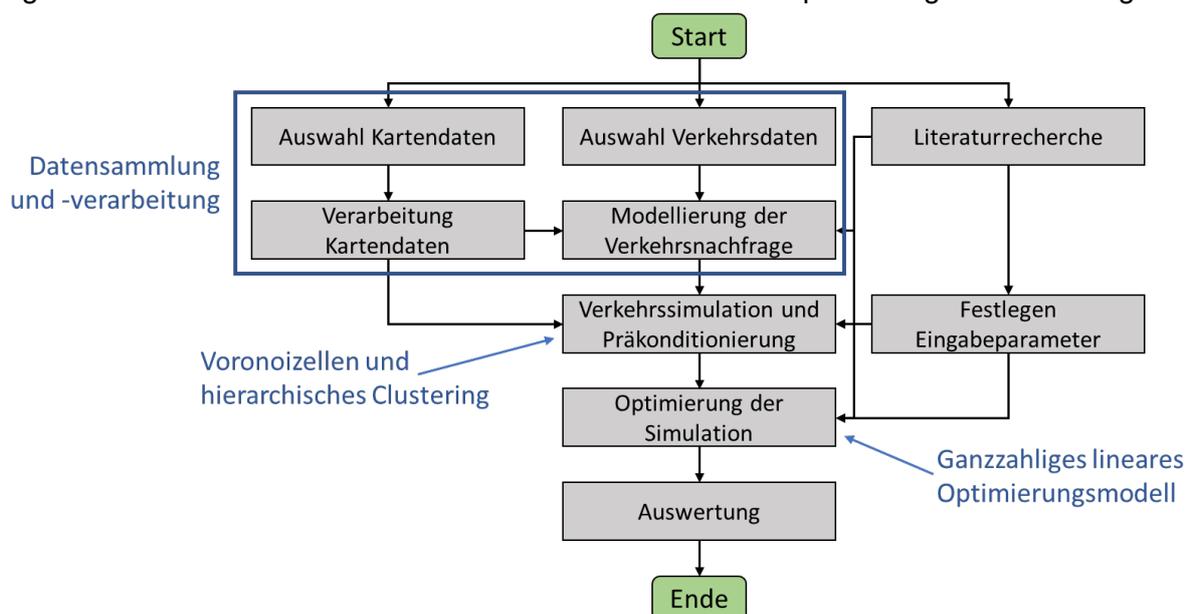


Abbildung 1: Flussdiagramm der angewandten Methodik

2.1 Datensammlung und -verarbeitung

Drei wesentliche Datenquellen sind als Input ausreichend. Erstens werden geografische Daten über das Straßennetz und die Bevölkerungsverteilung benötigt. Zweitens werden ein Netz des öffentlichen Personennahverkehrs sowie drittens Daten zum Mobilitätsverhalten herangezogen. Als geografische und ÖPNV-Basis wurde OpenStreetMap gewählt [6]. Die Daten sind für ganz Deutschland sowie zahlreiche andere Länder verfügbar und lassen sich somit für viele Anwendungsbeispiele verwenden. Hiermit wurden routingfähige Graphen für den Individualverkehr und den öffentlichen Verkehr sowie eine Kartengrundlage mit Referenzpunkten zu Einwohnerdaten in einem 400×400 Meter-Raster erstellt. Jeder Referenzpunkt ist mit verschiedenen Katasterdaten verknüpft, zu denen Längen- und Breitengrad des Punktes, Gesamt-, Arbeits-, Einkaufs-, Bildungs-, Unterhaltungs- und Wohnflächen von Gebäuden sowie die Anzahl der Gebäude, Einwohner und Beschäftigten gehören [7].

Als Datenbasis für die Verkehrsnachfrage lässt sich keine einheitliche Datenquelle verwenden, da Verkehrsmodelle für Gesamt-Deutschland zu grob aufgelöst oder nicht zu vertretbaren Kosten verfügbar sind. Umfragen für bestimmte Gebiete sind vorhanden, aber wegen Unterschieden in geografischen Gegebenheiten und dem ÖPNV-Netz nicht auf andere Regionen übertragbar. Daher muss je nach Anwendungsbeispiel eine spezifische Datengrundlage geschaffen werden.

2.2 Voronoizellen und hierarchisches Clustering

In dem Algorithmus wird ein zu betrachtender Bereich auf der Grundlage der Haltestellen des öffentlichen Verkehrs in Voronoi-Zellen unterteilt. Um ein On-Demand-Konzept in Form eines Erste- oder Letzte-Meile-Problems um einzelne Haltestellen herum aufzubauen, müssen zunächst Zonen um diese Haltestellen herum gebildet werden, innerhalb derer sich der Bus bewegen soll. Die Entscheidung, Voronoi-Zellen zu bilden, beruht auf verschiedenen Annahmen: Es wird davon ausgegangen, dass die Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel an der nächstgelegenen Haltestelle beginnt oder endet. Es mag zwar vorkommen, dass davon abgewichen wird und ein Mensch zu Fuß zu anderen Haltestellen geht, doch scheint dies eher die Ausnahme zu sein. Außerdem wird angenommen, dass Voronoi-Zellen eine hinreichend gute Zerlegung einer geografischen Fläche sind. In der Realität entspricht die real zu laufende Distanz zwischen zwei Punkten nicht der euklidischen, da sich auf dem Straßengraphen bewegt werden muss. Insbesondere in Grenzbereichen der Zellen kann es daher vorkommen, dass durch die Straßensituation die Anbindung zu einer anderen Haltestelle näher ist als die in der zugeordneten Voronoi-Zelle. Diese Abweichung wird durch diese Arbeit nicht abgebildet, da sie vernachlässigbar erscheint.

In einer hierarchischen Klassifikation werden Objekte entsprechend ihrer Homogenität in Klassen und beliebig viele Ebenen von Unterklassen eingeteilt. Diese Hierarchie kann durch ein metrisches Maß für die indizierte Heterogenität ergänzt werden. In dieser Arbeit wurden Voronoi-Zellen mit Hilfe eines hierarchischen Verfahrens auf der Grundlage der Abstände zwischen ihren Mittelpunkten – den Haltestellen – geclustert, ohne sich für eine Clustergröße zu entscheiden, sondern jede Ebene der Hierarchie als potenzielle neue Zelle zu betrachten. Auf diese Weise werden nach der Optimierung Zellen mit optimaler Größe ermittelt.

2.3 Simulation des On-Demand-Angebots

Die Quell-Ziel-Zeit-Matrix wird verwendet, um den ein- und ausgehenden Verkehr pro Referenzpunkt zu bestimmen. Die Verkehrsnachfrage der Punkte im 400×400 Meter-Raster wird zufällig um das Einzugsgebiet der Punkte verteilt. Die zeitliche Auflösung der Eingangsdaten ist in einem 15-Minuten-Intervall. Für jede Tour eines On-Demand-Fahrzeugs werden Traveling-Salesman-Probleme erzeugt, die mikroskopisch simuliert werden. Dazu wird der zeitlich sortierte Nachfragevektor iterativ verarbeitet. In jeder Iteration wird eine Anzahl nächster Nachfragen, die maximal der Fahrgastkapazität des Minibusses entspricht, berücksichtigt. Der Zeitpunkt, zu dem jeder Bus frühestens verfügbar ist, wird in einem Vektor dokumentiert, und die Fahrzeit der letzten Tour wird addiert. Jede Nachfrage ist zu bedienen. Liegt also der Zeitpunkt der nächsten Nachfrage vor der Verfügbarkeit der Busse, wird ein weiterer Bus initialisiert. Stehen genügend Busse zur Verfügung, werden erstere bevorzugt, um sie voll auszulasten und andere bei Spitzenbelastungen kurzzeitig einzusetzen. Für die Transportanforderung wird eine Vorlaufzeit von 15 Minuten angenommen. Ausgehend von dieser Annahme können nun alle Nachfragen als Ziele berücksichtigt werden, die spätestens 15 Minuten nach der ersten Nachfrage einer Tour abzüglich der Ankunftszeit eine Nachfrage „anmelden“ haben. Die an der Haltestelle beginnende Nachfrage wird unabhängig von dieser 15-Minuten-Wiederholungsbeschränkung nur dann berücksichtigt, wenn sich zum Startzeitpunkt die Fahrgäste an der Haltestelle befinden. Alle Personen, die aufgrund der Beschränkungen nicht in einer Tour befördert werden, werden in die nächste Iteration übertragen. Für alle beförderten Personen wird das Traveling-Salesman-Problem mit der Haltestelle als Startpunkt gelöst. Für die Kosten der Tour wird die Reisedauer in Minuten geschätzt, bei 25 Kilometern pro Stunde und 45 Sekunden Ein- und Ausstiegszeit pro Fahrgast.

2.4 Ganzzahlige lineare Optimierung

Die Zielformulierung der Optimierung ist in Formel 1 zu sehen. Das Ziel ist die Minimierung von $c^T x$, wobei x binär ist und angibt, ob eine Zelle (nicht geclustert oder geclustert) Teil der optimalen Zonenbildung ist. Jede Zelle darf nur genau einmal Teil der Lösungsmenge sein. Der Vektor x hat dabei die Länge der Summe aller ungeclusterten und geclusterten Voronoi-Zellen m und n .

$$\min\{c^T x \mid Ax = b \mid 0 \leq x \leq 1\}, c \in (0 \leq R)^{m+n}, x \in \{0,1\}^{m+n} \quad (1)$$

Es wird ein Kostenvektor c [Euro] erstellt (siehe Formel 2), in dem die Kosten des öffentlichen Verkehrsträgers c_s und der Nachfrager c_d gewichtet durch Faktor α enthalten sind.

$$c = \alpha \cdot c_s + (1 - \alpha) \cdot c_d \text{ mit } c_s \in (0 \leq R)^{m+n}, c_d \in (0 \leq R)^{m+n}, 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (2)$$

Die Kosten, die dem Betreiber der On-Demand-Fahrzeuge entstehen, lassen sich in drei Kategorien unterteilen: Fixkosten pro Bus b_f , entfernungsabhängige Kosten b_d und zeitabhängige Kosten b_t . Für jede Zelle werden die Gesamtkosten berechnet, indem diese Kostenkomponenten für die Anzahl der eingesetzten Busse o mit den Investitionskosten, der zurückgelegten Strecke d und der Betriebszeit bzw. Auslastung u verrechnet werden (siehe Formel 3). Das erstellte Kostenmodell basiert auf dem Berechnungsbeispiel Kostensteigerung im gewerblichen Personentransport mit Bussen der Fachgruppe Bus Österreich [8].

$$c_s = \{c_{s_1}, c_{s_2}, \dots, c_{s_{m+n}}\} \text{ mit } c_{s_i} = \sum_{j=1}^o b_f + \sum_{j=1}^o b_d \cdot d_j + \sum_{j=1}^o b_t \max(1, u_{d_j} \cdot 24) \quad (3)$$

Die Kosten auf der Nachfrageseite sind die benötigte Reise- und Wartezeit t_r und t_w aller Fahrgäste multipliziert mit einem monetären Bewertungsfaktor v (siehe Gleichung 4), so dass beide Kostenvektoren die Einheit Euro enthalten und für die Pareto-Optimierung gewichtet in c summiert werden können.

$$c_d = \{c_{d_1}, c_{d_2}, \dots, c_{d_{m+n}}\} \text{ mit } c_{d_i} = \sum_{j=1}^o p_j \cdot (t_{r_j} + t_{w_j}) \cdot v \quad (4)$$

Die Gleichheitsbeschränkung A besteht aus zwei Teilen (siehe Gleichungen in 5). Der Teil A_I bezieht sich auf den Teil der nicht geclusterten Zellen. Jede dieser Zellen enthält nur sich selbst, daher entspricht A_I einer Einheitsmatrix I . Für die geclusterten Zellen enthält die Matrix A_{II} spaltenweise Einträge darüber, welche Voronoi-Zellen zu diesem Cluster gehören. Zusammengefasst ergibt dies eine Matrix A , in der die Zugehörigkeit jeder Voronoi-Zelle i_g zu allen Zellen i , sowohl den nicht geclusterten als auch den geclusterten, Zeile für Zeile abgelesen werden kann. In der linearen Optimierung sind diese Zeilen mit dem entsprechenden Wert in $b_i \in 1$ gleichzusetzen, da jede Voronoi-Zelle genau einmal als Teil der Lösung vorkommen soll.

$$A = (A_I \ A_{II}) \text{ mit } A \in \{0,1\}^{m \times (m+n)} \text{ und } b \in 1^m$$

$$A_I = I^{m \times m} \text{ mit } I \in \{0,1\}^{m \times m} \quad (5)$$

$$A_{II} = (q_1, \dots, q_n) \text{ mit } A_{II} \in \{0,1\}^{m \times n} \text{ und } q \in \{0,1\}^m$$

3 Anwendungsbeispiel für die Stadt Krefeld

3.1 Datenanalyse und -verarbeitung

Für die Beispielregion Krefeld liegt eine Mobilitätserhebung vor, in der die relevanten Verkehrsaspekte Wegezweck, -entfernung, Verkehrsmittel, Zeit und Häufigkeit untersucht wurden [9]. Aufgrund der Stichprobengröße kann die Erhebung nur als bedingt zuverlässig angesehen werden. Geeignete Daten für Krefeld lagen zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit jedoch nicht mehr vor. Die Daten aus der Erhebung von [10] müssen daher als bestmögliche Alternative angesehen werden. Die Methodik ist jedoch unabhängig von der Datenqualität und kann auch mit einer besseren Datenbasis ohne Anpassungen angewendet werden.

3.2 Testgebiete für On-Demand-Angebote

Abbildung 2 zeigt eine kostenoptimale Zonenzuordnung mit α gleich 0,5 und v gleich 7,10 Euro pro Stunde als Beispiel für den Krefelder Stadtteil Hüls. Es ist zu erkennen, dass sich

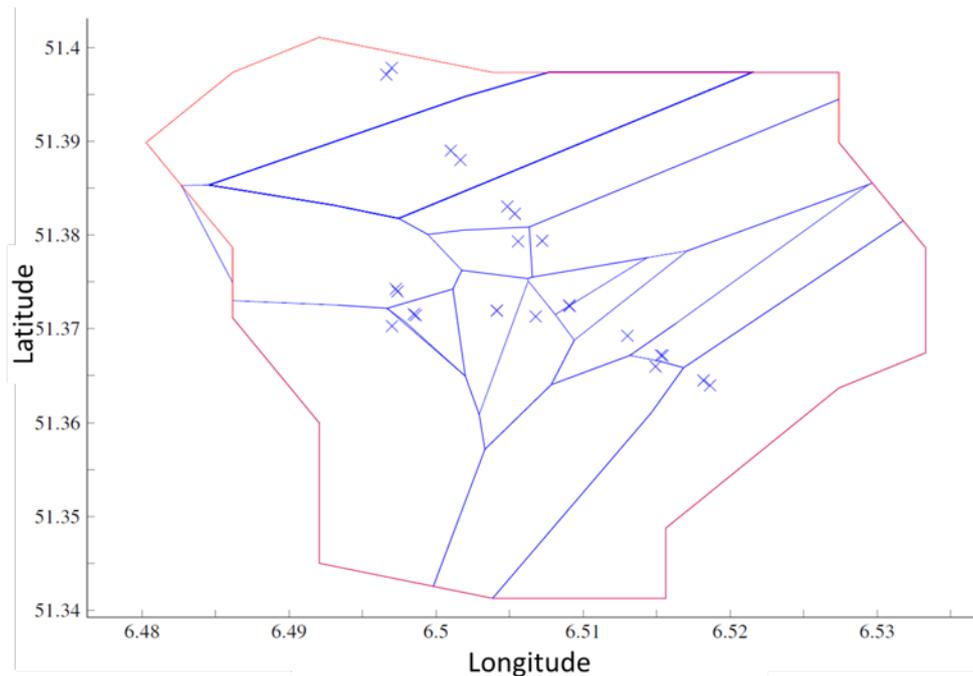


Abbildung 2: Kostenoptimale Zuteilung von Voronoi-Zellen am Beispiel des Krefelder Stadtteil Hüls

paarweise Haltestellen mit geringem Abstand zueinander zu Clustern kombiniert haben. Ebenfalls ist sichtbar, dass sich nicht alle Haltestellenpaare zu einem Cluster zusammengeschlossen haben, was auf ein hohes Fahrgastaufkommen an diesen Haltestellen hindeutet. Um zu entscheiden, ob ein On-Demand-Service in einer Zone potenziell nützlich ist, wird die durchschnittliche Zeitersparnis, die sich aus der Gehzeit abzüglich der Fahrzeit und der Wartezeit für die Nutzung des On-Demand-Service ergibt, für alle Gebiete berechnet. Dabei zeigt sich, dass die durchschnittliche Zeitersparnis zwischen -37 und +55 Minuten liegen kann. Negative Durchschnittswerte werden in der Realität nicht auftreten, da sich die Nachfrage auf andere Verkehrsträger verlagert. Für das Modell wurde angenommen, dass jede Person, die ÖPNV nutzen möchte und eine Entfernung zur Haltestelle hat, die die eigene Laufbereitschaft übersteigt, zu On-Demand-Nachfrage wird. Daraus resultiert, dass negative Zeiteinsparungen möglich und zu erwarten sind. Alle Gebiete in Krefeld mit positiven Zeiteinsparungen sind in Abbildung 3 dargestellt. Es ergibt sich kein eindeutiges Bild, aber es ist eine leichte Tendenz zu den äußeren Bereichen zu erkennen.

3.3 Optimierungsergebnisse und Analyse

Interpretiert man die Zeiterparnis in Abhängigkeit von der Größe der Zelle oder der durchschnittlichen Entfernung der Nachfragenden zur Haltestelle, ergibt sich ein klares Bild. Es ist ein deutlicher Zusammenhang zu erkennen, der durch die Regressionsgerade $y = 0,0114 \cdot x - 12,06$ mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,89$ angezeigt wird (siehe Abbildung 4). Daraus lässt sich abschätzen, dass ein vorteilhafter Betrieb von On-Demand-Services ab einer durchschnittlichen Entfernung zur Haltestelle von ca. 1058 Metern möglich ist. Je größer die Entfernung, desto größer ist die durchschnittliche Zeiterparnis.

Eine Kostenschätzung beschränkt sich auf die Menge der Zellen, die einen tatsächlichen Nutzen für die beförderten Fahrgäste erwarten lässt. Die durchschnittlichen Kosten pro Kilometer betragen 7,00 Euro mit einer Standardabweichung von 2,24 Euro pro Kilometer. Mit

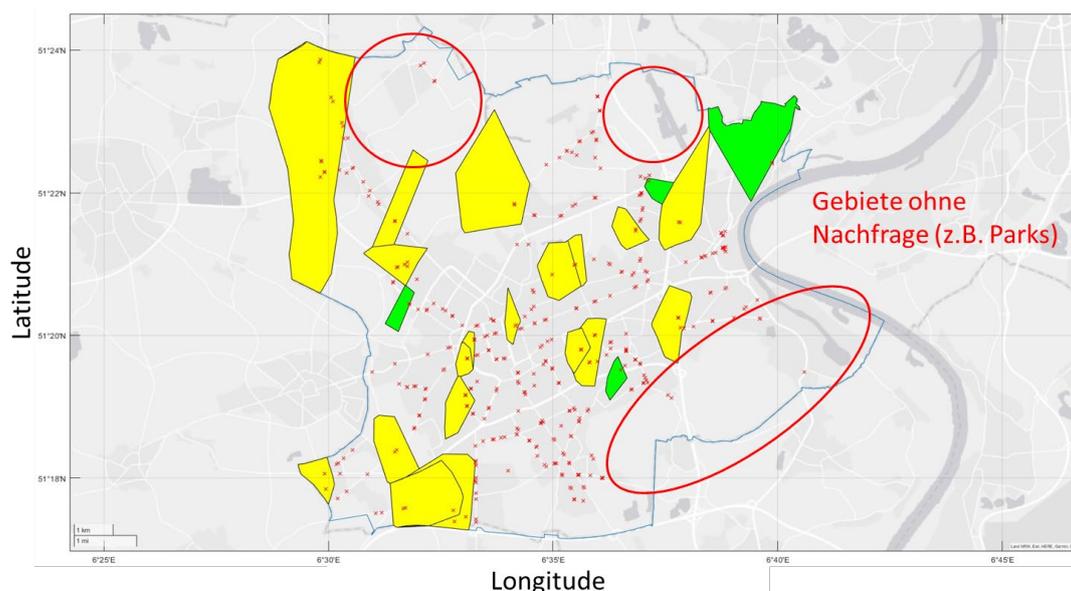


Abbildung 3: Gebiete mit nutzenbringendem Betrieb von On-Demand-Verkehren (gelb=geclusterte Zellen, grün=ungeclusterte Zellen, rotes Kreuz=ÖPNV-Haltestelle)

Ausnahme von drei Ausreißern liegen alle Kosten im Bereich von 4,08 bis 9,26 Euro pro Kilometer. Ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Fahrgäste und den Kosten ist nicht erkennbar. Im Durchschnitt entfallen 57,4 Prozent der Kilometerkosten auf die Angebotsseite. Daraus ergeben sich für den ÖPNV-Betreiber durchschnittliche Kosten von 4,02 Euro pro Kilometer für den Busbetrieb bei einer Spanne von 2,34 bis 5,32 Euro pro Kilometer. Die eingesetzten Busse haben einen durchschnittlichen Auslastungsgrad von 39,2 Prozent über den Betriebszeitraum.

4 Schlussfolgerung und Diskussion

Flächendeckende On-Demand-Konzepte sind noch weit von der gängigen Praxis entfernt. Die hier vorgestellten Ergebnisse liefern einen ersten Beitrag zum Aufzeigen der Abhängigkeiten für einen effizienten Betrieb. Diese Arbeit wurde mit der Erwartung angegangen, dass eine Ergänzung des Linienverkehrs durch einen On-Demand-Angebote zwar grundsätzlich möglich, aber nur in Gebieten mit schlechter ÖPNV-Anbindung sinnvoll ist. Nach den Ergebnissen dieses Beitrages bestätigt sich dieser Zusammenhang, da der On-Demand-Verkehr erst ab einem durchschnittlichen Anmarschweg von etwa einem Kilometer zur nächsten Haltestelle erste Vorteile für die Fahrgäste aufweist. Die Angebots- und die Nachfragefunktion streben nach demselben Optimum, bei dem nahegelegene Haltestellenpaare miteinander zu Clusterzellen zusammengefasst werden.

Die Zeitersparnis korreliert stark mit der durchschnittlichen Entfernung zur Haltestelle bzw. dem Verhältnis zwischen der Größe der Zone und der ÖPNV-Anbindung. Auch Zonen mit negativer Zeitersparnis haben – sofern eine Mindestschwelle überschritten wird – ausreichend Nachfrage haben, um ähnliche Auslastungen wie Voronoizellen mit positiver Zeitersparnis zu erzielen. Im Modell wurde angenommen, dass jede Nachfrage, deren Standort weiter entfernt ist als die eigene Gehbereitschaft, auf einen On-Demand-Service zurückgreift. Das Nachfrageniveau wurde bewusst nicht reduziert, um eine Aussage über das Potenzial des On-

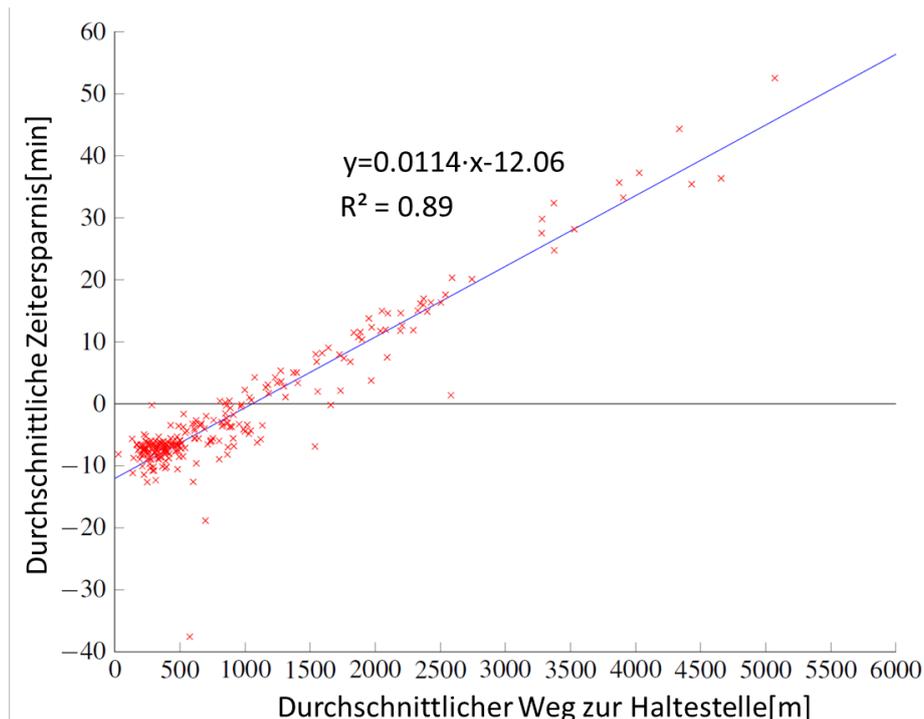


Abbildung 4: Zeitersparnis in Relation zum Anmarschweg zur Haltestelle

Demand-Verkehr im ÖPNV treffen zu können. Aber gerade im Hinblick auf Abschätzungen für mögliche Pilotprojekte und die initiale Nachfrage sollte das Niveau deutlich reduziert werden.

5 Ausblick und weitere Arbeit

In diesem Abschnitt werden potenzielle Entwicklungen und zukünftige Forschungsschwerpunkte im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit skizziert.

Die Schaffung einer Open-Data-Quelle-Ziel-Zeit-Matrix kann einen entscheidenden Beitrag zur einfachen Übertragbarkeit von Ergebnissen leisten. Mithilfe einer einheitlichen und universell einsetzbaren Methodik, in unterschiedlichen Betrachtungsregionen Verkehr zu modellieren, kann sowohl Vergleichbarkeit geschaffen werden, als auch die Möglichkeit Untersuchungsregionen zu ändern, ohne manuelle Datenverarbeitung wie hier in den Kapiteln 2.1 und 3.1 beschrieben.

Die Evaluation von Gebieten bezüglich der Eignung für On-Demand-Verkehre sollte nicht nur auf Basis des durchschnittlichen Abstandes zur nächstgelegenen Haltestelle erfolgen, sondern auf Basis vielfältiger Kriterien. Diese können Infrastrukturmerkmale wie Points of Interest, Wohn- und Arbeitsflächen, Fahrplan und Taktung des öffentlichen Nahverkehrs sowie die Entfernung zur nächsten Haltestelle einschließen. Zudem spielen Mobilitätsdaten wie die Anzahl der Verkehrsnachfragenden, Wegedauer und -entfernung, Wegezweck sowie die zeitliche Verteilung und der Modal Split eine wichtige Rolle. Zusätzlich müssen Bevölkerungsdaten wie Einwohnerzahl und Bevölkerungsdichte sowie Zellgeometrie, einschließlich Größe und Proportionen (Verhältnis von Länge zu Breite), berücksichtigt werden. Aufgrund der Vielzahl dieser Inputfaktoren ist eine manuelle Auswertung nicht praktikabel, weshalb die Anwendung von Künstlicher Intelligenz oder ähnlichen Methoden sinnvoll ist.

Ein detaillierterer Ansatz, den ÖPNV ganzheitlich mittels u.a. Ergänzung von On-Demand-Angeboten zu optimieren, ist in [11] dargestellt. Er skizziert einen zweistufigen Ansatz, der die Erweiterung der Quelle-Ziel-Beziehungen um alle Verkehrsmittel und die tageszeitliche Variation umfasst, gefolgt von mikroskopischen Verkehrssimulationen und makroskopischer Optimierung, um Potenziale für On-Demand-Angebote im innerstädtischen Verkehr zu bestimmen.

Um die Validität und Robustheit der erhobenen Daten zu gewährleisten, ist die Planung eines Reallabors ebenfalls eine Möglichkeit. Durch dessen Implementierung können die in dieser Arbeit erarbeiteten Modelle und Annahmen in realen Umgebungen überprüft und validiert werden. Ebenfalls wird dadurch eine praxisnahe Anwendung der Forschungsergebnisse ermöglicht und dazu beigetragen, eine fundierte Grundlage für zukünftige Entscheidungen im Bereich der Stadtplanung zu schaffen.

Diese vorgeschlagenen Schritte markieren wichtige Meilensteine für die Weiterentwicklung der Forschung und legen den Grundstein für zukünftige Anwendungen und Erweiterungen auf diesem Gebiet.

Quellenverzeichnis

- [1] Nobis, Claudia und Kuhnimhof, Tobias Mobilität in Deutschland - MiD. Ergebnisbericht. BMVI, infas, DLR, IVT, infas 360. Bonn, Berlin
- [2] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2013) Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS): Energie auf neuen Wegen
- [3] Umweltbundesamt (2020) Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Personenverkehr - Bezugsjahr 2019. <https://www.umweltbundesamt.de/bild/vergleich-der-durchschnittlichen-emissionen-0>. Zugriff 31.01.2024
- [4] Umweltbundesamt (2020) Verkehrswende für ALLE: So erreichen wir eine sozial gerechtere und umweltverträglichere Mobilität
- [5] Sommer C., Saighani A., Leonhäuser D. (2021) Ökonomische Bewertung städtischer Verkehrssysteme. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden
- [6] OpenStreetMap-Mitwirkende OpenStreetMap. www.openstreetmap.org. Zugriff 31.01.2024
- [7] Madsen M., Gennat M. (2021) Making Connected Mobility Work: Reisewiderstandsbestimmung mit automatisierter Umsteigeerkennung. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden
- [8] Kain, J., Kostensteigerung im gewerblichen Personenverkehr mit Autobussen, Berufsgruppe Bus, Hrsg. 2019
- [9] Stock W., Bernecker T. (2014) Verkehrsökonomie. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden
- [10] Helmert C., Henninger K. (2017) Modal-Split-Erhebung - Mobilitätsbefragung 2017 zum werktäglichen Verkehrsverhalten der Bevölkerung in Krefeld

[11] Spengler, L.; Gößwein, E.; Kranefeld, I.; Liebherr, M.; Kracht, F.E.; Schramm, D.; Gennat, M. From Modeling to Optimizing Sustainable Public Transport: A New Methodological Approach. *Sustainability* 2023, *15*, 8171. <https://doi.org/10.3390/su15108171>