



Hochschule Niederrhein  
University of Applied Sciences

SWK E<sup>2</sup> Working Paper 1/2022

# Entwicklung und Adaption von Optimierungsalgorithmen für On-Demand-Verkehre im öffentlichen Nahverkehr

Maurice Görden, Marc Gennat

März 2022

**SWK E<sup>2</sup>**  
Institut für Energietechnik und Energiemanagement  
Hochschule Niederrhein

## **SWK E<sup>2</sup> Institut für Energietechnik und Energiemanagement**

Hochschule Niederrhein  
Reinarzstraße 49  
47805 Krefeld

Tel.: +49 (0) 2151-822 6693

E-Mail: [energiezentrum@hs-niederrhein.de](mailto:energiezentrum@hs-niederrhein.de)

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

Maurice Görgen, Prof. Dr.-Ing. Gennat

E-Mail: [maurice.goergen@stud.hn.de](mailto:maurice.goergen@stud.hn.de)

[marc.gennat@hs-niederrhein.de](mailto:marc.gennat@hs-niederrhein.de)

**ISSN:** 2751-0050

Diese Working Paper Reihe wird von dem an der Hochschule Niederrhein angesiedelten SWK E<sup>2</sup> Institut für Energietechnik und Energiemanagement herausgegeben. Die Urheberrechte verbleiben bei den Autorinnen und Autoren. Inhalte und Meinungen in Artikeln sind die der jeweiligen Autorin bzw. des jeweiligen Autors und geben nicht die Ansichten Instituts oder der Hochschule wieder.

Die Autorinnen und Autoren erklären hiermit, dass im Rahmen dieser Arbeit kein materieller oder immaterieller Interessenkonflikt vorliegt.

## **Kurzzusammenfassung**

Die Verbesserung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) ist von zentraler Bedeutung, um die Ziele der deutschen Energiewende im Verkehrssektor zu etablieren. Eine hohe Fahrtzeit ist einer der Hauptgründe für die Nichtnutzung des ÖPNV, weshalb die Entwicklung neuer Modelle in Betracht gezogen werden sollte. On-Demand-Konzepte sind keine gängige Praxis und unerprobt. Diese Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, das Potenzial solcher Konzepte für die erste und letzte Meile im ÖPNV einzuschätzen. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der konzeptionellen und algorithmischen Basis, damit in Zukunft weiter darauf aufgebaut werden kann. Ein Programm wird am Beispiel der Stadt Krefeld entwickelt, auch mit dem Ziel mögliche Gebiete für Pilotprojekte zu identifizieren. Nach Ableiten einer Quelle-Ziel-Zeit-Matrix und Extrahieren von Straßengraphen und Katasterdaten werden Voronoizellen mit ÖPNV-Haltestellen als Knoten gebildet und hierarchisch geclustert. In jeder Zelle wird On-Demand-Mobilität simuliert. Es wird eine Gesamtkostenfunktion aufgestellt, welche als Zielfunktion eines linearen ganzzahligen Optimierungsmodells dient, damit eine optimale Kombination an ungeclusterten und geclusterten Zellen gebildet wird. Für die Eignung von Bereichen mit On-Demand-Angebot ist insbesondere die mittlere Distanz zwischen den Standorten der Nachfrage und der Haltestelle relevant. Eine Auswertung der Kosten zeigt, dass ein Betrieb von On-Demand-Verkehr bei ausreichender Nachfrage möglich, aber teuer ist, was auf eine geringe Auslastung, bedingt durch den Modellaufbau, zurückgeführt wird.

## **Abstract**

The improvement of local public transport is of central importance to establish the goals of the German Energiewende in the transport sector. High travel time is one of the main reasons for non-use of public transport, which is why the development of new models should be considered. On-demand concepts are not a common practice and untested. This paper aims to contribute to assessing the potential of such concepts for the first and last mile in public transport. The focus is on the conceptual and algorithmic basis so that it can be further built upon in the future. A programme will be developed using the city of Krefeld as an example, also with the aim of identifying possible areas for pilot projects. After deriving a source-destination-time matrix and extracting street graphs and cadastral data, Voronoi cells with public transport stops as nodes are formed and hierarchically clustered. On-demand mobility is simulated in each cell. A total cost function is established, which serves as the objective function of a linear integer optimisation model, so that an optimal combination of unclustered and clustered cells is formed. For the suitability of on-demand areas, the mean distance between the demand and stop locations is particularly relevant. An evaluation of the costs shows that on-demand operation is possible with sufficient demand, but is expensive, which is attributed to low utilisation, due to the model design.

**Keywords:** On Demand Transportation, Public Transport Optimisation, Voronoi Cells, Origin Destination Matrix, Linear Optimisation

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Methodik</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Anwendung am Beispiel der Stadt Krefeld</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>Diskussion und Fazit</b>	<b>18</b>
	<b>Literatur</b>	<b>22</b>
	<b>Anhang</b>	<b>25</b>
A	Modifizierte kumulierte Normalverteilung der Nicht-Laufbereitschaft zu einer Haltestelle	25
B	Geschlossene Voronoizellen für den Stadtteil Hüls	25
C	Kostenkalkulation für den Betrieb eines On-Demand-Kleinbusses am Beispiel eines Mercedes Vito Tourer Base	26
D	Gesamtkilometerkosten des Betriebs von On-Demand-Bussen in nutzenbringenden Zellen	27

## 1. Einleitung

Mobilität ist einer der fundamentalsten Bestandteile des alltäglichen Lebens. Das zeigt sich allein daran, dass jeder Deutsche im Durchschnitt 80 Minuten am Tag für das Zurücklegen von Wegen aufbringt [1]. Die Vermutung liegt nahe, die dafür aufgewendete Zeit wäre an anderer Stelle besser aufgehoben. Weniger Zeit für Mobilität ist gleichbedeutend mit mehr Lebensqualität und weniger Belastung der Umwelt. Dabei soll die individuelle Mobilität aber nicht eingeschränkt werden, sondern sich durch Innovationen weiterentwickeln. Die Verkehrswende, beziehungsweise die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS), ist der Teil der deutschen Energiewende, der ihre Ziele im Verkehrssektor etablieren soll [2, S. 5]. Im Vergleich zum PKW können Linienbusse im Nahverkehr und Straßen-/U-Bahnen Einsparungen von 45 Prozent und 62 Prozent der Treibhausgasemissionen je Personenkilometer erzielen, bereits bei einer durchschnittlichen Auslastung von 19 Prozent [3]. Daher wird neben dem Umstieg auf klimafreundliche Treibstoffe und Effizienzsteigerungen der Antriebstechnik auch die Stärkung der öffentlichen Verkehrsmittel als Kernansatz der Verkehrswende gehandelt [4, S. 6].

Der Ansatz, den öffentlichen Nahverkehr zu verbessern ist in den Verkehrswissenschaften nicht neu. Die meisten Konzepte versuchen dabei, das bestehende Angebot des Linienverkehrs zu optimieren. Beispielsweise [5], [6], [7], [8], [9], [10] und [11] fokussieren sich dabei auf angepasste Fahrpläne oder verbesserte Umlaufzyklen der eingesetzten Fahrzeuge, also eine zeitliche Optimierung. Bei [12], [13], [14], [15], [16] und [17] wird das lokale Verkehrsnetz durch angepasste Routen oder Haltestellenpositionen geografisch optimiert. Dem sogenannten Letzte-Meile-Problem kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Im Kontext des öffentlichen Nahverkehrs, wie auch in dieser Arbeit, ist die letzte Meile als der Abschnitt zu verstehen, der nicht durch Linienverkehr bedient wird, also der Weg zu der nächstgelegenen Haltestelle. Da der ÖPNV-Betrieb ohnehin meist unwirtschaftlich ist und die Versorgung der letzten Meile logistisch aufwendig und

teuer, mangelt es in der Praxis an funktionalen Konzepten. Genau diese erste und letzte Meile zu erschließen und an das konventionelle Liniennetz anzubinden, kann die Aufgabe von On-Demand-Verkehren sein. Dort, wo eine geografische Ausweitung oder Verdichtung des Netzes durch zusätzliche Linien oder Haltestellen nicht angedacht ist, können beispielsweise Kleinbusse auf Anfrage Passagiere zwischen variablen Standorten und Haltestellen befördern.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein solches Konzept ausgearbeitet. Am Beispiel der Stadt Krefeld wird ein Modell entwickelt, anhand dessen das Potenzial für einen ergänzenden On-Demand-Verkehr evaluiert werden kann. Ziel dabei ist es, Kleinbusse möglichst optimal und damit kosteneffizient einzusetzen, ohne den bestehenden Linienverkehr anpassen zu müssen. Der Schwerpunkt liegt auf der kombinatorischen Optimierung und Programmierung der Fragestellung, weshalb die vorgelegte Arbeit als erster Schritt hin zu einer realen Umsetzung von On-Demand-Verkehren zu verstehen ist. Zu Beginn wird auf Basis vorhandener Daten ein stochastisches Nachfragemodell mit Quelle-Ziel-Zeit-Matrix und Modal Split entwickelt. Mithilfe dieser Basis und eines vorangegangenen Projektes zur Abschätzung von Reisewiderständen können so die Auswirkungen eines sich verändernden ÖPNV-Angebots abgebildet werden. Anschließend wird unter Zuhilfenahme verschiedener Heuristiken eine Zielfunktion und Nebenbedingungen zur geografischen Optimierung des On-Demand-Verkehrs aufgestellt. Durch eine programmiertechnische Lösung des Problems können definierte Zonen gebildet werden, innerhalb derer eine mikroskopische Simulation von On-Demand-Verkehren für die erste und letzte Meile erfolgt. Das gesamte Modell wird kalibriert, validiert und bewertet. Abschließend wird geprüft, unter welchen Bedingungen ein wirtschaftlicher und nutzenbringender Betrieb möglich ist.

## 2. Grundlagen

Bei der beschriebenen Problemstellung handelt es sich um ein Last-Mile-Problem beziehungsweise ein Problem der letzten Meile, was eine Fragestellung aus der Distributionslogistik ist. Man nimmt dabei an, dass ein Gut gebündelt transportiert wird, bis es ab einem gemeinsamen Ort, dem Break-Bulk-Point, in einem One-to-Many-Verteilprozess auf verschiedene Standorte aufgeteilt wird. Dieser letzte Abschnitt verbraucht dabei verhältnismäßig viele Ressourcen und verursacht hohe Kosten [18, S. 11 ff].

Überträgt man das Last-Mile-Problem auf den öffentlichen Personennahverkehr ist der gebündelte Prozess die Fahrt im Linienverkehr, bis zu einer Ausstiegshaltestelle (entspricht dem Break-Bulk-Point), ab dem sich die Personen verteilen. Die letzte Meile im ÖPNV bezeichnet also die Strecke von der Haltestelle zum Zielort. Analog dazu ist das Problem der ersten Meile zu verstehen.

Für die Bewertung der bei der reisenden Person anfallenden Kosten wird der Value of Time (VoT) verwendet, welcher nicht nur die Kosten des Verkehrsmittels, sondern auch die aufgewendeten *Zeitkosten*, monetär bewertet, umfasst [19, S. 247 ff]. Dieser Zeitwert gibt an, was den reisenden Personen eine Stunde Zeiterparnis wert ist und variiert abhängig von Verkehrsmittel, Wegezweck und zurückgelegter Distanz, was unter anderem in [20], [21] und [22] evaluiert wurde. Im ÖPNV liegt dieser Wert zwischen 4,00 und 15,00 Euro pro Stunde, standardisiert können 7,10 Euro pro Stunde angenommen werden [21].

Sollen die erste oder letzte Meile nicht von jeder reisenden Person individuell, sondern in einem gemeinsamen Verkehrsmittel (wie On-Demand-Kleinbussen) zurückgelegt werden, stellt sich die Aufgabe als Traveling Salesman Problem dar. Das Problem des Handlungsreisenden (Travelling Salesman Problem, TSP) ist

eine Fragestellung der Kategorie der kombinatorischen Optimierungsprobleme und gehört zu der Komplexitätsklasse der NP-vollständigen Probleme. Bei dieser Problemstellung will ein fiktiver Handlungsreisender eine Anzahl an Standorten  $m$  jeweils genau ein Mal besuchen. Eine Strecke zwischen den Orten  $i$  und  $j$  entspricht der Kante  $\{ij\}$  und ist mit Kosten  $c_{ij}$  verbunden, eine binäre Hilfsvariable  $x_{ij}$  gibt dabei an, ob eine Strecke gefahren wird oder nicht. Wurden alle Orte besucht, soll die Tour zurück zu dem Ausgangsstandort führen. Die Gesamtkosten der Tour ergeben sich dabei aus den Einzelkosten der Strecken. Ziel des Handlungsreisenden ist es nun, die kostengünstigste Route zu identifizieren [23, S. 1573].

Unter der Bedingung jeden Ort genau ein Mal anzufahren, gibt es für jeden Ort also genau ein Kante, die auf ihn gerichtet ist und eine, die von ihm weg gerichtet ist. Das allein ist zur Beschreibung allerdings noch nicht ausreichend, da sich so einzelne, voneinander getrennte Subtouren bilden können, weshalb neben der Zielfunktion eine Nebenbedingung zur Subtoureliminierung aufgestellt werden muss. Dabei ist  $K$  eine beliebige nichtleere echte Teilmenge aller Orte bzw. Knoten. Die Anzahl der Kanten innerhalb dieser Menge darf maximal der Anzahl der Knoten abzüglich eins entsprechen, wodurch sichergestellt wird, dass diese Teilmenge nicht in sich geschlossen und so mit dem Rest der Knoten verbunden ist [23, S. 1574].

Die Zielfunktion und Nebenbedingung werden daher

$$\min \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m c_{ij} x_{ij} \quad \text{und} \quad \sum_{i \in K} \sum_{j \in K} x_{ij} \leq |K| - 1 \quad \text{mit} \quad \forall K \subset \{1, \dots, m\} \quad (1)$$

definiert. Die Anzahl aller Wege darf maximal der Anzahl aller Knoten abzüglich eins entsprechen zu lassen. Dadurch sind Subtouren ausgeschlossen.

Voronoi-Diagramme sind Teil der algorithmischen Geometrie, bei denen ein Raum oder eine Ebene in disjunkte Teile zerlegt wird [24, S. 364 f]. In dieser Arbeit ist nur die Zerlegung einer Ebene, der Karte von Krefeld, von Interesse. Die Ebene wird dabei in *Gebiete gleicher nächster Nachbarn* zu einer gegebenen Punktmenge  $P_i, i = 1, \dots, n$  unterteilt [25, S. 545 f].

$$V_i := \{P : \|P - P_i\| < \|P - P_j\| \quad \forall j \neq i\} \quad (2)$$

Ein Voronoi-Gebiet  $V_i$  enthält also alle Punkte, die näher an Gitterpunkt  $P_i$  liegen als an allen anderen Gitterpunkten. Als Abstand wird hier euklidische Distanz verwendet. So werden alle unbestimmten Punkte (der Raum/die Ebene) den bestimmten Punkten bzw. Knoten (Gitterpunkte) zugeordnet. Das simulierte Gebiet unterteilt sich so in nach außen offene Polyeder.

Der Zweck von Klassifikationen oder Clustering generell besteht darin, aus einer nichtleeren Menge von Objekten Teilmengen zu bilden. Dies soll anhand der Ähnlichkeit der Objekte nach bestimmten Kriterien erfolgen. Bei einer hierarchischen Klassifikation werden die Objekte nach ihrer Homogenität in Klassen und beliebig viele Ebenen von Unterklassen unterteilt. Diese Hierarchie ist ergänzbar durch ein metrisches Maß an Heterogenität, die indizierte Heterogenität, was in sich in einem Dendrogramm darstellen lässt.

### 3. Methodik

Die Vorgehensweise dieser Arbeit lässt sich verschiedene Aufgabenpakete unterteilen, von denen jedes Arbeitspaket eine eigene Methodik hat. Zuerst wurden die Möglichkeiten überprüft, an Kartendaten für die

Anwendung an einem Beispielproblem zu gelangen. Die Rohdaten wurden für den Anwendungsfall umgeformt und sind anschließend in die Modellierung eines Verkehrsmodells und die nachfolgende Simulation eingeflossen. Parallel wurde nach geeigneten Verkehrsdaten gesucht, welche als Basis für ein Verkehrsnachfragemodell dienen können. Außerdem fand eine Literaturrecherche statt, um an das erforderliche Wissen für die weiteren Arbeitsschritte zu gelangen und eine Übersicht über Ansätze zu den selben oder ähnlichen Fragestellungen zu erhalten. Auf Basis der vorhandenen Daten und Informationen wurde ein Nachfragemodell entwickelt, welches anschließend in ein voroptimiertes Simulationsmodell integriert wurde. Dieses Modell wurde im letzten Schritt optimiert und die Ergebnisse ausgewertet.

Bei der Auswahl geeigneter Kartendaten ergaben sich durch die Aufgabenstellung diverse Anforderungen. Um ein Routing von On-Demand-Bussen in einem Straßenverkehrsnetz erstellen zu können, musste entweder eine API-Schnittstelle zu einer entsprechenden Software verfügbar sein oder ein frei verfügbarer Straßengraph, in dem ein eigenes Routing erfolgen kann. API-Schnittstellen sind in der Regel nicht kostenfrei oder nur begrenzt nutzbar. Ein Zugriff auf Google Maps ist auf 20.000 kostenlose Routing-Abfragen pro Monat limitiert [26], was für den Anwendungsfall dieser Arbeit deutlich zu wenig ist, weshalb eine API-Schnittstelle als Lösung verworfen wurde. Für frei verfügbare Kartendaten wurde OpenStreetMap (OSM) ausgewählt [27]. Das Prinzip von OpenStreetMap ist ein Gemeinschaftsbetrieb, bei dem jeder die Karte bearbeiten und erweitern kann. Die Daten stehen als *Open Data*, gemäß der Open Data Commons Open Database Lizenz (ODbL) bei Quellenangabe zur freien Verfügung. Mithilfe von OpenStreetMap konnten so Daten zu Straßenverkehrs- und ÖPNV-Netz gewonnen werden.

Die Vorteile von OpenStreetMap liegen mit der kostenlosen und freien Nutzung auf der Hand. Dadurch ist auch die Möglichkeit gegeben, selbst an den Daten zu arbeiten und bei Bedarf nachzubessern. Allerdings gibt es in OSM keinen systematischen Qualitätscheck der eingetragenen Daten. Auch variiert der Detailgrad an eingegebenen Daten je nach Kartenausschnitt und der dort vertretenen OSM-Community stark. Daher muss jeder Kartenauszug vor der Nutzung händisch auf Korrektheit und Detailgrad geprüft werden.

OpenStreetMap-Karten beruhen auf den drei Elementen *Node*, *Way* und *Relation*. Ein *Node* ist ein einzelner Knotenpunkt auf der Karte. Ein Knoten besteht aus den drei Kerninformationen Knoten-ID, Longitude und Latitude. Zusätzlich können ihm eine beliebige Anzahl an Tags zugeordnet werden. Tags werden verwendet, um die genannten Elemente zu beschreiben und bestehen jeweils aus einem Schlüssel (*key*) und einem Wert (*value*). Der Schlüssel gibt die Kategorie des Tags vor, der Wert detailliert diese Kategorie. Der Tag *highway = motorway* beschreibt beispielsweise eine Straße, bei dem es sich um eine Autobahn handelt. Das zweite Element *Way* beschreibt eine Linie auf der Karte. Sie setzt sich durch eine geordnete Reihenfolge von Knoten zusammen. Ein *Way* enthält daher eine Liste von Knoten-IDs sowie zugeordnete Tags. Dadurch werden nicht nur Wege und Straßen abgebildet, sondern alle linienförmigen Objekte wie z.B. Flüsse oder Mauern. Ein *Way* kann offen (endet mit einem Knoten) oder geschlossen (der erste entspricht dem letzten Knoten) sein. Das letzte Element *Relation* wird verwendet, um logische Zusammenhänge zwischen Objekten zu beschreiben. Es enthält Tags und eine beliebige Anzahl von *Nodes* und *Ways*.

Neben Daten zum Straßenverkehrsnetz und ÖPNV wurden außerdem hinreichend präzise Katasterdaten mit Informationen zu Einwohnerzahl und Flächen benötigt, damit diese mit den Daten zum Verkehrsverhalten kombiniert werden können. Für das Anwendungsbeispiel der Stadt Krefeld wurden diese bereits im Vorfeld durch [28] als Raster von Referenzpunkten im 400-Meter x 400-Meter-Raster aufbereitet. Die Referenzpunkte und deren Daten wurden ebenfalls mithilfe von OpenStreetMap erstellt.

Die Suche nach geeigneten Daten zu dem Verkehrsverhalten wurde durch die Anforderungen stark eingegrenzt. Es mussten Umfrage- oder Verkehrsdaten der Stadt Krefeld identifiziert werden, da diese als Anwendungsbeispiel ausgewählt wurde. Umfragen oder Daten aus anderen Städten lassen sich aufgrund von Unterschieden der geografischen Situation und anderem ÖPNV-Netz und dadurch anderem Verkehrsverhalten nicht auf Krefeld übertragen. Es konnte daher nur eine Befragung aus dem Jahr 2017 durch die Stadt Krefeld beauftragt und durch das Ingenieurbüro Helmert durchgeführte Befragung gefunden werden [29]. Das Ziel war es, durch eine standardisierte Stichprobenbefragung per Telefon, Brief und online belastbare Ergebnisse über Zeitpunkte, Personenzahlen, Verkehrsmittel und Zwecke des Verkehrsverhaltens der Bevölkerung zu gewinnen. Überprüft man die Befragung anhand der gängigen Kriterien Objektivität, Durchführung, Auswertung Interpretation, Reliabilität und Validität zeigt sich jedoch nur eine bedingte Qualität zur Verwendung für ein Verkehrsnachfragemodell. Die Objektivität der Durchführung scheint durch einen standardisierten Fragebogen bzw. Fragenkatalog gegeben zu sein. Die Objektivität der Auswertung und Interpretation ist für diese Arbeit nicht von Relevanz, da die Rohdaten zur Verfügung stehen. Die Reliabilität muss jedoch infrage gestellt werden. Mit 2254 Personen wurde insgesamt 1 Prozent der Krefelder Bevölkerung befragt, welche zufallsverteilt ausgewählt wurde. Die Umfragengröße bricht sich jedoch in viele Teilgruppen herunter. Im Krefelder Stadtteil Hülser Berg konnten beispielsweise nur 14 Personen befragt werden. Der Zeitraum der Befragung war Ende März bis Ende Mai an Werktagen außerhalb der Schulferien, also innerhalb einer Jahreszeit, weshalb saisonale Einflüsse nicht ausgeschlossen werden können. Auch wurde in der Umfrage nach Angaben zu den zurückgelegten Wegen zum Stichtag gemacht und nicht etwa über mehrere Tage dokumentiert, was das Ergebnis weniger reliabel macht. In der Umfrage wurden Daten zu allen in relevanten Aspekten für Mobilitätsanalysen (Zweck, Distanz/Raum, Verkehrsmittel, Zeit und Häufigkeit, vgl. [19, S.1 f]) gemacht, weshalb das Ergebnis unter der Bedingung der mangelnden Reliabilität als valide angesehen werden kann. Es wird also erwartet, dass bei einer erneuten Untersuchung zur Verkehrsnachfrage abweichende Ergebnisse entstehen können. Allerdings liegen zum Zeitpunkt dieser Arbeit keine besser geeigneten Daten für Krefeld vor. Die Daten der Umfrage von [29] müssen also als bestmögliche Alternative angesehen werden. Außerdem ist das folgende Simulations- und Optimierungsmodell unabhängig der Verkehrsnachfrage entwickelt, wodurch sich bei besserer Datenlage ohne Anpassungen neue Auswertungen erzeugen lassen.

Die Literaturrecherche konzentrierte sich für wissenschaftliche Forschung auf die Datenbanken *EBSCO*, *ScienceDirect*, *SpringerLink* und *Web of Science*. Dabei wurde sich auf deutsch- und englischsprachige Literatur beschränkt. Je nach Thematik wurde dazu nach Schlagworten zu den Themen Modellierung von Verkehr, Verkehrssimulation, Optimierung von ÖPNV und On-Demand-Verkehr auf Deutsch und Englisch gesucht. Für allgemein zugängliche Informationen wurden gängige Internet-Suchmaschinen verwendet.

Das Verarbeiten der OpenStreetMap-Daten ist ein zweigeteilter Prozess. Für den ersten Teil wurde auf die Java-basierten Anwendung *Osmosis* zurückgegriffen, welche aufgrund der einfachen Möglichkeit aus einem OSM-Kartenausschnitt die Elemente nach definierten Tags zu filtern verwendet wurde [30]. Teil zwei der Verarbeitung sowie der weitere Prozess erfolgte in Matlab 2021a [31]. Matlab ist eine Software, die sich auf die Lösung von mathematischen Problemen und deren grafischer Darstellung konzentriert.

Die Modellierung der Verkehrsnachfrage ist auf Basis der geschilderten Umfrage [29] und der aufbereiteten OpenStreetMap-Daten [28] erfolgt. Da die Aussagekraft der Umfrage aber fraglich ist, muss auch das Verkehrsnachfragemodell als bedingt aussagekräftig angesehen werden. Für die Entwicklung einer Simulation und Optimierung von On-Demand-Bussen ist Nachfrage als Input-Parameter jedoch erforderlich.



In der Verkehrssimulation entstehen iterativ zu lösende Travelling Salesman Probleme für jede zu fahrende Tour eines On-Demand-Busses. Diese sind in der Komplexität limitiert auf die Kapazität eines Kleinbusses. Probleme dieser Größenordnung können effizient und schnell mit fertigen Solvern gelöst werden. Außerdem liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit nicht auf der Lösung von TSP, weshalb ein Zugriff auf den Concorde TSP Solver in den Matlab-Code integriert wurde [32]. Der Concorde Solver ist ein Programm nach Stand der Technik, das bereits TSP in der Größenordnung von 85.900 Knoten gelöst hat. Die TSP in der Größenordnung dieser Arbeit werden in wenigen Millisekunden bearbeitet.

## **4. Anwendung am Beispiel der Stadt Krefeld**

Ziel dieses Kapitels und damit dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Konzeptes für On-Demand-Kleinbusse im öffentlichen Personennahverkehr am Beispiel der Stadt Krefeld. Diese On-Demand-Busse sollen nur für die erste und letzte Meile im ÖPNV eingesetzt werden, die sonst üblicherweise zu Fuß zurückgelegt wird. Das entwickelte Konzept soll anhand einer Kostenfunktion optimiert werden. Diese Kostenfunktion umfasst die Gesamtkosten des Konzeptes für Angebot und Nachfrage, also die Kosten für den Betrieb der Kleinbusse sowie die Zeitkosten der Passagiere. Die Kosten für den Anbieter werden aus einer Kostenrechnung für den Betrieb von Bussen abgeleitet. Die Kosten für die Nachfrage umfassen nur die Zeitkosten, von der Einbeziehung eines Ticketpreises wird abgesehen. Dies hat den Hintergrund, dass es nicht das Ziel dieser Arbeit ist, ein real umzusetzendes Konzept inklusive aller einzubeziehenden Faktoren zu erstellen, sondern den ersten Schritt dort hinsetzen soll, durch Abschätzungen zum Potenzial und zur Machbarkeit getroffen werden können. Deswegen wird anstelle eines Angebotspreises am Ende eine Bewertung getroffen, ab welchen Kosten je Personenkilometer ein Betrieb denkbar ist.

Da eine ausreichende Anbindung an den ÖPNV als Teil der Daseinsvorsorge verstanden wird, soll nach Möglichkeit jegliche Nachfrage bedient werden. Davon wird nur abgewichen, wenn sich im Verlauf der Simulation zeigt, dass ein nutzenbringender Betrieb an einigen Stellen nicht möglich ist. Ein Nutzen für die Passagiere wird dann unterstellt, wenn sie mittels On-Demand-Angebot die erste oder letzte Meile schneller zurücklegen als mit dem Status quo, für den eine Fortbewegung zu Fuß angenommen wird.

Das On-Demand-Angebot wird als Ergänzung zum bestehenden Linienverkehr entwickelt und soll diesen weder verändern, noch ersetzen. Es werden keine Haltestellen umpositioniert oder entfernt und die Fahrpläne werden nicht verändert. Auch soll ausgeschlossen werden, dass die Busse im Prinzip eines Taxis betrieben werden, bei dem sowohl Start- als auch Endpunkt variabel sind. Ziel ist der Betrieb als erstes oder letztes Glied eines intermodalen Weges, der auch die Nutzung des Linienverkehrs einschließt. Daher wird von einem Transportkonzept abgesehen, bei dem man von jedem beliebigen Standort zu jeder beliebigen Haltestelle transportiert werden kann. Dies impliziert die Bildung von Gebieten, innerhalb derer man zu einer definierten Haltestelle transportiert wird.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt keine Simulation des Wechselverhaltens von anderen Verkehrsträgern. Dazu ist ein Vergleich zwischen Fortbewegung in einem bestehenden On-Demand-Angebot und allen Alternativen notwendig. Anschließend müssen Abschätzungen zum Wechsel des Verkehrsträgers aufgrund der Verbesserung des ÖPNV-Angebots und einem Vergleich der Reisewiderstände getroffen werden. Durch die veränderte Nachfrage ist das Angebot nicht mehr aktuell, wodurch es angepasst werden muss, wodurch sich die Nachfrage erneut anpasst. Hier wäre also eine iterative Methodik notwendig, welche den Umfang dieser Arbeit übersteigt.

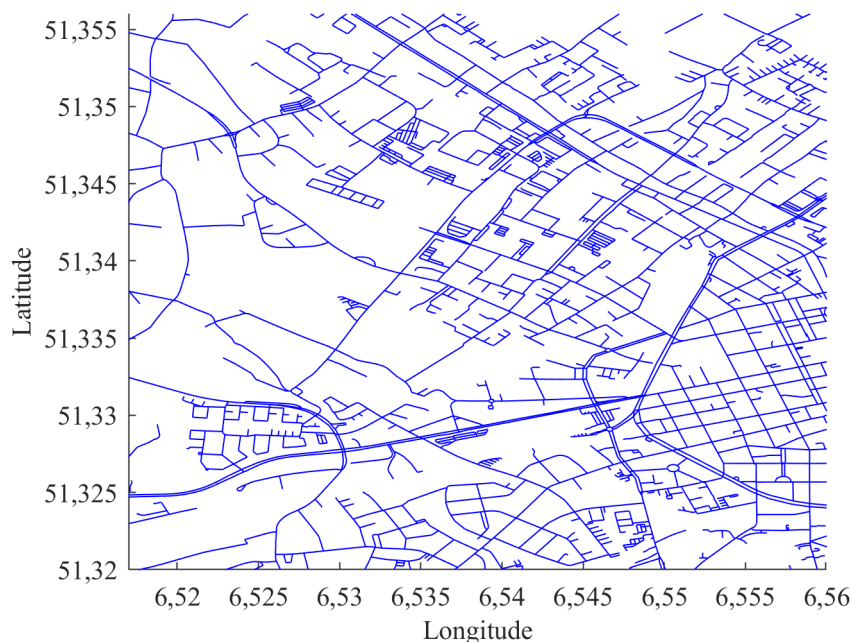
Als geeignete Kenngröße für die Kostenoptimierung werden Gesamtkosten in Euro pro Betriebstag angenommen. Um den Nutzen für die Passagiere abzuschätzen wird die durchschnittliche Zeitersparnis im Vergleich zum Status quo in Minuten je Passagier angesetzt.

Als Basis der Simulation des Verkehrs und der darauf aufbauenden Entwicklung eines Konzeptes für möglichst optimalen Betrieb von On-Demand-Bussen sind im Wesentlichen drei Input-Informationen eingeflossen:

1. Eine Liste mit gerasterten Referenzpunkten inkl. Informationen zugehöriger Einwohnerzahl und Katasterdaten [28]
2. Ein OpenStreetMap-Auszug des betrachteten Bereichs [27]
3. Umfragedaten mit Informationen zu dem werktäglichen Verkehrsverhalten der Bevölkerung [29]

In Krefeld sind im Voraus an diese Arbeit 794 Referenzpunkte im Abstand von 400 Metern angesetzt worden. Jedem Referenzpunkt sind verschiedene Katasterdaten zugeordnet, welche unter anderem Longitude und Latitude des Punktes, Gesamt-, Arbeits-, Einkaufs-, Bildungs-, Freizeit- und Wohnfläche der Gebäude und Zahl der Gebäude, Einwohner und Arbeitnehmer umfassen. Für die Berechnung der verschiedenen Nutzflächen sind in Vorarbeit aus OpenStreetMap verschiedene Gebäudefunktionen und deren Flächen identifiziert worden. Jeder Gebäudefunktion ist ein Flächenfaktor zugeordnet worden, anhand dessen die Fläche anteilig den Kategorien zugerechnet werden kann. Beispielsweise bei einem Gebäude mit der zugeordneten Funktion *Polizei* wird 80 Prozent dem Flächenzweck Arbeit zugeordnet und 20 Prozent entfallen auf Besorgungen anderer Art.

Aus dem OpenStreetMap-Auszug können mittels Verarbeitung von Osmosis und anschließender Weiterverarbeitung in Matlab handhabbare Straßendaten gewonnen werden. Dafür werden die Daten auf MIV-zugängliche Wege reduziert und Inselnetze (bspw. Parkplätze ohne öffentlichen Zugang) entfernt. Ein Auszug des resultierenden Straßengraphen ist in Abbildung zu sehen 1. Das ÖPNV-Netz lässt sich nach gleichem Schema, nur ohne Entfernen von Inselnetzen, verarbeiten.



**Abbildung 1:** Geografische Darstellung eines Ausschnitts des MIV-Graphen

Aus der Mobilitätsbefragung zum werktäglichen Verkehrsverhalten der Bevölkerung in der Stadt Krefeld [29] stehen die Rohdaten zur Verfügung, mithilfe derer Eingangsvariablen erstellt wurden, auf welchen die nachfolgende Verkehrssimulation basiert. Die Qualität der Daten ist im Methodikteil bereits bewertet worden. Folgende Befragungsdaten sind in das Modell eingeflossen:

1. Zeitlicher Ablauf der Verkehrsmittelnachfrage eines Werktags in 15-Minuten-Intervallen je Verkehrsmittel (Bahn, Bus, E-Bike, Fahrrad, zu Fuß, KFZ-Selbstfahrer, KFZ-Mitfahrer, motorisiertes Zweirad, RE/RB und U-/Straßenbahn)
2. Modal Split je Stadtteil
3. Fahrdistanzen je Verkehrsmittel unterteilt in Intervalle(0-1 km, 1-2 km, 2-3 km, 3-4 km, 4-5 km, 5-6 km, 6-7 km, 7-8 km, 8-9 km, 9-10 km, 10-15 km, 15-20 km, 20-50 km und 50+ km)
4. Unterteilung nach Wegezweck je Zeitintervall (Arbeit, Ausbildung, Besorgungen, Besuch/private Erledigungen, Bringen/Holen, Einkauf mit sonstigem oder täglichem Bedarf, Freizeit, geschäftlich unterwegs und zu Hause/Wohnen)

Zunächst wird auf Basis dieser Daten für jeden Referenzpunkt eine Reismatrix differenziert nach Zeitintervall, Verkehrsmittel, zurückgelegter Distanz und Wegezweck erzeugt. Um daraus eine Quelle-Ziel-Zeit-Matrix erstellen zu können, werden für jeden Startreferenzpunkt potenzielle Zielpunkte anhand von passender Distanz und zu dem jeweiligen Wegezweck passendem Flächenzweck identifiziert. Werden mehrere Zielpunkte gefunden, verteilt sich der Verkehr im Startpunkt anteilig nach der zweckmäßigen Fläche der Zielpunkte. Können keine Ziele identifiziert werden, wird angenommen, dass der Verkehr ein Ziel außerhalb Krefelds hat.

Nachdem alle Daten in Form der Quelle-Ziel-Zeit-Matrix (*ODM.mat*), den Katasterdaten (*reference\_points.mat*), dem Straßengraphen (*miv\_table.mat* sowie *hw\_node\_vec.mat*) und den ÖPNV-Linienpläne und den Stanorten der zugehörigen Haltestellen (*public\_transport.mat*) aufbereitet worden sind, kann die eigentliche Simulation sowie die Optimierung beginnen. Der zusammengefasste Ablauf ist in Abbildung 2 zu sehen. Nach Festlegen einiger Startparameter und Laden der benötigten Daten startet mit *main\_simulation.m* der Algorithmus für Krefeld. In der Unterfunktion *simulate\_district.m* wird anschließend die Nachfrage je Stadtteil nachgebildet und der Stadtteil wird in Voronoi-Zellen unterteilt. Jede dieser Zellen wird in *simulate\_cell*. simuliert. Die Funktion *cluster\_stops.m* bildet aus den Zellen alle potenziellen Kombinationen von hierarchischen Clustern. Diese Zellcluster werden erneut in *simulate\_cell*. simuliert. Im letzten Schritt von *simulate\_district* werden alle ungeclusterten und geclusterten Zellen in *evaluate\_district.m* anhand bestimmter Kenngrößen evaluiert, welche später als Datengrundlage der Optimierung dienen. Dieser Prozess wird für alle Stadtteile wiederholt.

In *simulate\_district* werden zunächst alle Referenzpunkte und Haltestellen im simulierten Stadtteil identifiziert. Jedoch besteht keine logische Verbindung zwischen den Haltestellen und dem Straßenverkehrsnetz, was für ein Routing im Straßengraphen erforderlich ist. Daher erhält jede Haltestelle den nächstgelegenen Knoten im MIV-Graphen als Stellvertreter, welcher mittels einer Luftlinienmatrix identifiziert wird. Wird eine Haltestelle von verschiedenen ÖPNV-Linien angefahren, ist sie auch mehrfach aus OpenStreetMap exportiert worden. Diese Redundanzen werden entfernt. Anschließend wird der Ein- und Ausgangsverkehr je Referenzpunkt mithilfe der Quelle-Ziel-Zeit-Matrix ermittelt. Bisher konzentriert sich der Verkehr jedoch auf einen Referenzpunkt, der stellvertretend für den Bereich um ihn herum steht. Die Punkte sind in einem

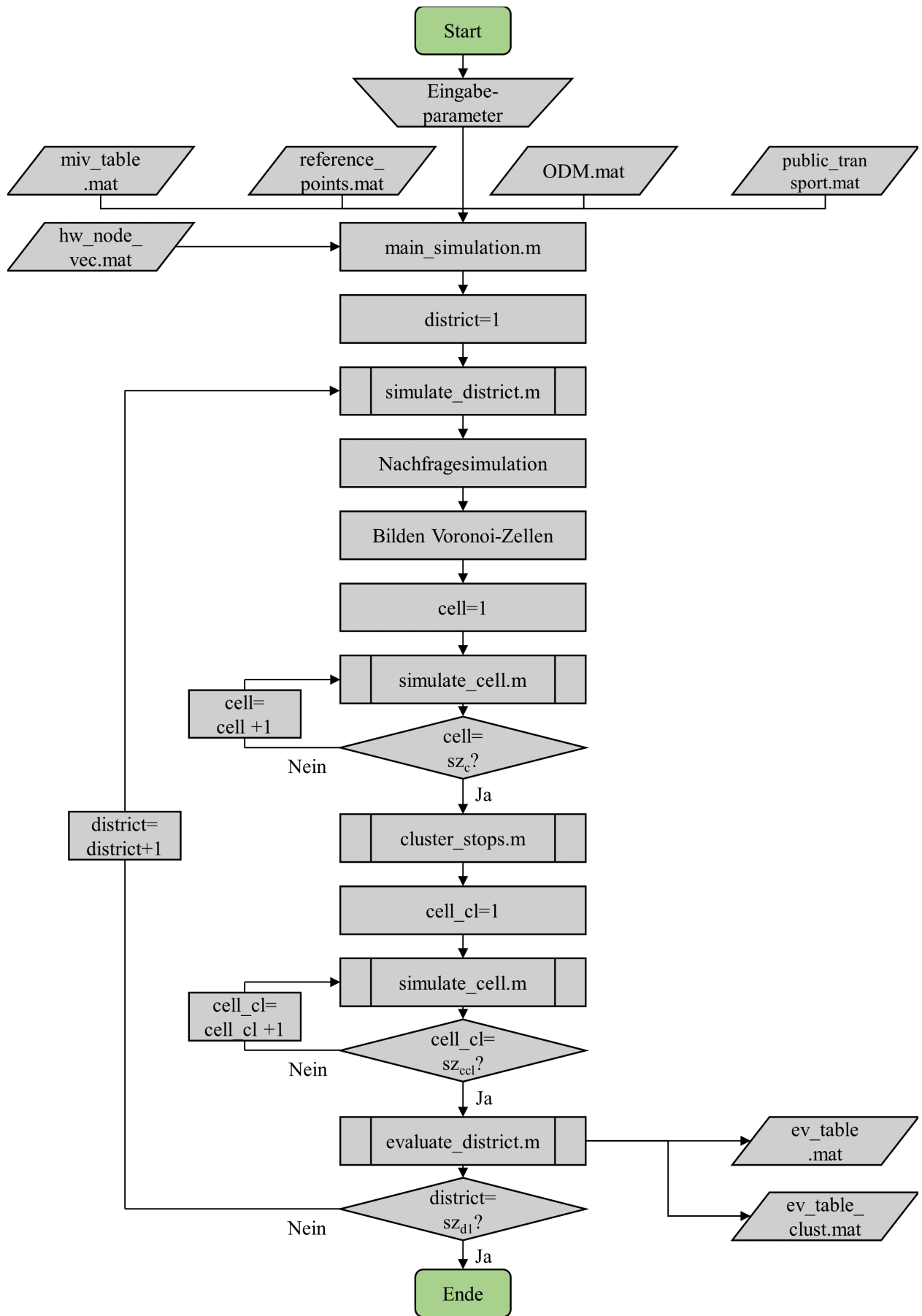
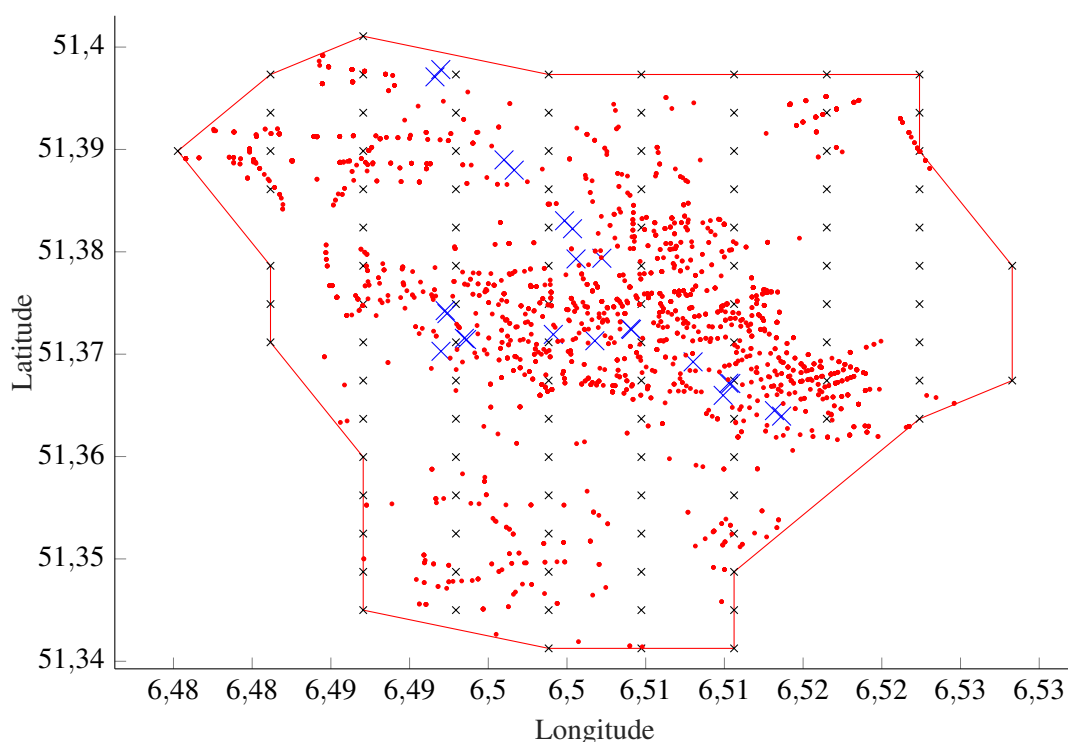


Abbildung 2: Übersicht Schema Simulation

rechteckigen 400-Meter x 400-Meter-Gitter über Krefeld verteilt. Der Referenzbereich ist dementsprechend ein Rechteck, welches vom Referenzpunkt sich über die Hälfte der Schrittweite in Richtung der anderen Punkte aufspannt. Innerhalb dieses Bereichs wird die Nachfrage zufällig geografisch verteilt. Da die logische Anbindung an das Straßenverkehrsnetz fehlt, werden ebenfalls per Luftlinienmatrix stellvertretende Knoten im MIV-Graph bestimmt. Die verwendete Mobilitätsbefragung [29] hat eine zeitliche Auflösung von 15-Minuten-Intervallen. Für die Zielnachfrage, welche im Referenzbereich eintrifft, wird dieser Takt beibehalten, da er einem Fahrplan mit entsprechender Taktung recht nahekommt. Die Startnachfrage hingegen wird innerhalb des Intervalls an zufälligen Zeitpunkten angesetzt, um ein realistischeres Nachfrageverhalten abzubilden.

Bisher unberücksichtigt ist die Laufbereitschaft der Reisenden. Wenn die Entfernung zu der nächstgelegenen Haltestelle in fußläufiger Reichweite liegt, wird kein On-Demand-Verkehr nachgefragt. Die individuelle Laufbereitschaft ähnelt einer Normalverteilung mit einem Erwartungswert  $\mu$  mit 5,22 Minuten und einer Standardabweichung  $\sigma$  mit 2,96 Minuten angenähert werden [33, S. 45]. Bei einer mittleren Geschwindigkeit von 5 Kilometer pro Stunde ergeben sich  $\mu$  mit 435 Meter und  $\sigma$  mit 246 Meter. Mithilfe der kumulierten Normalverteilung lässt sich so die Wahrscheinlichkeit bei jeder Entfernung abschätzen, dass eine reisende Person On-Demand-Verkehr nachfragt (vgl. Anhang A). Auf Basis dieser Relation werden fußläufige Distanzen als On-Demand-Nachfragende entfernt. Eine beispielhafte Verteilung der bereinigten Nachfrage für den Stadtteil Hüls ist in Abbildung 3 zu sehen.

Anschließend wird in der Simulation der aktuelle Stadtteil in Voronoizellen anhand der Haltestellen aufgeteilt. Um ein On-Demand-Konzept im Sinne eines First- oder Last-Mile-Problems um einzelne Haltestellen aufbauen zu können, müssen zunächst Zonen um diese Stationen gebildet werden, innerhalb derer sich der Bus bewegen soll. Dafür scheinen Voronoizellen geeignet. In Anhang B ist das grafische Ergebnis einer Zellbildung unter Berücksichtigung der Grenzen des Stadtteils beispielhaft für Hüls dargestellt. Die blauen Kreuze zeigen die Positionen der Haltestellen an. Die blauen Linien zeigen die Kanten der Voronoizellen,



**Abbildung 3:** Darstellung stochastischer Nachfragestandorte in Krefeld Hüls, bereinigt

die Schnittpunkte dieser sind in Lila eingekreist. Der Entscheidung, Voronoizellen zu bilden, liegen verschiedene Annahmen zugrunde. Es wird angenommen, dass die Nutzung des öffentlichen Nahverkehrs an der nächstgelegenen Haltestelle beginnt oder endet. Zwar kann es vorkommen, dass davon abgewichen wird und eine Person zu anderen Haltestellen läuft, dies scheint aber eher die Ausnahme zu sein. Außerdem scheinen Voronoizellen hinreichende Unterteilungen zu sein, um Nachfragestandorte zu nächstgelegenen Haltestellen zuzuordnen. Die Diskrepanzen zwischen realen und Luftlinienabständen zur Bildung der Voronoizellen können vernachlässigt werden. Dabei sind die Abstände zwischen Haltestellen, welche Teil der gleichen Linie sind, aber in entgegengesetzte Fahrtrichtungen verlaufen, vernachlässigbar. Bei einem Blick in Anhang B sieht man, dass die Haltestellen meist in Paaren auftreten, welche als zwei Haltestellen derselben Station einer Linie für Hin- und Rückweg identifiziert werden können. Da diese Haltestellen aber zwei Standorte repräsentieren, bilden sich im Modell auch zwei Voronoizellen. Es kann sich also ergeben, dass eine Person der Zelle der Fahrtrichtung zugeordnet ist, die sie nicht nutzen möchte. Wegen der minimalen Distanz zwischen den beiden Haltestellen wird trotzdem angenommen, dass diese Person das On-Demand-Angebot zu der angebotenen Haltestelle nutzt und anschließend die Straßenseite wechselt, um zu der gewünschten Fahrtrichtung zu gelangen. Auch wird angenommen, dass ein Nachfrager bereit ist, sich zu einer weiter entfernten Haltestelle durch On-Demand-Busse transportieren zu lassen, würde diese jedoch nicht zu Fuß ansteuern.

Es folgt eine mikroskopische Verkehrssimulation der jeweiligen ungeclusterten oder geclusterten Voronoizelle. Dazu wird der zeitlich sortierte Nachfragevektor iterativ abgearbeitet. In jeder Iteration wird eine Anzahl der nächsten Nachfragen, maximal in Höhe der Fahrgastkapazität des Kleinbusses, betrachtet. Der Zeitpunkt, zu dem jeder Bus frühestmöglich verfügbar ist, wird in einem Vektor dokumentiert, die Fahrzeit der letzten Tour wird hinzuaddiert. Jegliche Nachfrage soll bedient werden. Wenn der Zeitpunkt der nächsten Nachfrage also vor der Verfügbarkeit der Busse liegt, wird ein weiterer Bus initialisiert. Sind ausreichend Busse vorhanden, werden Ersterer bevorzugt, um diese voll auszulasten und zu Spitzenlasten kurzzeitig Weitere einzusetzen. Der Startzeitpunkt einer Tour ergibt sich durch den Zeitpunkt der ersten Nachfrage. Hat diese die Haltestelle nicht als Startpunkt, abzüglich der Fahrzeit dorthin. Dies bedeutet aber nicht, dass diese Nachfrage auch zuerst angefahren wird, kommt jedoch der Realität zur Bestimmung eines Startzeitpunktes am nächsten. Die Anfrage für die Beförderung wird nicht zum Zeitpunkt des Beförderungswunsches am Bus eintreffen, sondern mit Vorlaufzeit, welche hier mit 15 Minuten angenommen wird. Die erste Nachfrage gibt also den spätestmöglichen Startzeitpunkt des Busses unter Unwissenheit weiterer Nachfragen an. Unter dieser Annahme können nun alle Nachfragen mit der Haltestelle als Ziel einbezogen werden, welche spätestens 15 Minuten nach Startzeitpunkt einen Beförderungswunsch haben. An der Haltestelle startende Nachfrage werden ungeachtet dieser 15-Minuten-Restriktion nur berücksichtigt, wenn zum Startzeitpunkt an der Haltestelle sind. Alle Personen, die aufgrund der Restriktionen nicht in einer Tour befördert werden, werden in die nächste Iteration übertragen. Für alle beförderten Personen wird das Travelling Salesman Problem mit der Haltestelle als Ausgangspunkt gelöst. Für die Kosten der Tour wird die Fahrdauer in Minuten veranschlagt, bei 25 Kilometern pro Stunde und 45 Sekunden Ein- und Ausstiegszeit je Fahrgast.

Die Ergebnisse der Simulation werden in ein ganzzahliges lineares Optimierungsmodell übertragen. Im Sinne eines volkswirtschaftlichen Optimums werden dafür Angebots- und Nachfrageseite in einer Pareto-Optimierung berücksichtigt. Ziel der Optimierung ist die kostengünstigste Kombination von Voronoizellen und Voronoizellenclustern zu identifizieren.

Die Zielformulierung der Optimierung ist in Gleichung 3 zu sehen. Es gilt  $c^T x$  zu minimieren, wobei  $x$  binär ist und angibt, ob eine Zelle (ungeclustert oder geclustert) Teil der optimalen Zonenbildung ist. Jede

**Tabelle 1:** Übersicht der im Optimierungsmodell verwendeten Variablen

Variable	Einheit	Beschreibung
$b_f$	Euro/Tag	Fixkosten eines Busses
$b_d$	Euro/Kilometer	Distanzabhängige Kosten
$b_t$	Euro/Stunde	Zeitabhängige Kosten
$c$	-	Kombinierter Kostenvektor
$c_d$	-	Nachfrageseitiger Kostenvektor
$c_s$	-	Angebotsseitiger Kostenvektor
$d$	Kilometer/Tag	Gesamte zurückgelegte Distanz eines Busses
$i_g, i_c$	-	Index einer Zelle (ungeclustert und geclustert)
$j$	-	Index eines Busses
$m$	-	Summe aller Voronoi-Zellen
$n$	-	Summe aller Cluster-Zellen
$o$	-	Summe der eingesetzten Busse in einer Zelle
$p$	-	Zahl der Nachfrager
$q$	-	Vektor der in einer Clusterzelle enthaltenen Voronoizellen
$v$	Euro/Stunde	Monetäre Bewertung der Fahrtzeit für einen Passagier
$t_r$	Stunden	Durchschnittliche Fahrtzeit des Nachfragers eines Busses
$t_w$	Stunden	Durchschnittliche Wartezeit des Nachfragers eines Busses
$u_d$	-	Auf den Tag bezogene Auslastung
$\alpha$	-	Gewichtungsfaktor Angebot zu Nachfrage

ungeclusterte Zelle darf dabei nur genau ein Mal Teil der Lösungsmenge sein.

$$\min\{c^T x \mid Ax = b \mid 0 \leq x \leq 1\}, \quad c \in (0 \leq \mathbb{R})^{m+n}, \quad x \in \{0, 1\}^{m+n} \quad (3)$$

Es wird ein Kostenvektor  $c$  [€] erstellt, in welchen die anfallenden Kosten für den Busbetreiber  $c_s$  sowie die Nachfrager  $c_d$  gewichtet durch  $\alpha$  einfließen.

$$c = \alpha \cdot c_s + (1 - \alpha) \cdot c_d \quad \text{mit} \quad c_s \in (0 \leq \mathbb{R})^{m+n} \quad c_d \in (0 \leq \mathbb{R})^{m+n} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (4)$$

Die für den Betreiber der On-Demand-Busse anfallenden Kosten können in drei Kategorien unterteilt werden: Fixkosten je Bus  $b_f$ , distanzabhängige Kosten  $b_d$  und zeitabhängige Kosten  $b_t$ . Es ergeben sich für jede Zelle die Gesamtkosten durch diese Kostenanteile verrechnet mit der Zahl der Busse, der gefahrenen Distanz oder der Einsatzzeit. Für die Einsatzzeit wird angenommen, dass sie für einen einzelnen Bus nicht unter einer Stunde liegt. Dies hat den Hintergrund, dass einige Busse nur sehr kurzzeitig zu Spitzenlastzeit eingesetzt werden. Eine Einsatzzeit für nur wenige Minuten erscheint jedoch logistisch nicht möglich, weshalb eine Mindesteinsatzzeit vorausgesetzt wird. Um die Kostenanteile für den Betreiber abschätzen zu können, ist eine Kalkulation erforderlich. Das erstellte Kostenmodell orientiert sich an dem Kalkulationsbeispiel *Kostensteigerung im gewerblichen Personenverkehr mit Autobussen* der Berufsgruppe Bus Österreich [34]. In Anhang C ist eine Fixkostenrechnung über das erste Jahr am Beispiel eines Mercedes Vito Tourer Base zu sehen.

$$c_s = \{c_{s_1}, c_{s_2}, \dots, c_{s_{m+n}}\} \quad \text{mit} \quad c_{s_i} = \sum_{j=1}^o b_f + \sum_{j=1}^o b_d \cdot d_j + \sum_{j=1}^o b_t \cdot \max(1, u_{d_j} \cdot 24) \quad (5)$$

Die Kosten seitens der Nachfrage sind die benötigte Fahrt- und Wartezeit aller Passagiere multipliziert mit einem monetären Bewertungsfaktor  $v$ , sodass beide Kostenvektoren die Einheit Euro erhalten und für die Pareto-Optimierung in  $c$  gewichtet summiert werden können.

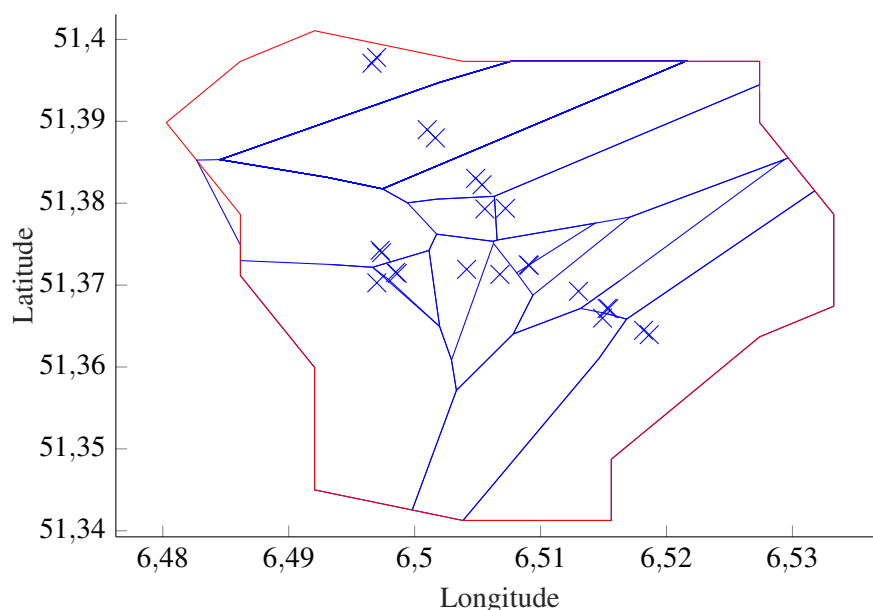
$$c_d = \{c_{s_1}, c_{s_2}, \dots, c_{s_{m+n}}\} \quad \text{mit} \quad c_{d_i} = \sum_{j=1}^o p_j \cdot (t_{r_j} + t_{w_j}) \cdot v \quad (6)$$

Die Gleichheitsbeschränkung  $A$  besteht aus den zwei Teilen (vgl. Gleichungen in 7). Teil  $A_I$  bezieht sich auf den Teil der ungeclusterten Zellen. Jede dieser Zellen enthält nur sich selbst, weshalb  $A_I$  einer Einheitsmatrix  $I$  entspricht. Für die geclusterten Zellen wird in Matrix  $A_{II}$  spaltenweise eingetragen, welche Voronoizellen diesem Cluster zugehörig sind. Zusammengesetzt ergibt sich Matrix  $A$  worin zeilenweise die Zugehörigkeit jeder Voronoizelle  $i_g$  zu allen Zellen  $i$ , ungeclustert und geclustert, abgelesen werden kann. Diese Zeilen sind in der linearen Optimierung mit dem entsprechenden Wert in  $b_i \in 1$  gleichzusetzen, da jede Voronoizelle exakt ein Mal als Teil der Lösung vorkommen soll.

$$\begin{aligned} A &= (A_I A_{II}) \quad \text{mit} \quad A \in \{0, 1\}^{m \times (m+n)} \quad \text{und} \quad b \in 1^m & (7) \\ A_I &= I^{m \times m} \quad \text{mit} \quad I \in \{0, 1\}^{m \times m} \\ A_{II} &= (q_1, \dots, q_n) \quad \text{mit} \quad A_{II} \in \{0, 1\}^{m \times n} \quad \text{und} \quad q \in \{0, 1\}^m \end{aligned}$$

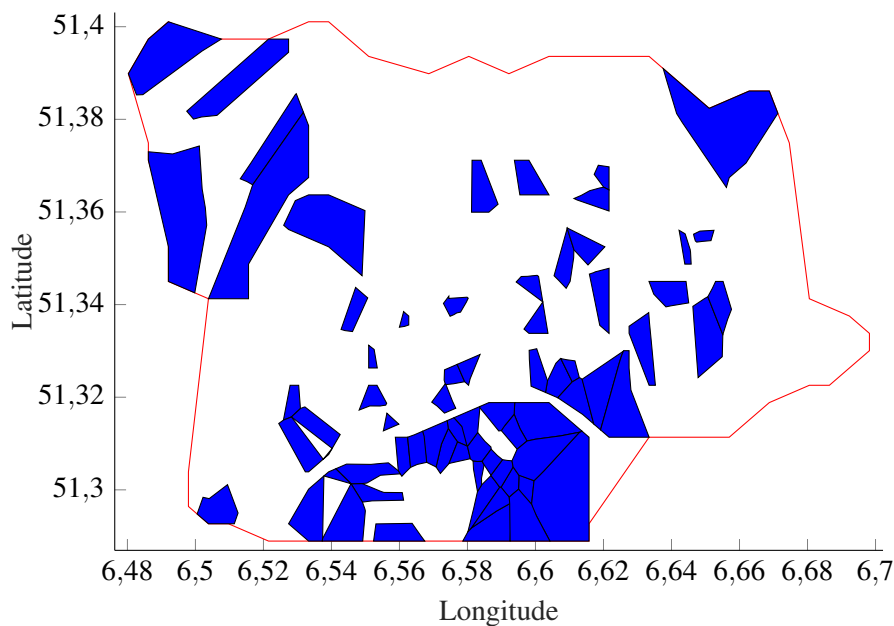
Abbildung 4 zeigt eine kostenoptimale Zuteilung der Zonen bei  $\alpha$  gleich 0,5 und  $v$  gleich 7,10 Euro pro Stunde beispielhaft für den Stadtteil Hül. Dabei fällt auf, dass sich paarweise Cluster von Haltestellen mit geringem Abstand zueinander gebildet haben. Auch sieht man, dass sich nicht alle Haltestellen-Paare zu einem Cluster verbunden haben, was auf einen hohen Passagierdurchsatz an diesen Haltestellen hindeutet.

Um entscheiden zu können, ob in einer Zone ein On-Demand-Angebot potenziell sinnvoll ist, wird die durchschnittliche Zeitersparnis, welche sich aus der Zeit des Fußweges abzüglich Fahrt- und Wartezeit bei



**Abbildung 4:** Geclusterte Voronoizellen für den Stadtteil Hül



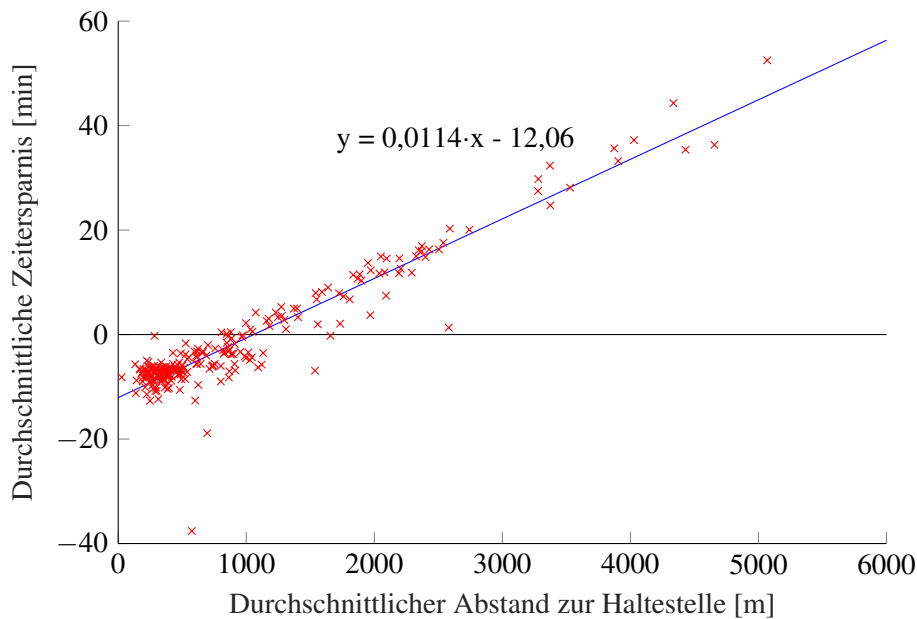


**Abbildung 5:** Zonen mit potenzieller Zeitersparnis durch On-Demand-Angebote

On-Demand-Nutzung ergibt, für alle Bereiche errechnet. Dabei zeigt sich, dass die mittlere Ersparnis im Bereich von -37 bis +55 Minuten liegen kann. Negative Durchschnittswerte werden in der Realität nicht vorkommen, da sich die Nachfrage auf andere Verkehrsmittel verlagert. Da eine statische Nachfrage abhängig von der Normalverteilung der Laufbereitschaft angenommen wurde, unabhängig der resultierenden Zeitersparnis, sind negative Ergebnisse möglich und zu erwarten. Alle Gebiete mit erwartet positiven Zeitersparnissen sind in Abbildung 5 dargestellt. Dabei zeigt sich kein eindeutiges Bild, man kann jedoch eine leichte Tendenz zu den äußeren Bereichen erkennen.

Interpretiert man die Zeitersparnis als Abhängige von der Größe der Zelle bzw. der durchschnittlichen Distanz der Nachfrager zur Haltestelle, zeigt sich ein eindeutigeres Bild. In Abbildung 6 sind beide gegeneinander aufgetragen. Ein klarer Zusammenhang ist zu erkennen, angezeigt durch die Regressionsgerade  $y = 0,0114 \cdot x - 12,06$  mit einem Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,89$ . Daraus kann abgeschätzt werden, dass ein nutzenbringender Betrieb von On-Demand-Angeboten ab einer durchschnittlichen Distanz zur Haltestelle von ca. 1058 Metern möglich ist. Je größer dabei die Strecken werden, desto größer ist auch die mittlere Zeitersparnis.

Für eine Kostenabschätzung wird sich auf die Menge der Zellen beschränkt, welche einen tatsächlichen Nutzen für die beförderten Passagiere erwarten lassen. Die Kosten je Kilometer sind im Mittel bei 7,00 Euro mit einer Standardabweichung von 2,24 Euro je Kilometer. Bis auf drei Ausreißer liegen alle Kosten im Bereich von 4,08 bis 9,26 Euro je Kilometer (vgl. Anhang D). Ein Zusammenhang zwischen Passagierzahl und Kosten ist dabei nicht erkennbar. Die Gesamtkosten für den ÖPNV-Betreiber können auf 36.203 Euro je Betriebstag geschätzt werden für den Betrieb von 612 Bussen. Im Schnitt entfallen 57,4 Prozent der Kilometerkosten auf die Angebotsseite. Es ergeben sich also mittlere 4,02 Euro je Kilometer Kosten für den Busbetrieb für den ÖPNV-Betreiber in einer Spanne von 2,34 bis 5,32 Euro je Kilometer. Die eingesetzten Busse haben eine durchschnittliche Auslastung von 39,2 Prozent über die Betriebszeit. Auf die Aussagekraft dieser Daten wird in dem Kapitel Diskussion und Fazit näher eingegangen.



**Abbildung 6:** Zusammenhang von Zellgröße und und Zeitersparnis

## 5. Diskussion und Fazit

Flächendeckende On-Demand-Konzepte sind von gängiger Praxis noch weit entfernt, die dargelegten Ergebnisse geben einen ersten Beitrag zu einem tiefer gehenden Verständnis der Abhängigkeiten für einen effizienten Betrieb. An diese Arbeit ist mit der Erwartungshaltung herangegangen worden, dass ein ergänzenden On-Demand-Angebot zum Linienverkehr grundsätzlich möglich ist, allerdings nur in Gebieten schlechterer ÖPNV-Anbindung sinnvoll erscheint. Dieser Zusammenhang scheint sich nach gezeigten Analysen zu bestätigen, da erst ab etwa einem Kilometer durchschnittlicher Laufdistanz zu der nächsten Haltestelle ein On-Demand-Verkehr ersten Nutzen für die Passagiere aufzeigt. Außerdem wurde erwartet, dass Angebots- und Nachfrageseite eher gegenläufige Zonenbildung anstreben. So scheint es zunächst logisch, dass für die Nachfrage eine möglichst kleine Zone das Ziel ist, in der ein Transport zu der Zielhaltestelle schnell erfolgen kann. Das Angebot hingegen wäre an möglichst großen Zellen interessiert, um hohe Auslastungen und damit geringere Kilometerkosten zu erzielen. Eine minimale Sensitivität  $\alpha$  (Gewichtung von Angebot und Nachfrage in der Kostenfunktion der linearen Optimierung der Zellencluster) zeigt jedoch, dass beide das gleiche Optimum anstreben, in dem nahe gelegene Haltestellenpaare miteinander zu Clusterzellen kombiniert werden. Bevor weitere Kenngrößen bewertet werden, sollen jedoch die Methodik und die eingesetzten Daten und deren Verarbeitung diskutiert werden.

Erster Diskussionspunkt ist die Qualität der Daten, die als Basis für die Modellierung der Verkehrsnachfrage verwendet wurden. Wie bereits in Kapitel Methodik geschildert, ist insbesondere ihre Reliabilität fraglich. Mit unsicherer Aussagekraft des Inputs sind auch alle von diesem Input abhängigen Ergebnisse nur unter Vorbehalt zu interpretieren. Nicht alle Ergebnisse werden als abhängig von der Reliabilität der Nachfrage angesehen. Die Auswertung hat gezeigt, dass nicht alle Gebiete in Krefeld für einen Betrieb von On-Demand-Bussen, zumindest in der hier dargelegten Systematik, geeignet sind. Die Zeitersparnis ist stark abhängig von der durchschnittlichen Distanz zur Haltestelle bzw. der Relation von Größe der Zone und ÖPNV-Anbindung. Auch Zonen mit negativer Zeitersparnis haben ausreichend Nachfrage. Ausreichende Nachfrage wird hier unterstellt, sobald mehr als ein Bus in der Zone initialisiert wird, die Nachfrage also die Kapazität eines einzelnen Busses übersteigt. Da dies auf annähernd alle Zonen zutrifft und Zonen mit

positiver Zeitersparnis keinen Zusammenhang zwischen Höhe der Nachfrage und Kilometerkosten haben, scheint die Nachfrage erst mal kein maßgeblicher Faktor für Nutzen und Wirtschaftlichkeit des Konzepts zu sein. Doch es kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich bei neuer Datenerhebung zur Verkehrsnachfrage eine andere Quelle-Ziel-Zeit-Matrix für den ÖPNV ergibt. Es wird angenommen, dass die Nachfrage in der Realität durchaus von denen der Umfrage abweicht, aber nicht vollständig falsch ist. Dementsprechend kann für die Identifikation geeigneter Zonen für On-Demand-Verkehr auch davon ausgegangen werden, dass Zonen, die im Modell eindeutig über den berechneten 1058 Metern Durchschnittsdistanz zur Haltestelle liegen, auch in der Realität dafür geeignet sind. Doch alle Gebiete nah an dieser Kenngröße sollten individuell begutachtet werden.

Außerdem bewegt sich die Nachfrage direkt auf sehr hohem Niveau. Im Modell wurde dafür angenommen, dass jede Nachfrage mit einem Standort weiter entfernt als die eigene Laufbereitschaft auf einen On-Demand-Bus zurückgreift. Die Höhe der Nachfrage wurde bewusst nicht reduziert, um eine Aussage über das Potenzial von On-Demand-Verkehren im ÖPNV treffen zu können, doch insbesondere bezüglich Abschätzungen für mögliche Pilotprojekte und die Nachfrage zu Beginn sollte die Höhe deutlich reduziert werden.

Bei der Umwandlung der Quelle-Ziel-Zeit-Matrix in tatsächliche Nachfrage wird der stochastische Erwartungswert zu einer Integerzahl gerundet. Dies ist notwendig, weil Nachfrage in der Realität nur ganzzahlig auftreten und es keine geteilten Passagiere geben kann. Doch daraus resultiert auch, dass jegliche Nachfrage kleiner als 0,5 entfällt. Eine Alternative wäre gewesen, diese geringen Werte solange kumulieren zu lassen, bis eine stochastische Nachfrage über eins entsteht und diese dann zuzuordnen. Davon wurde jedoch wegen der Bedingung, jegliche Nachfrage zu bedienen, abgesehen. Durch das Entfallen dieser kleinen Wahrscheinlichkeiten wird erst eine Tour initialisiert, wenn eine Nachfrage tatsächlich wahrscheinlich (also größer 0,5) ist. Vereinzelte Nachfragen zu Randzeiten oder in Gebieten sehr geringer bzw. unwahrscheinlicher Nachfrage entfallen beabsichtigt. Es wird erwartet, dass sich sonst die Auslastung der Busse und damit die Wirtschaftlichkeit enorm verschlechtern würde. Deshalb sollen diese Nachfragen bewusst nicht bedient werden, auch wenn dies von dem eigentlichen Ziel, alle Nachfrager zu befördern abweicht. Da sich die Nachfrage aber ohnehin in einem real unwahrscheinlichen, hohen Niveau bewegt, erscheint der Einfluss der entfallenden Nachfragen vernachlässigbar.

Außerdem hat eine Begutachtung der Kartengraphen und dessen Routing im Vergleich zu gängigen Routingprogrammen gezeigt, dass es vereinzelt Unterschiede geben kann. Diese Differenzen sind auf Fehler in den Kartendaten zurückzuführen, d.h. unvollständige Straßendaten. Es ist anzunehmen, dass diese durch das offene Prinzip ohne Qualitätskontrolle von OpenStreetMap zurückzuführen sind. In allen Zonen mit Lücken im Straßennetz ist also auch zu erwarten, dass die Touren der Busse länger werden, als es in der Realität der Fall wäre.

Zur Anbindung der Nachfragen bzw. deren zufällig generierten Standorte an das Straßennetz ist eine Variante gewählt worden, bei der diese nicht beliebig auf der Karte starten, sondern auf den nächstgelegenen Knotenpunkt des Netzes versetzt werden. Bei einem durchschnittlichen Abstand zwischen den Knoten von ca. 31 Metern ist durch den Graphen selbst keine große Verfälschung des Ergebnisses zu erwarten. Die Möglichkeit, dass durch Distanzen zwischen Zufallsstandort der Nachfrage und nächstgelegenen Knotenpunkt nennenswerte Fußwege *unterschlagen* werden, ist geprüft worden. Dabei hat sich eine durchschnittliche Entfernung von 42 Metern gezeigt, weshalb hierdurch keine Verzerrung des Ergebnisses durch praktisch

höhere Fußwege erwartet wird. Ausreißerbedingt durch entstehende Nachfrage z.B. in Parks oder anderen Orten ohne nahe gelegene Straßen können trotzdem nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Mit mehreren Stunden Laufzeit je Stadtteil auf einem gängigen Heimcomputer ist die Laufzeit des Algorithmus relativ hoch. Dies ist im Wesentlichen auf den rechenintensiven Algorithmus der Matlab-Funktion *graphshortestpath.m* zurückzuführen, bei dem im Straßengraphen mit ca. 122.600 Kanten Routen identifiziert werden. Anschließend wird mittels Windows-Systembefehl auf den Concorde-Solver zugegriffen. Aufgrund konkurrierender Zugriffe ist eine Beschleunigung des Codes durch Parallelisierung nicht möglich gewesen. Durch andere Ansätze ist hier jedoch Beschleunigungspotenzial. Generell erfolgt die Simulation für eine Stadt der Größe von Krefeld aber in reeller Rechenzeit. Bedenkt man den Planungshorizont eines potenziellen Projektes zum Einsatz von On-Demand-Bussen scheint eine längere Simulationszeit trotzdem vertretbar und eine Laufzeitorientierung nicht zwingend erforderlich.

Bisher unberücksichtigt sind die Fahrpläne der ÖPNV-Linien. Hier ist pauschal ein 15-Minuten-Takt für alle Linien angenommen worden, da diese Taktung der Auflösung der Umfrage der Verkehrsnachfrage entspricht. Die tatsächliche Taktung ist häufig eher im 20- oder 30-Minuten-Rhythmus. Es ist ein Einfluss der Taktung auf die Simulation zu erwarten. Nachfrage, die an der Haltestelle startet, würde also seltener und in größerer Bündelung eintreffen. Bei Nachfragen, die die Haltestelle als Ziel haben, ist dadurch auch eine leichte Bündelung der Nachfrage zu erwarten, um Wartezeiten als der Haltestelle zu reduzieren, welche im bisherigen Modell noch nicht einbezogen werden konnten.

Berücksichtigt man die genannten Einflussfaktoren auf die Ergebnisse, sollte diese Arbeit vor allem als erster Beitrag zur Identifikation geeigneter Flächen und von On-Demand-Konzepten und deren qualitatives Potenzial verstanden werden. Sind die Gebiete zu klein, so sinkt die Wahrscheinlichkeit für den Nachfrager einen Mehrwert zu schaffen. Auch wenn die individuelle Laufbereitschaft der Personen stochastisch eingeflossen ist, entsteht in diesen Bereichen viel Nachfrage mit kurzen Transportstrecken. Diese kurzen Wege je Passagier bilden einen unvermeidbaren Gegensatz zu der Bündelung von Nachfrage und daraus entstehenden längeren Touren. Im Modell zeigt sich dies durch eine negative Zeitersparnis. In der Realität ist zu erwarten, dass dieses Angebot dort nicht wahrgenommen wird. Auch wenn das Konzept wegen genannter Aspekte noch nicht ausgereift genug für eine Praxisanwendung ist, lassen sich daraus jedoch erste Einschätzungen über das Potenzial einzelner Gebiete treffen.

Die ermittelten Kosten für den Busbetreiber sind mit 4,02 Euro je Kilometer im Rahmen realistischer Betriebskosten, jedoch liegen sie über denen standardisierter Bewertungsansätze. Dies scheint auf die geringe Auslastung der Busse von 39,2 Prozent der Betriebszeit zurückzuführen zu sein. Diese wiederum ist bedingt durch die definierte Anforderung, jede Nachfrage zu transportieren und ausreichend Busse für einen Transport ohne in Rückstau der abzuarbeitenden Nachfragen zu geraten. Für eine Potenzialbewertung scheint dieser Ansatz geeignet, um eine präzise Aussage über die tatsächlichen Betriebskosten zu treffen, scheint diese Kennzahl daher ungeeignet. Sie sollte daher eher als qualitative Einschätzung verstanden werden, die zeigt, dass selbst bei maximaler Abdeckung der Nachfrage grundsätzlich ein bezahlbarer Betrieb von On-Demand-Bussen möglich ist.

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung einer Methodik und Optimierungsalgorithmik für den möglichst optimalen Einsatz von On-Demand-Verkehr in der Absicht, daraus Kennzahlen und Erkenntnisse abzuleiten, die einen Beitrag in Richtung flächendeckendem Einsatz dieser leisten. Dafür ist ein Konzept entwickelt worden, bei dem der betrachtete Bereich in Voronoizellen unterteilt wird, dessen zentrale Knotenpunkte ÖPNV-Haltestellen sind. Die Zellen wurden mittels hierarchischen Verfahrens geclustert, ohne

sich dabei für ein Cluster zu entscheiden, sondern jede Hierarchieebene als potenzielle neue Zelle zu betrachten. Anschließend wurde in jeder ungeclusterten und geclusterten Voronoizelle On-Demand-Verkehr simuliert. Die Nachfrage wurde dafür an zufälligen Standorten in Referenzzonen generiert. Lag die nächste Haltestelle dabei innerhalb der Laufbereitschaft, wurde die Nachfrage entfernt. Angebotsseitig war eine Anforderung, jede Nachfrage zu bedienen. Es wurde eine Kostenkalkulation entwickelt, welche die Gesamtkosten für Busbetreiber und standardisierte Zeitkosten der Passagiere abdeckt. Diese Kalkulation wurde auf alle Zellen angewendet und in ganzzahliges lineares Optimierungsmodell überführt, dessen Ergebnis die optimale Kombination von Zellen und deren Clustern ist. Als Zielfunktion des Modells wurde eine gewichtete Kostenfunktion von Angebot und Nachfrage erstellt.

Die Auswertung der Ergebnisse hat gezeigt, dass die optimale Zellkombination eine Tendenz dazu aufzeigt, sehr nah gelegene Haltestellenpaare zu kombinieren, jedoch keine großen Cluster bildet. Die Gewichtung von Angebot und Nachfrage in der Kostenfunktion hatte dabei wenig bis keinen Einfluss auf das Ergebnis, beide streben also dasselbe Optimum an. Aber nicht alle Zellen können auch einen Nutzen in Form von Zeitersparnis für generieren. So wurde eine Abhängigkeit von der mittleren Distanz der Nachfragestandorte zur Haltestelle aufgezeigt. Erst ab einem durchschnittlichen Abstand von 1058 Metern innerhalb einer Zelle ist Zeitersparnis für Passagiere zu erwarten. Es ergeben sich mittlere Kosten von 4,02 Euro je Kilometer für den Busbetreiber. Sie liegen höher als die Kosten gängiger Buskonzepte im Gelegenheitsverkehr, was auf die geringe zeitliche Auslastung von 39,2 Prozent zurückgeführt wurde. Aufgrund mangelnder Reliabilität der Inputdaten sowie einer Methodik, die für den Zweck der Potenzialbewertung entwickelt worden ist, sind die Kosten nicht ohne weiteres auf die Realität übertragbar. Sie sind als qualitativer Vergleich innerhalb des Modells zu verstehen oder können als erster Anhaltspunkt dienen, dass ein Betrieb von On-Demand-Konzepten grundsätzlich finanziell tragbar ist.

In möglichen Folgeprojekten sollte insbesondere die Anforderung jegliche Nachfrage zu bedienen modifiziert werden. Das Resultat dieser Annahme war, dass Zonen entstehen, in denen kein nutzenbringendes Angebot zustande kommen kann, obwohl der Nutzen für einzelne Passagiere mit großen Fußwegen durchaus gegeben ist. Dies könnte in Form einer Wechselwirkung zwischen Angebot und Nachfrage erfolgen, bei denen iterativ Nachfragen ausgeschlossen werden, die negativere Zeiteinsparungen haben, bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Auch wären Zonen um Haltestellen denkbar, in denen kein Halt der On-Demand-Busse (außer bspw. für immobile Personen) vorgesehen ist.

Generell erscheint es sinnvoll, das Modell in Zukunft um Wechselwirkungen zwischen Angebot und Nachfrage zu erweitern. So können Verschiebungen im Modal Split mit einbezogen werden, welche durch den geringeren Reisewiderstand im ÖPNV durch On-Demand-Angebote resultieren können. Bevor dadurch jedoch belastbare Ergebnisse über das Verkehrsverhalten gewonnen werden können, ist es jedoch erforderlich, neue belastbare Verkehrsdaten zu evaluieren. Eine solche Erhebung kann direkt spezifischere Daten zu On-Demand-Mobilität und der Nachfrage danach gewinnen. Da diese Arbeit zur Zeit der COVID-19-Pandemie geschrieben wurde, welche sich auch signifikant auf das Mobilitätsverhalten ausgewirkt hat, sollte mit der Erhebung gewartet werden, bis sich die Mobilität auf ein konstantes Niveau eingependelt hat. Für die Weiterentwicklung des Modells sollte ein Integrieren und Kombinieren der Linienfahrpläne geprüft werden, da dadurch Einflüsse auf den Betrieb des On-Demand-Verkehrs erwartet werden.

Die dargelegten Ergebnisse sind außerdem eine geeignete Basis, um daraus Strecken oder Bereiche für Pilotprojekte abzuleiten. Zonen mit einem guten Verhältnis von hoher Zeitersparnis und geringeren Kilometerkosten scheinen geeignet. Hieraus würden sich wiederum Daten abgleichen lassen, die dazu dienen, das

Modell zu präzisieren, wodurch sich wiederum präziser weitere nutzenbringende Zonen für On-Demand-Verkehre ableiten lassen.

## Literatur

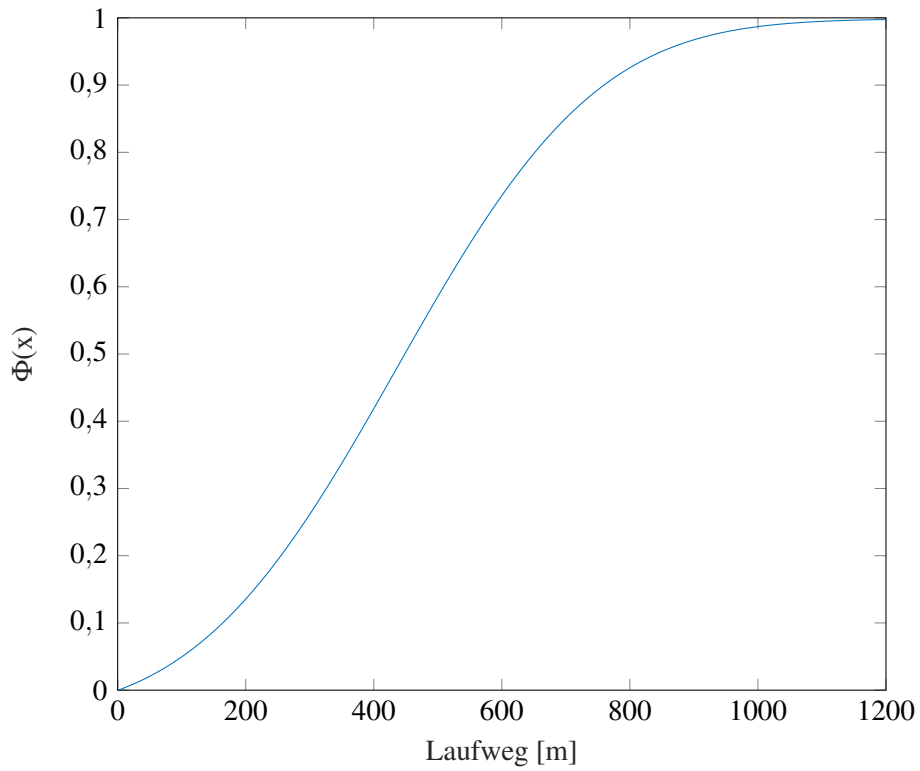
- [1] Nobis, Claudia und Kuhnimhof und Tobias, „Mobilität in Deutschland – MiD. Ergebnisbericht. BM-VI, infas, DLR, IVT, infas 360. Bonn, Berlin,“
- [2] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, „Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS): Energie auf neuen Wegen,“ 2013.
- [3] Umweltbundesamt, *Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Personenverkehr - Bezugsjahr 2019*, 2020. Adresse: <https://www.umweltbundesamt.de/bild/vergleich-der-durchschnittlichen-emissionen-0> (besucht am 31.05.2021).
- [4] Umweltbundesamt, „Verkehrswende für ALLE: So erreichen wir eine sozial gerechtere und umweltverträglichere Mobilität,“ 2020.
- [5] B. Amberg, B. Amberg und N. Kliwer, „Robust Efficiency in Urban Public Transportation: Minimizing Delay Propagation in Cost-Efficient Bus and Driver Schedules,“ *Transportation Science*, Jg. 53, Nr. 1, S. 89–112, 2019, ISSN: 0041-1655. DOI: 10.1287/trsc.2017.0757.
- [6] A. Bärmann, A. Martin und O. Schneider, „Efficient Formulations and Decomposition Approaches for Power Peak Reduction in Railway Traffic via Timetabling,“ *Transportation Science*, Jg. 55, Nr. 3, S. 747–767, 2021, ISSN: 0041-1655. DOI: 10.1287/trsc.2020.1021.
- [7] P. Schiewe und A. Schöbel, „Periodic Timetabling with Integrated Routing: Toward Applicable Approaches,“ *Transportation Science*, Jg. 54, Nr. 6, S. 1714–1731, 2020, ISSN: 0041-1655. DOI: 10.1287/trsc.2019.0965.
- [8] M. Schmidt und A. Schöbel, „Timetabling with passenger routing,“ *OR Spectrum*, Jg. 37, Nr. 1, S. 75–97, 2015, ISSN: 0171-6468. DOI: 10.1007/s00291-014-0360-0.
- [9] M. Takamatsu und A. Taguchi, „Bus Timetable Design to Ensure Smooth Transfers in Areas with Low-Frequency Public Transportation Services,“ *Transportation Science*, Jg. 54, Nr. 5, S. 1238–1250, 2020, ISSN: 0041-1655. DOI: 10.1287/trsc.2019.0918.
- [10] S. TEKİN, S. KÖFTECİ, M. M. AYDIN und M. S. YILDIRIM, „TRIP OPTIMIZATION FOR PUBLIC TRANSPORTATION SYSTEMS WITH LINEAR GOAL PROGRAMMING (LGP) METHOD,“ *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, Nr. 26, 2018.
- [11] R. N. van Lieshout, „Integrated Periodic Timetabling and Vehicle Circulation Scheduling,“ *Transportation Science*, Jg. 55, Nr. 3, S. 768–790, 2021, ISSN: 0041-1655. DOI: 10.1287/trsc.2020.1024.
- [12] W. Fan und R. B. Machemehl, „Tabu Search Strategies for the Public Transportation Network Optimizations with Variable Transit Demand,“ *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Jg. 23, Nr. 7, S. 502–520, 2008, ISSN: 10939687. DOI: 10.1111/j.1467-8667.2008.00556.x.
- [13] J. Hao, X. Liu, X. Shen und N. Feng, „Bilevel Programming Model of Urban Public Transport Network under Fairness Constraints,“ *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Jg. 2019, S. 1–10, 2019, ISSN: 1026-0226. DOI: 10.1155/2019/2930502.
- [14] J. Ma, Y. Zhao, Y. Yang u. a., „A Model for the Stop Planning and Timetables of Customized Buses,“ *PloS one*, Jg. 12, Nr. 1, e0168762, 2017. DOI: 10.1371/journal.pone.0168762.

- [15] J. Widuch, „A Label Correcting Algorithm for the Bus Routing Problem,“ *Fundamenta Informaticae*, Jg. 118, Nr. 3, S. 305–326, 2012, ISSN: 01692968. DOI: 10.3233/FI-2012-716.
- [16] J. Xiong, W. Guan, L. Song, A. Huang und C. Shao, „Optimal Routing Design of a Community Shuttle for Metro Stations,“ *Journal of Transportation Engineering*, Jg. 139, Nr. 12, S. 1211–1223, 2013, ISSN: 0733-947X. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000608.
- [17] B. ZHAMANBAYEV, A. RAIMBAYEV, E. ALMAKHANOVA, S. RAIMBAYEVA und W. WÓJCIK, „TWO-STAGE SUBSTANTIATION OF PLACEMENT OF PUBLIC TRANSPORT STOPS,“ *Transport Problems*, Jg. 16, Nr. 1, S. 87–97, 2021. DOI: 10.21307/tp-2021-008.
- [18] C. Brabänder, *Die Letzte Meile*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, ISBN: 978-3-658-29926-2. DOI: 10.1007/978-3-658-29927-9.
- [19] W. Stock und T. Bernecker, *Verkehrsökonomie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, ISBN: 978-3-658-02307-2. DOI: 10.1007/978-3-658-02308-9.
- [20] Kay W. Axhausen, Ilka Ehreke, Axel Glemser, Stephane Hess, Christian Jdden und Kai Nagel, „Schlussbericht: FE-Projekt-Nr. 96.996/2011: Ermittlung von Bewertungsansätzen für Reisezeiten und Zuverlässigkeit auf der Basis eines Modells für modale Verlagerungen im nicht-gewerblichen und gewerblichen Personenverkehr für die Bundesverkehrswegeplanung,“ 2015.
- [21] Deutsche Bahn AG, Mitarb., *Standardisierte Bewertung von Verkehrsweginvestitionen im schienengebundenen öffentlichen Personennahverkehr - Anhang 1. Datenvorgaben, Kosten- und Wertansätze*, 2016.
- [22] V. Kolarova, F. Steck und F. Bahamonde-Birke, *Erfassung des Value of Travel Time Savings beim autonomen Fahren*, Berlin, 2018-06-15.
- [23] S. I. Gass und M. C. Fu, *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*. Boston, MA: Springer US, 2013, ISBN: 978-1-4419-1137-7. DOI: 10.1007/978-1-4419-1153-7.
- [24] H.-J. Bungartz, S. Zimmer, M. Buchholz und D. Pflüger, *Modellbildung und Simulation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, ISBN: 978-3-642-37655-9. DOI: 10.1007/978-3-642-37656-6.
- [25] T. Ottmann und P. Widmayer, *Algorithmen und Datenstrukturen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, ISBN: 978-3-662-55649-8. DOI: 10.1007/978-3-662-55650-4.
- [26] Google Ireland Limited, *Google Maps Platform Dokumentation: Erste Schritte mit der Google Maps Platform*. Adresse: <https://developers.google.com/maps/gmp-get-started> (besucht am 01.09.2021).
- [27] OpenStreetMap-Mitwirkende, *OpenStreetMap*. Adresse: [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org) (besucht am 17.08.2021).
- [28] M. Madsen und M. Gennat, *Making Connected Mobility Work: Reisewiderstandsbestimmung mit automatisierter Umsteigeerkennung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, ISBN: 978-3-658-32265-6. DOI: 10.1007/978-3-658-32266-3.
- [29] C. Helmert und K. Henninger, *Modal-Split-Erhebung - Mobilitätsbefragung 2017 zum werktäglichen Verkehrsverhalten der Bevölkerung in Krefeld*, 2017.
- [30] © OpenStreetMap-Mitwirkende, *Osmosis*. Adresse: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Osmosis> (besucht am 01.09.2021).

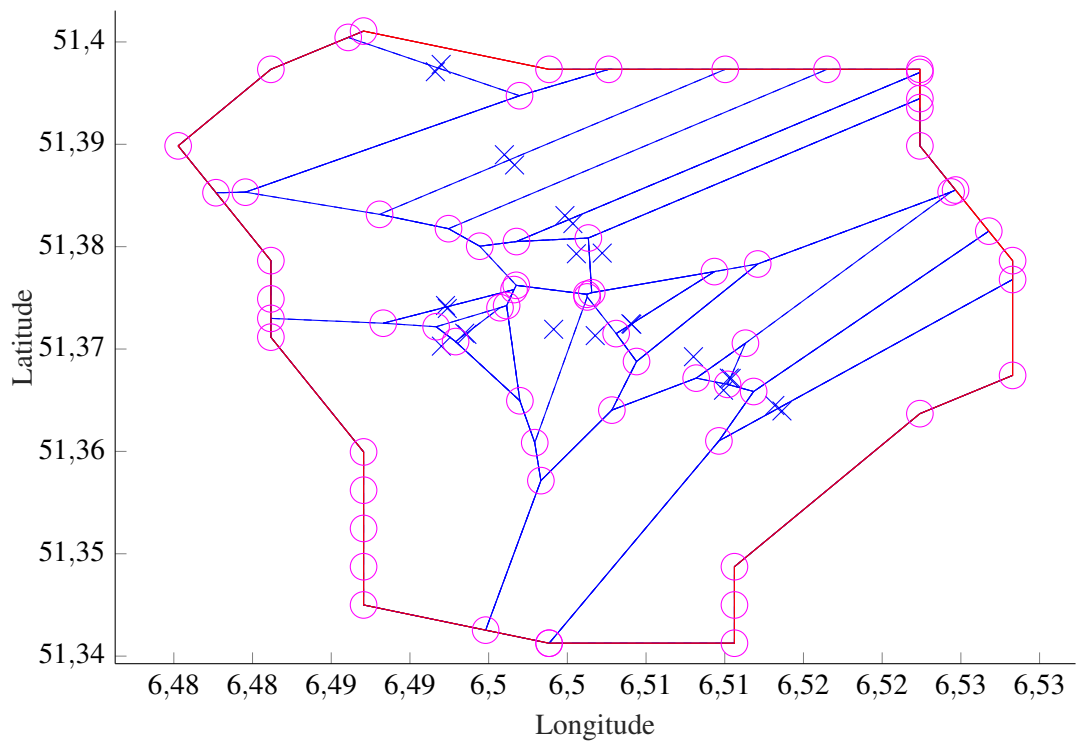
- [31] The MathWorks, Inc., *Matlab*. Adresse: <https://de.mathworks.com/products/matlab.html> (besucht am 01.09.2021).
- [32] D. Applegate, R. E. Bixby, V. Chvátal und W. J. Cook, *Concorde TSP Solver*. (besucht am 01.09.2021).
- [33] R. I. Sarker, M. Mailer und S. K. Sikder, „Walking to a public transport station,“ *Smart and Sustainable Built Environment*, Jg. 9, Nr. 1, S. 38–53, 2020, ISSN: 2046-6099. DOI: 10.1108/SASBE-07-2017-0031.
- [34] J. Kain, *Kostensteigerung im gewerblichen Personenverkehr mit Autobussen*, Berufsgruppe Bus, Hrsg., 2019.
- [35] Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V., *Dieselpreis-Information (Großverbraucher) vom 20. August 2021*, 2021. Adresse: <https://www.bgl-ev.de/images/downloads/dieselpreisinformation.pdf> (besucht am 29.08.2021).
- [36] P. Frank, M. Friedrich und J. Schlaich, „Betriebskosten von Busverkehr schnell und genau ermitteln,“ *Der Nahverkehr*, Nr. 11, 2008. (besucht am 29.08.2021).



### A. Modifizierte kumulierte Normalverteilung der Nicht-Laufbereitschaft zu einer Haltestelle



### B. Geschlossene Voronoizellen für den Stadtteil Hül's



## C. Kostenkalkulation für den Betrieb eines On-Demand-Kleinbusses am Beispiel eines Mercedes Vito Tourer Base

**Tabelle 2:** Fixkostenberechnung eines On-Demand-Busses

<b>Kostenart/Datenangabe</b>	<b>Einheit</b>	<b>Betrag</b>
Nutzungsdauer	Jahre	8
Restwert	Prozent	20
Restwert	Euro	8615,84
Abschreibung <sup>1</sup>	Euro/Jahr	4307,92
Fremdkapitalzinssatz <sup>2</sup>	Prozent	4
Fremdkapitalzinsen	Euro/Jahr	1033,90
Versicherungskostensatz	Prozent	3
Versicherungskosten	Euro/Jahr	1292,38
Sonstige Kosten <sup>3</sup>	Euro/Jahr	4000
<b>Summe</b>	<b>Euro/Jahr</b>	<b>10 634,20</b>
Werktage	Tage/Jahr	230
<b>Summe</b>	<b>Euro/Tag</b>	<b>46,24</b>

**Tabelle 3:** Berechnung distanzabhängiger Kosten eines On-Demand-Busses

<b>Kostenart/Datenangabe</b>	<b>Einheit</b>	<b>Betrag</b>
Reparaturkostensatz	Prozent	4,5
Reparaturkosten	Euro/Jahr	1938,56
Jahreskilometerleistung	Kilometer/Jahr	30 000
Reifengarniturkosten	Euro	800
Reifenlaufleistung	Kilometer	60 000
Treibstoffverbrauch	Liter/100 Kilometer	7
Treibstoffkosten [35]	Euro/Liter	1,02
Treibstoffkosten	Euro/Kilometer	0,071
Reparaturkosten	Euro/Kilometer	0,065
Reifenkosten	Euro/Kilometer	0,013
<b>Summe</b>	<b>Euro/Kilometer</b>	<b>0,149</b>

**Tabelle 4:** Berechnung zeitabhängiger Kosten eines On-Demand-Busses

<b>Kostenart/Datenangabe</b>	<b>Einheit</b>	<b>Betrag</b>
Selbstkosten Fahrer <sup>4</sup>	Euro/Stunde	25
Overheadkostensatz [36]	Prozent	33,33
<b>Summe</b>	<b>Euro/Stunde</b>	<b>33,33</b>

<sup>1</sup>Differenz von Anschaffungswert und Restwert aufgeteilt auf die Nutzungsdauer

<sup>2</sup>Produkt aus gebundenem Kapital (Summe aus Anschaffungs- und Restwert dividiert durch zwei) und dem Fremdkapitalzinssatz

<sup>3</sup>Kosten für Stellplatz, Reinigung und sonstige Zusatzleistungen [34]

<sup>4</sup>Unter Berücksichtigung von Nebenkosten und Ausfallzeiten durch Urlaub, Feiertage, Krankheit und Fortbildung

## D. Gesamtkilometerkosten des Betriebs von On-Demand-Bussen in nutzenbringenden Zellen

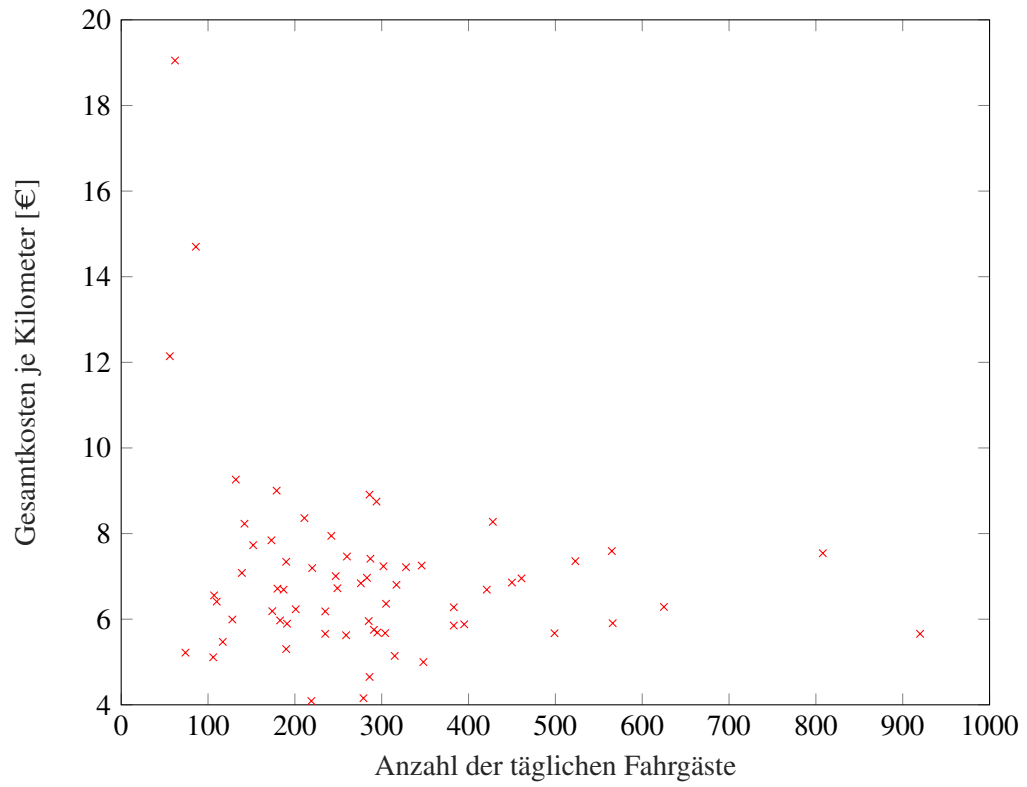


Abbildung 7: Gesamtkilometerkosten des Betriebs der nutzenbringenden Zellen