

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

Maurice Görgen, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Marc Gennat

15.02.2024

EnInnov2024

18. Symposium Energieinnovation | 14.02.-16.02.2024



Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences

SWK E²

Institut für Energietechnik und
Energiemanagement
Institute of Energy Technology and
Energy Management



Übersicht

1 **Einleitung:** Motivation und Forschungsziel

2 **Methodik:** Datenerfassung und -verarbeitung, Simulation und Optimierung

3 **Anwendungsbeispiel für Krefeld**

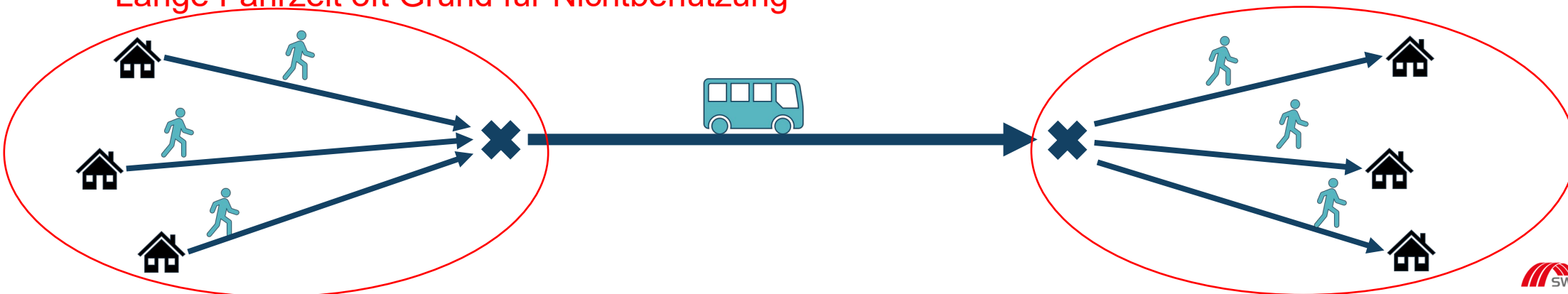
4 **Diskussion und Schlussfolgerung**

Einleitung – Hintergrund und Motivation



- ↓ Senkung des Primär- und Endenergieverbrauchs
- ↓ Geringere Treibhausgasemissionen
- ↑ Steigerung der Energieproduktivität

45-62% weniger Emissionen pro Passagierkilometer
Lange Fahrzeit oft Grund für Nichtbenutzung



Einleitung – Forschungsziel

Ziel



Einsatz von On-Demand-Ridepooling-Kleinbussen im ÖPNV



Ersatz für die Fußwege auf der ersten und letzten Meile



Optimierung mit Kostenfunktion für Angebot und Nachfrage



Bewertung von Potenzial und Durchführbarkeit

Restriktionen



Möglichst vollständige Deckung der Nachfrage



Keine Simulation von Verhaltensänderungen

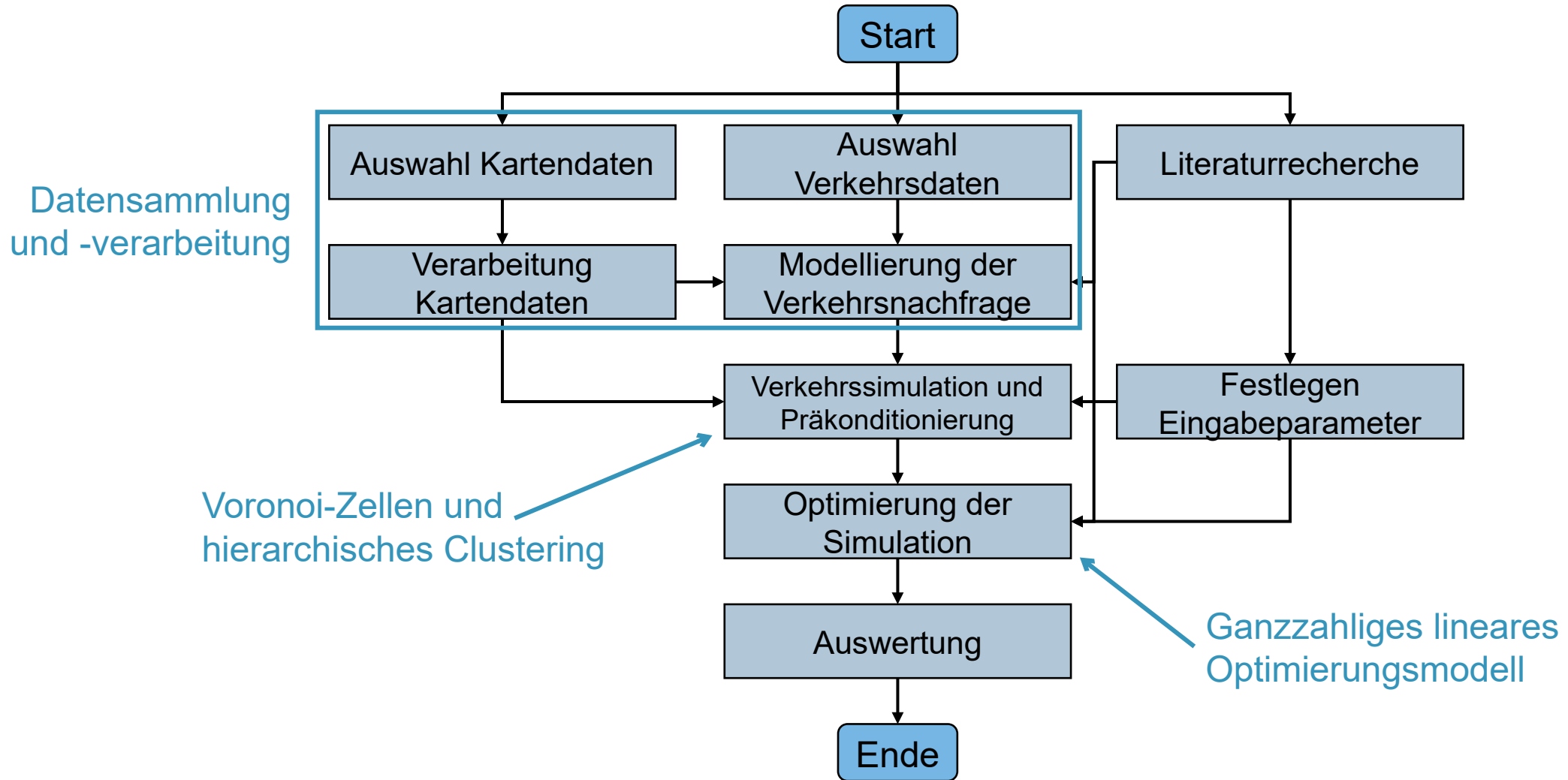


Ergänzung zum Linienverkehr

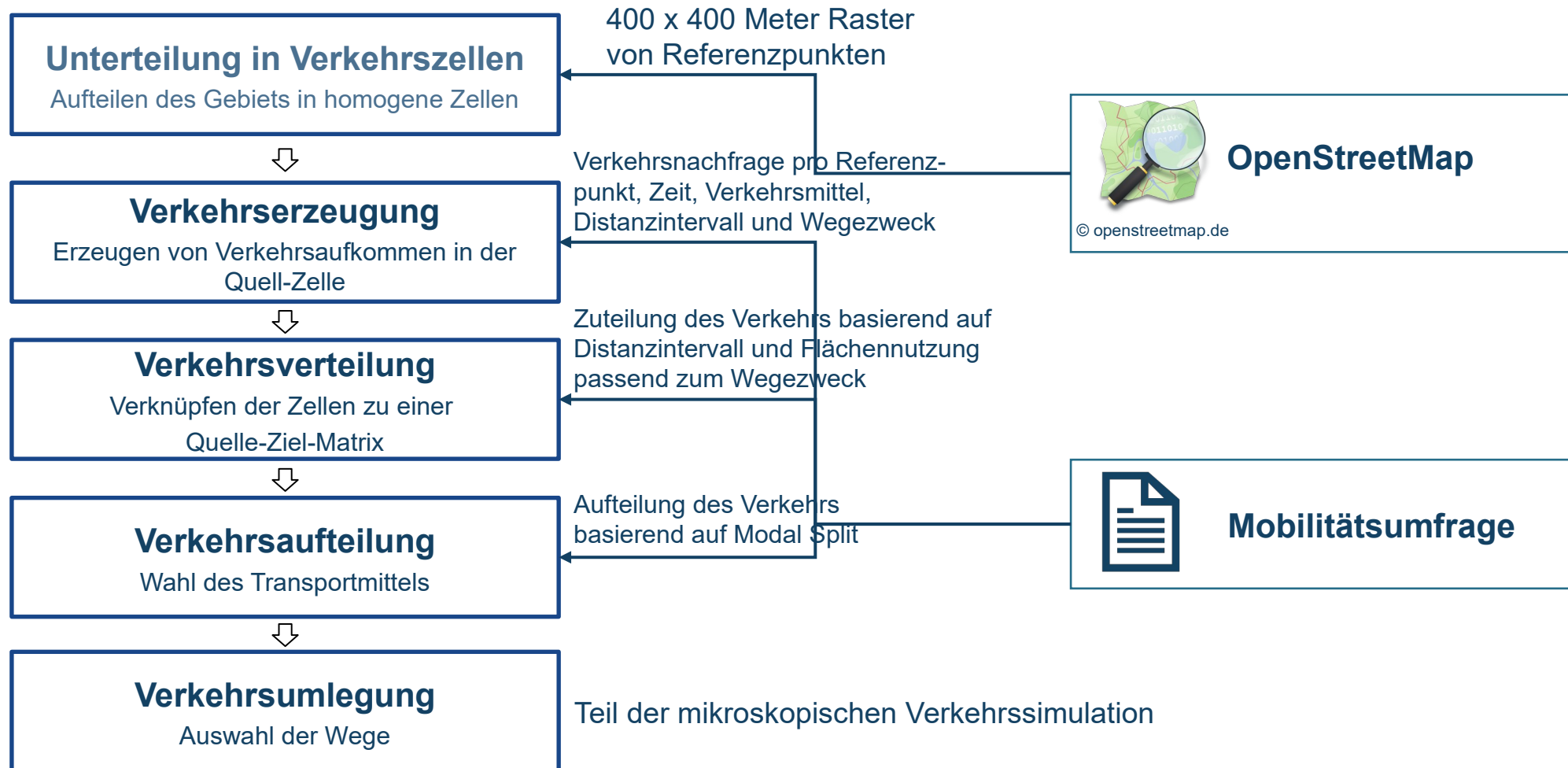


Kein Taxiprinzip

Methodik – Übersicht



Methodik – Datensammlung und -verarbeitung



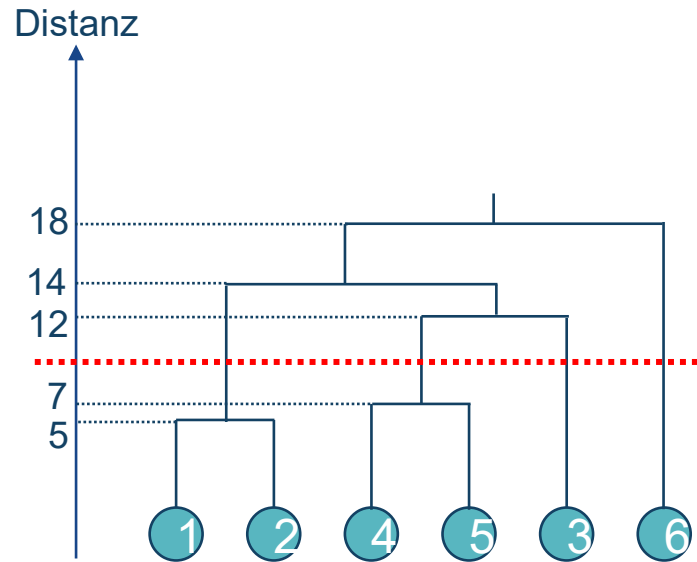
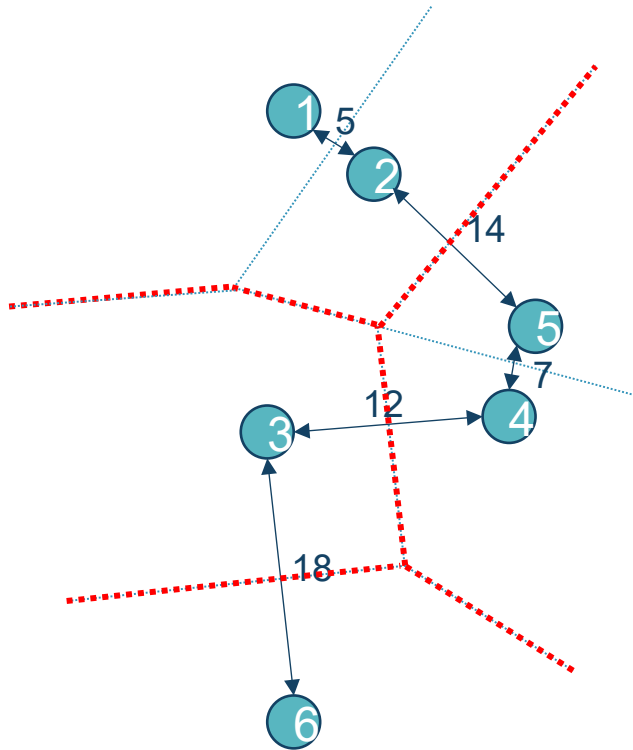
Methodik – Voronoi-Zellen



Annahmen für die Eignung:

- Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel beginnt oder endet an der nächstgelegenen Haltestelle
- Ausreichende Unterteilung zur Identifizierung der nächstgelegenen Haltestellen
- Entfernungen zwischen Haltestellen gleicher Linien, aber entgegengesetzter Richtung vernachlässigbar
- Bereitschaft, zu weiter entfernten Haltestellen gefahren zu werden

Methodik – Hierarchisches Clustering



Annahmen für die Eignung :

- Die Anzahl der Cluster sollte nicht angegeben werden
- Die Anzahl der zu einem Cluster gehörenden Haltestellen sollte nicht angegeben werden
- Im Voraus unklar, welche Cluster am besten geeignet sind

Methodik – Ganzzahliges lineares Optimierungsmodell

Zielfunktion

1}

$$c \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{m+n} \quad x \in \{0,1\}^{m+n}$$

Kosten

)

$$c_s \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{m+n} \quad c_d \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{m+n}$$

Die Gesamtkosten setzen sich aus Angebots- und Nachfragekosten zusammen, gewichtet nach

Nebenbedingungen

$$A = \begin{pmatrix} A_I & I & A_{II} \end{pmatrix} \quad A \in \{0,1\}^{m \times (m+n)} \quad b \in 1^m$$

$$A_I = I^{m \times m} \quad I \in \{0,1\}^{m \times m}$$

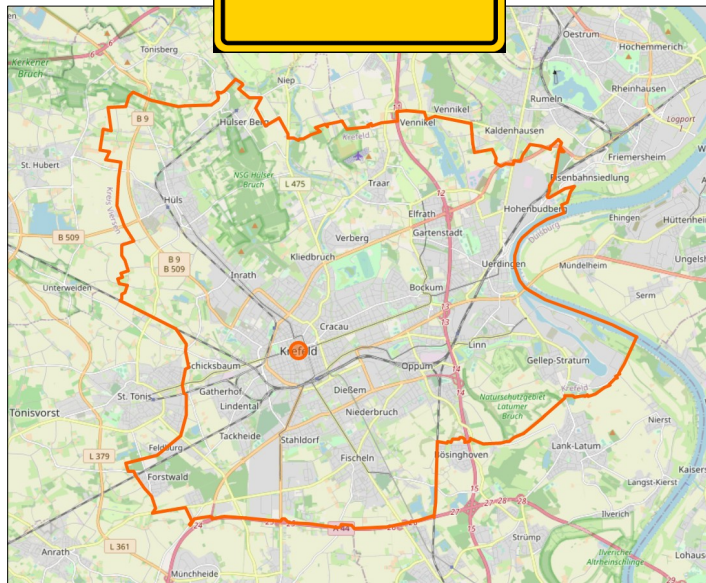
$$A_{II} = (q_1, \dots, q_n) \quad A_{II} \in \{0,1\}^{m \times n} \quad q \in \{0,1\}^m$$

Jede Haltestelle existiert genau einmal in der Lösung (entweder allein oder im Cluster)

| | |
|----------------|---|
| c | Kombinierter Kostenvektor |
| c _d | Nachfrageseitiger Kostenvektor |
| c _s | Angebotsseitiger Kostenvektor |
| I | Identitätsmatrix |
| m | Summe aller Voronoi-Zellen |
| n | Summe aller geclusterten Zellen |
| q | Vektor der Voronoi-Zellen, die in einer Clusterzelle enthalten sind |
| α | Gewichtungsfaktor Angebot zu Nachfrage |

Anwendungsbeispiel – Die Stadt Krefeld

Krefeld



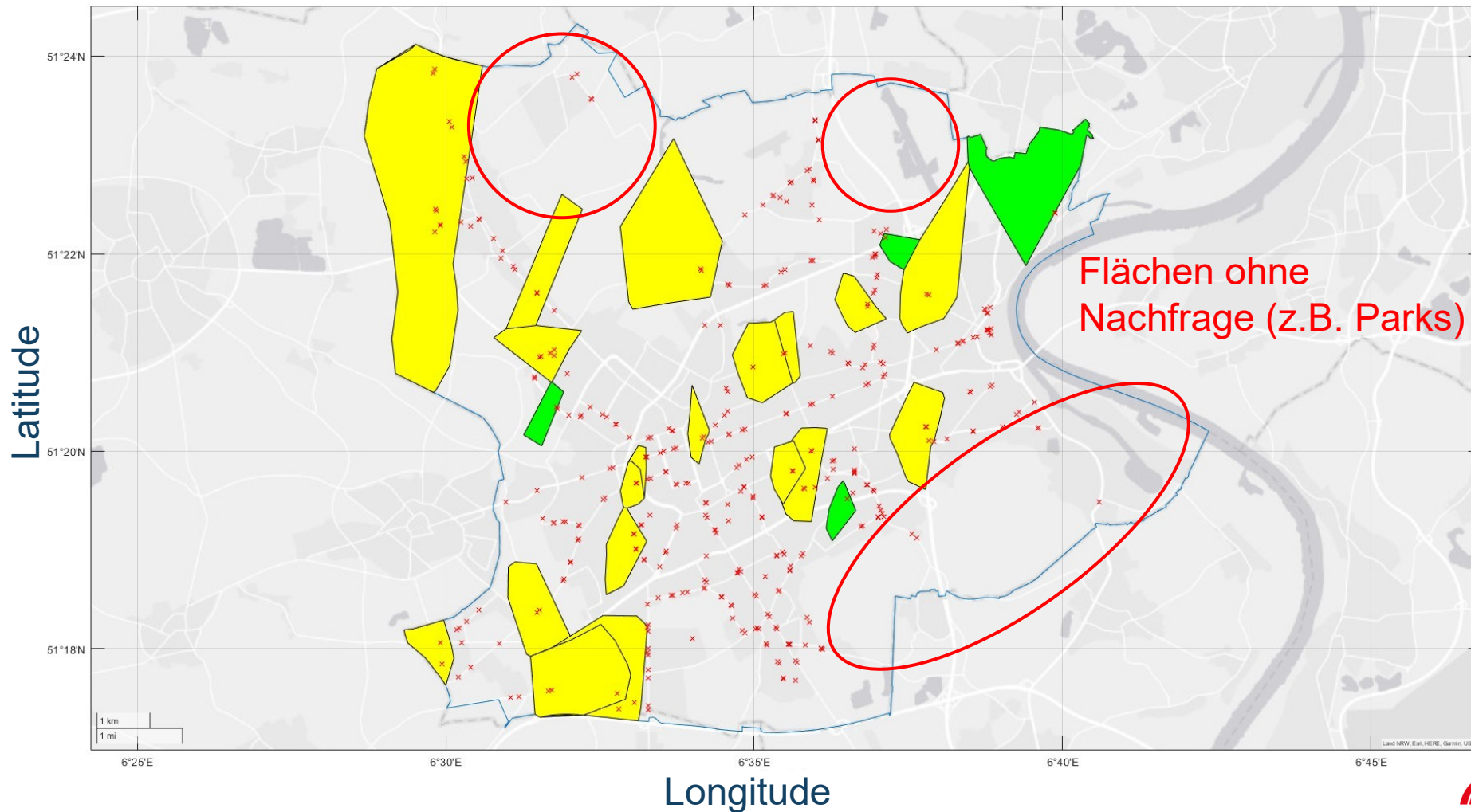
Informationen zur Stadt

| | |
|--------------------|-------------------------------|
| Fläche | 137.78 km ² |
| Bevölkerung | 228,426 (31.12.2022) |
| Bevölkerungsdichte | 1658 Personen/km ² |
| Aufteilung | 19 Stadtteile |

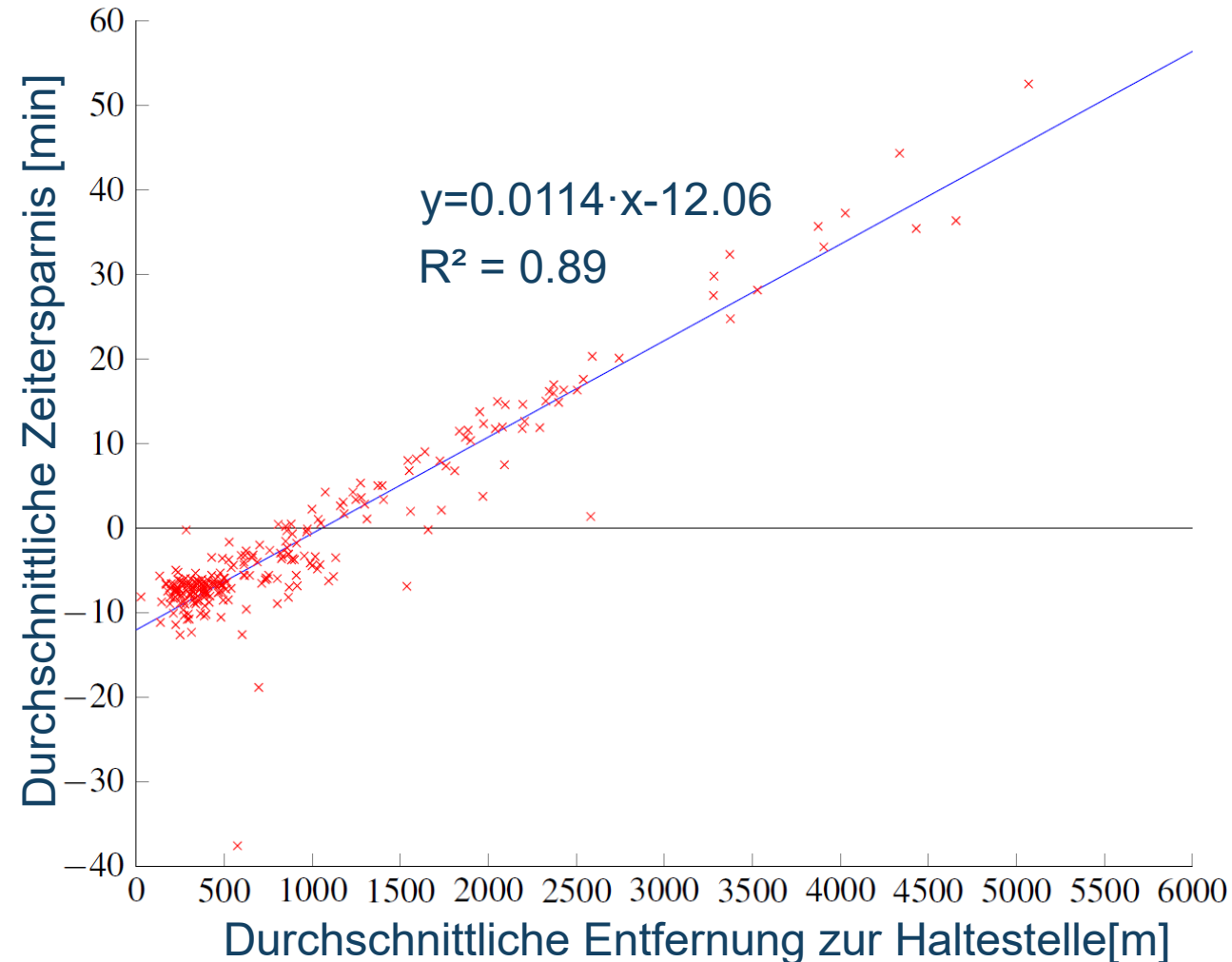
Daten zum öffentlichen Verkehr

| | |
|--|------|
| ÖPNV-Linien | 146 |
| Haltestellen | 721 |
| Individuelle Haltestellen auf den Linien | 1604 |

Anwendungsbeispiel– Zonen mit potenzieller Zeitersparnis durch On-Demand-Services



Anwendungsbeispiel– Korrelation von Zellengröße und Zeitersparnis



Anwendungsbeispiel – Resultierende Kosten



Vorteilhafter On-Demand-Service ab einer durchschnittlichen Entfernung zur Haltestelle von 1058 m möglich



Keine Korrelation zwischen Fahrgastzahlen und Kosten (in vorteilhaften Voronoi-Zellen)



7,00 €/km durchschnittliche Gesamtkosten (Angebot und Nachfrage), 2,24 €/km Standardabweichung



4.08 – 9.26 €/km Kostenbereich



~36.000€/Tag Betriebskosten für 612 Busse, 4,02€/km durchschnittliche Betriebskosten, 2,34 - 5,32 €/km Spannweite der Betriebskosten



39% Auslastung

Diskussion und Schlussfolgerung



Geringe Zuverlässigkeit der Verkehrsnachfragedaten



Höhe der Nachfrage nicht auf die Realität übertragbar, nur Potenzial



Qualität der Straßengrafik kritisch, falsche Routenführung möglich



Vollständige Deckung des Bedarfs



Erster Beitrag zur Identifizierung geeigneter Gebiete für On-Demand-Verkehre

Ausblick



Entwicklung einer KI-Methode zur Identifikation und Potenzialabschätzung geeigneter Gebiete für On-Demand-Angebote im öffentlichen Personennahverkehr

**Ergebnisse Anfang 2024
for Nordrhein-Westfalen**



Bestimmung und Simulation eines optimalen hybriden On-Demand-Verkehrs – Eine Studien im städtischen und ländlichen Raum

**Detaillierte Ergebnisse 2025
für Krefeld**

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Maurice Görgen, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Marc Gennat

EnInnov2024

18. Symposium Energieinnovation | 14.02.-16.02.2024



Hochschule Niederrhein
University of Applied Sciences

SWK E²

Institut für Energietechnik und
Energiemanagement
Institute of Energy Technology and
Energy Management



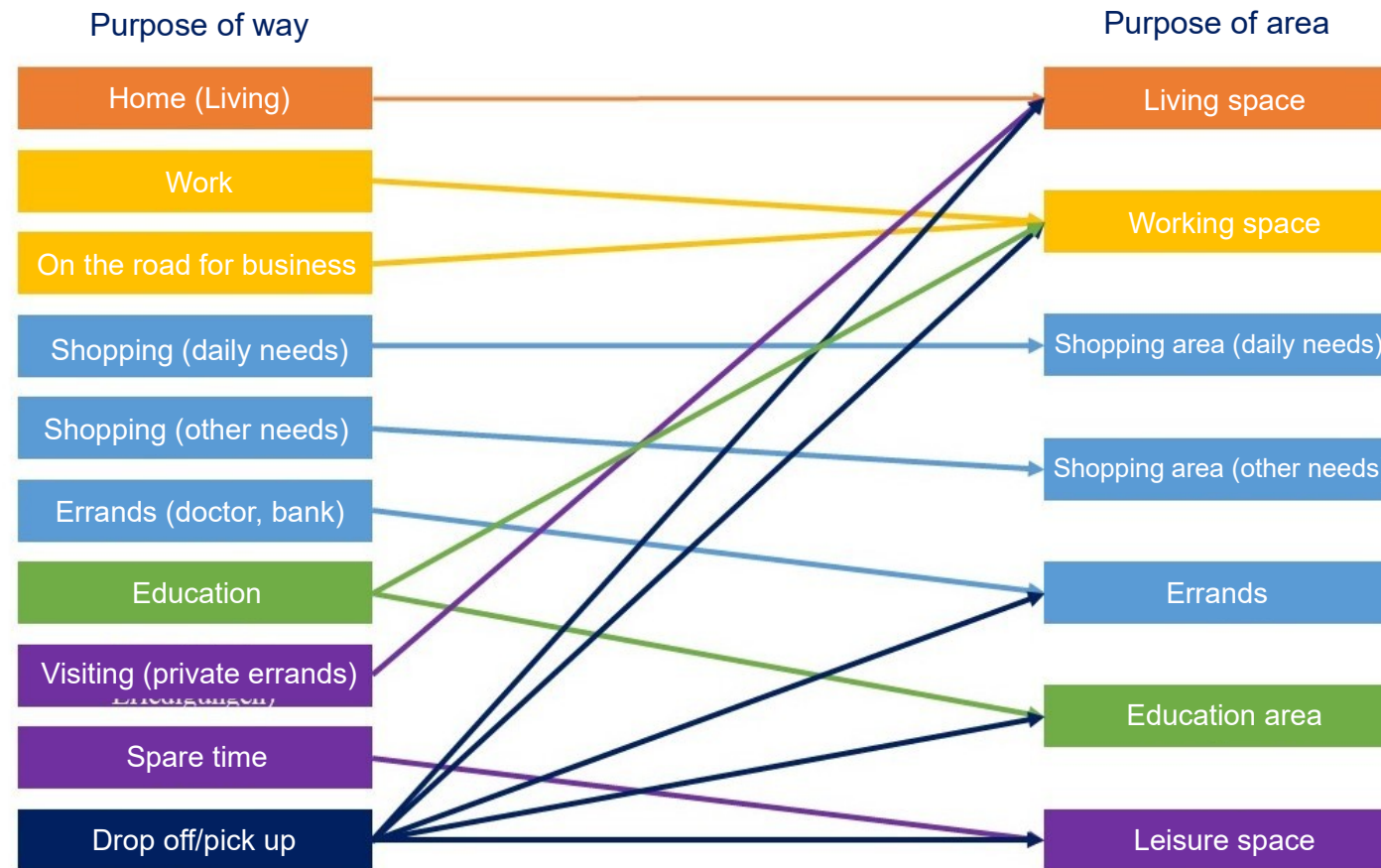
Literatur (1/2)

- [1] Nobis, Claudia und Kuhnimhof und Tobias, „Mobilität in Deutschland – MiD. Ergebnisbericht. BMVI, 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. Kliewer, „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. Barmann, 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. Schobel, „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. Schobel, „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. KOFTECİ, 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.

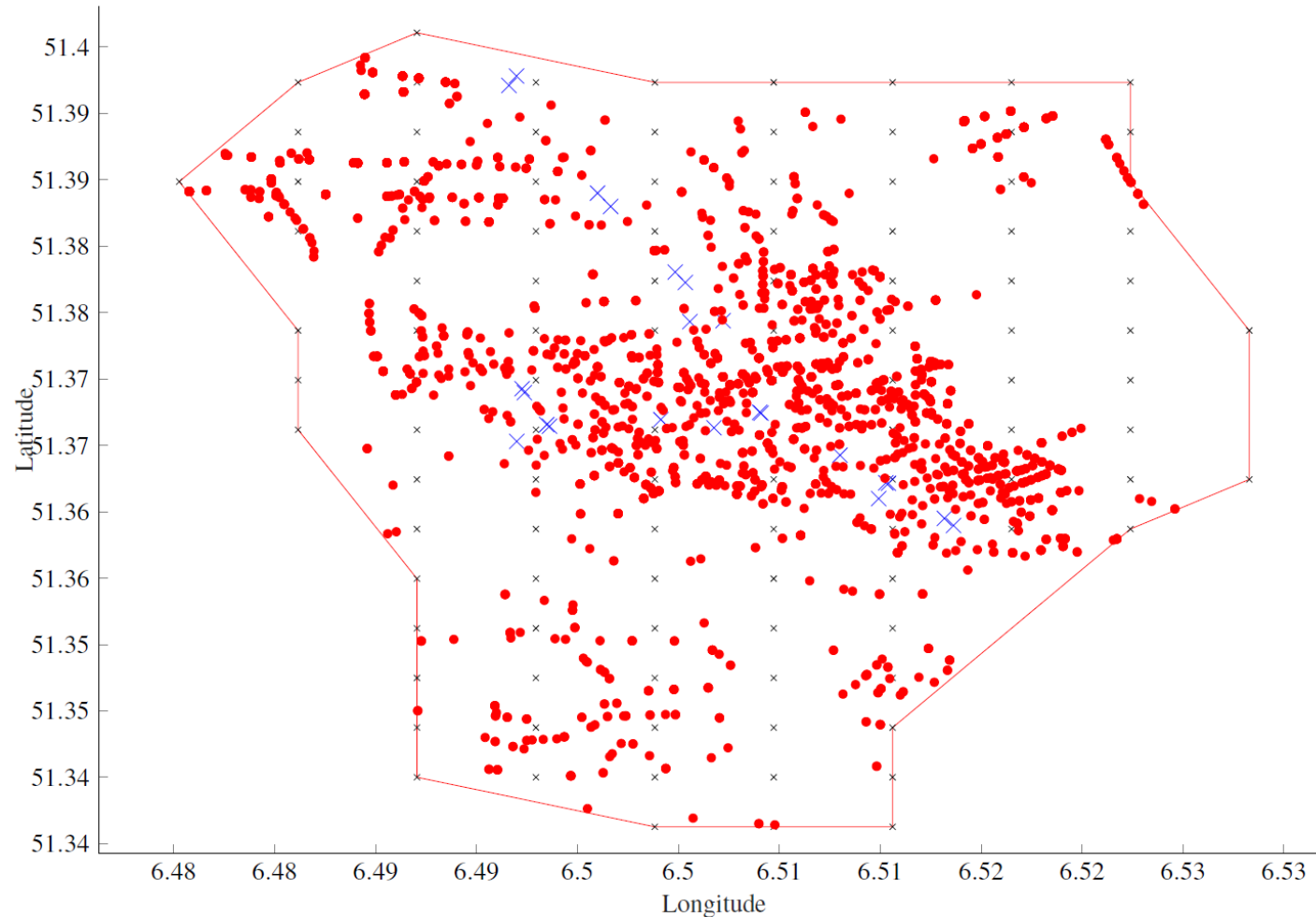
Literatur (2/2)

- [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 Verkehrswegeinvestitionen 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 (besucht am 17. 08. 2021).
- [28] M. Madsen und M. Gennat, Making Connected Mobility Work: Reisewiderstandsbestimmung mit automatisierter Umsteigeerkennung. Wiesbaden: Springer FachmedienWiesbaden, 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).

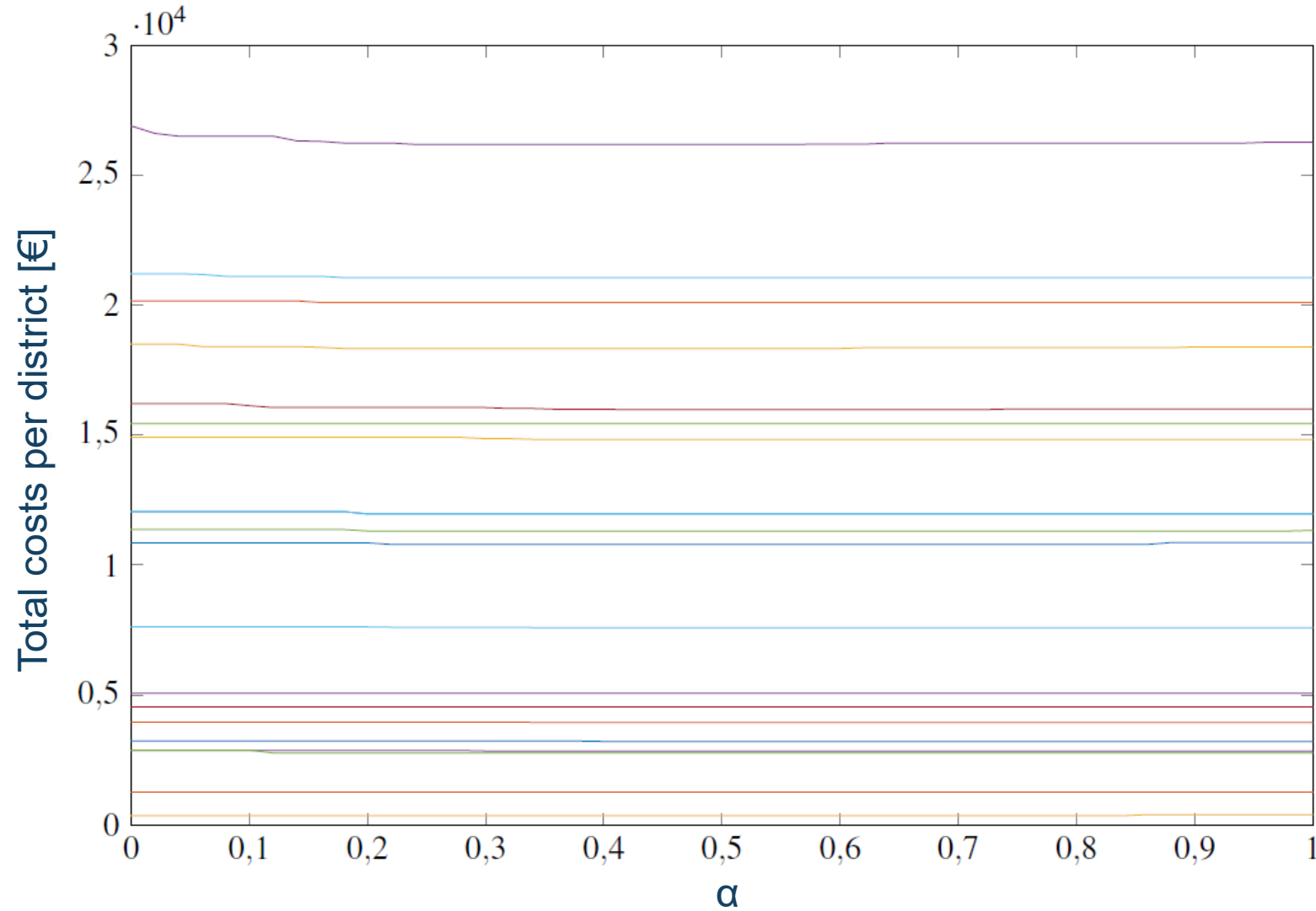
Assignment of path purposes and area purposes to identify potential target locations



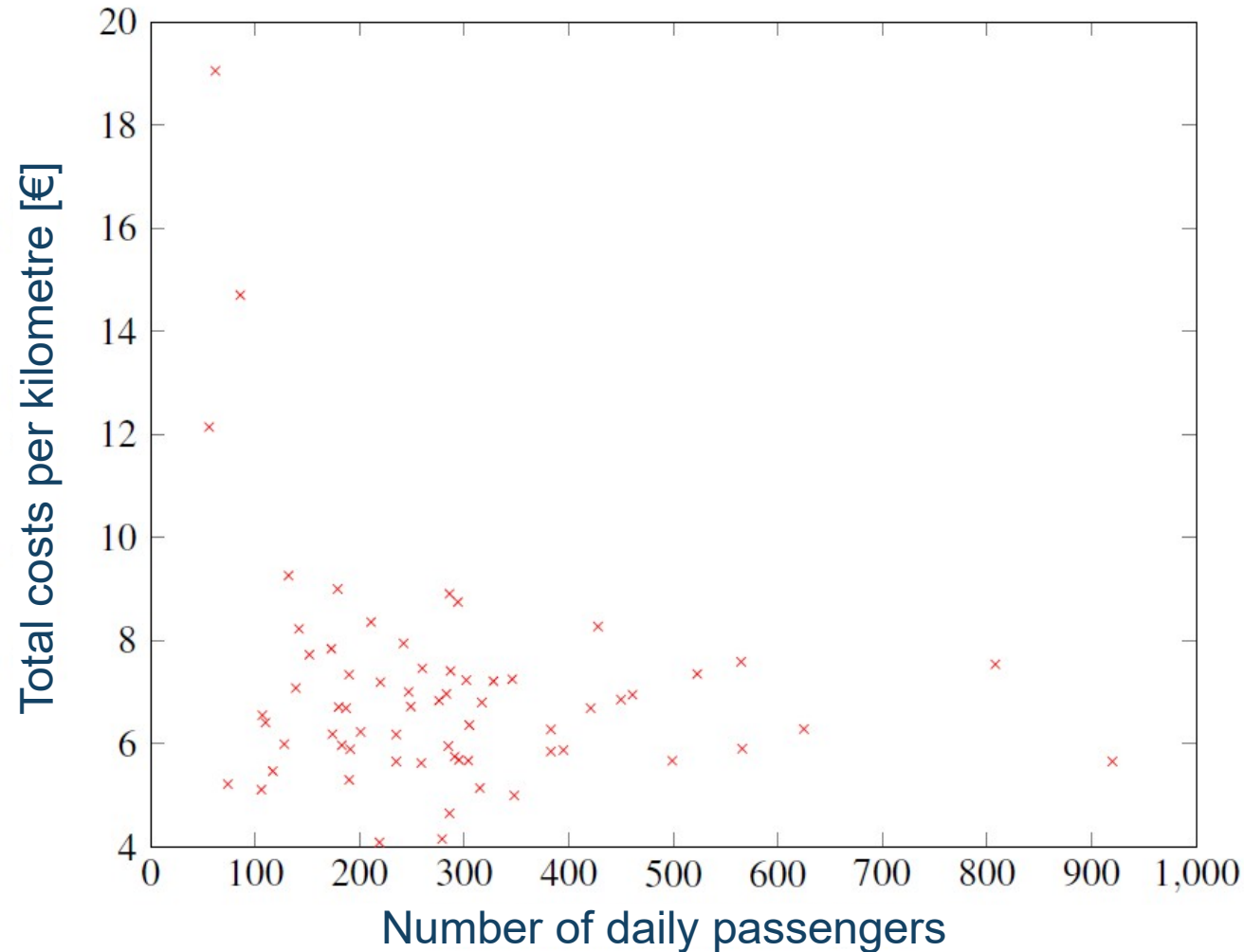
Representation of stochastic demand locations in Krefeld Hüls, abridged



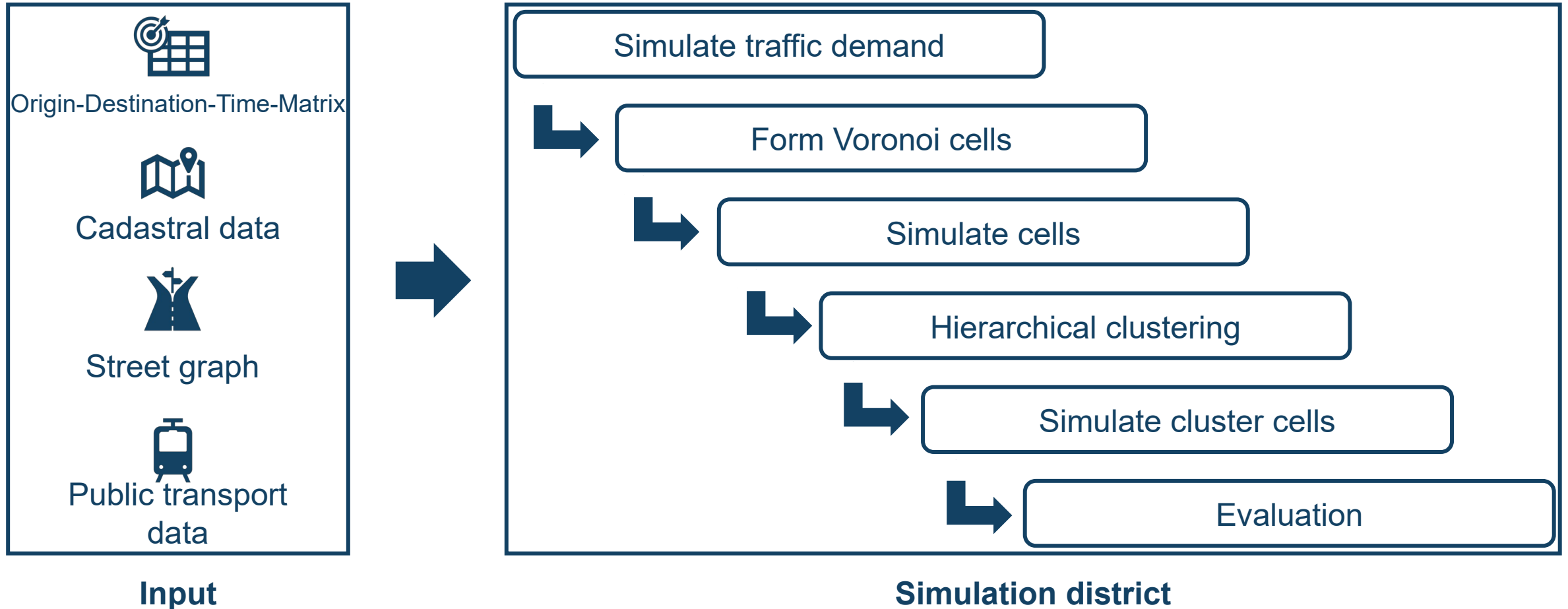
Sensitivity alpha factor



Total kilometre costs of operating the benefit-generating cells



Procedure Algorithmics



Key data for the microscopic traffic simulation



- Lead time of 15 minutes for the request for transportation
- 45 seconds of boarding and deboarding time per passenger
- Demand starting at the stop only considered if there are passengers at the stop at the start time



- 8 passengers
- 25 kilometers per hour



- All requests no later than 15 minutes after the first request of a tour minus the arrival time included
- Persons not transported in a tour due to restrictions carried over to the next iteration
- For all transported persons, TSP is solved with the stop as the starting point

Cost calculation of an on-demand bus

Fixed Costs

| Cost type/data specification | Amount |
|---------------------------------------|---------------|
| Purchase value [€] | 43,079 |
| Service life [a] | 8 |
| Residual value [%] | 20 |
| Residual value [€] | 8,616 |
| Depreciation [€/a] | 4,308 |
| Interest rate on borrowed capital [%] | 4 |
| Interest on borrowed capital [€/a] | 1,034 |
| Insurance cost rate [%] | 3 |
| Insurance cost [€/a] | 1,292 |
| Other costs [€/a] | 4,000 |
| Sum [€/a] | 10,634 |
| Working days [d/a] | 230 |
| Sum [€/a] | 46.24 |

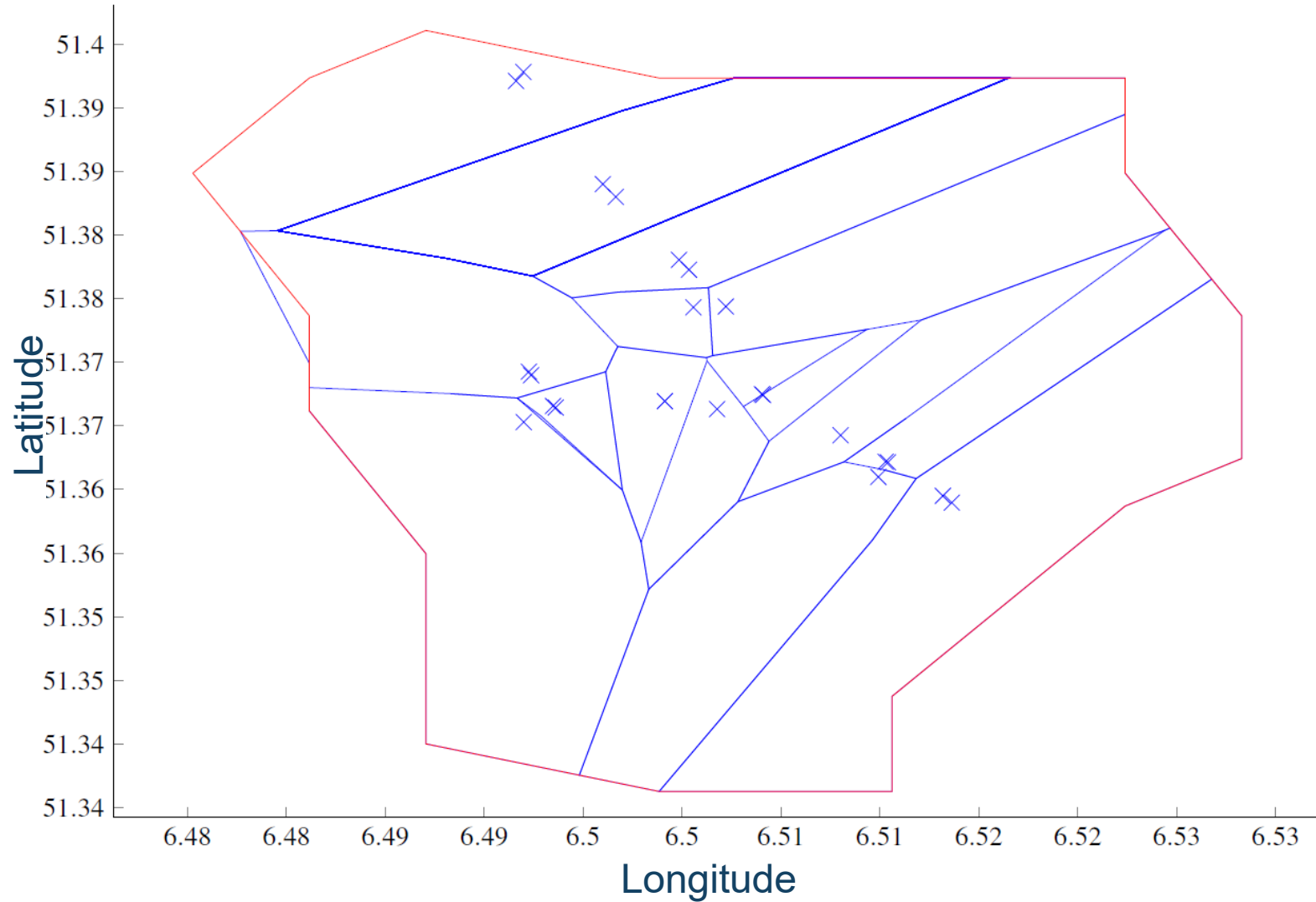
Distance Dependent Costs

| Cost type/data specification | Amount |
|------------------------------|--------------|
| Repair cost rate [%] | 4.5 |
| Repair costs [€/a] | 1,939 |
| Annual mileage [km/a] | 30,000 |
| Tyre set costs [€] | 800 |
| Tyre mileage [km] | 60,000 |
| Fuel consumption [L/100km] | 7 |
| Fuel costs [€/L] | 1.02 |
| Fuel costs [€/km] | 0.071 |
| Repair costs [€/km] | 0.065 |
| Tyre costs [€/km] | 0.013 |
| Sum [€/km] | 0.149 |

Time Dependent Costs

| Cost type/data specification | Amount |
|------------------------------|-----------|
| Driver cost price [€/h] | 25 |
| Overhead cost rate [%] | 33 |
| Sum [€/h] | 33 |

Case Study – Example of Optimal Zoning



Case Study – Zones with Potential Time Savings through On-Demand Services

