

Wohin mit den Ladesäulen?

Lösungsansätze zur optimalen Platzierung von
Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge

Vortrag zur Bachelorarbeit von Katharina Matulla

Betreuer Patrick Brosi, Prüferin Prof. Hannah Bast

Professur für Algorithmen und Datenstrukturen

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, August 2019

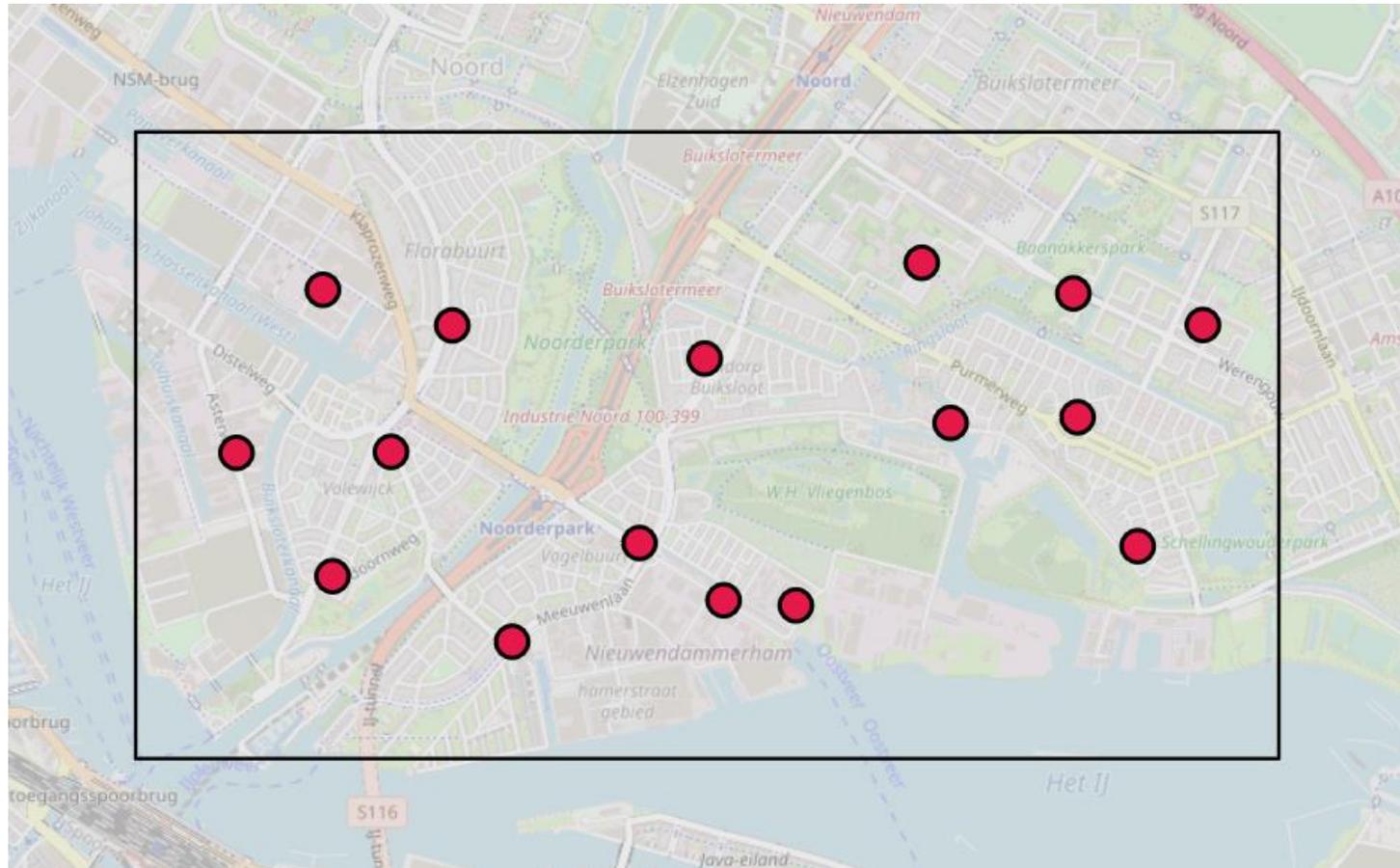
1. Fragestellung

Fragestellung | Beispiel

Optimale Platzierung von 16 Ladestandorten innerhalb dieser Bounding Box?



Fragestellung | Beispiel



Fragestellung | Motivation

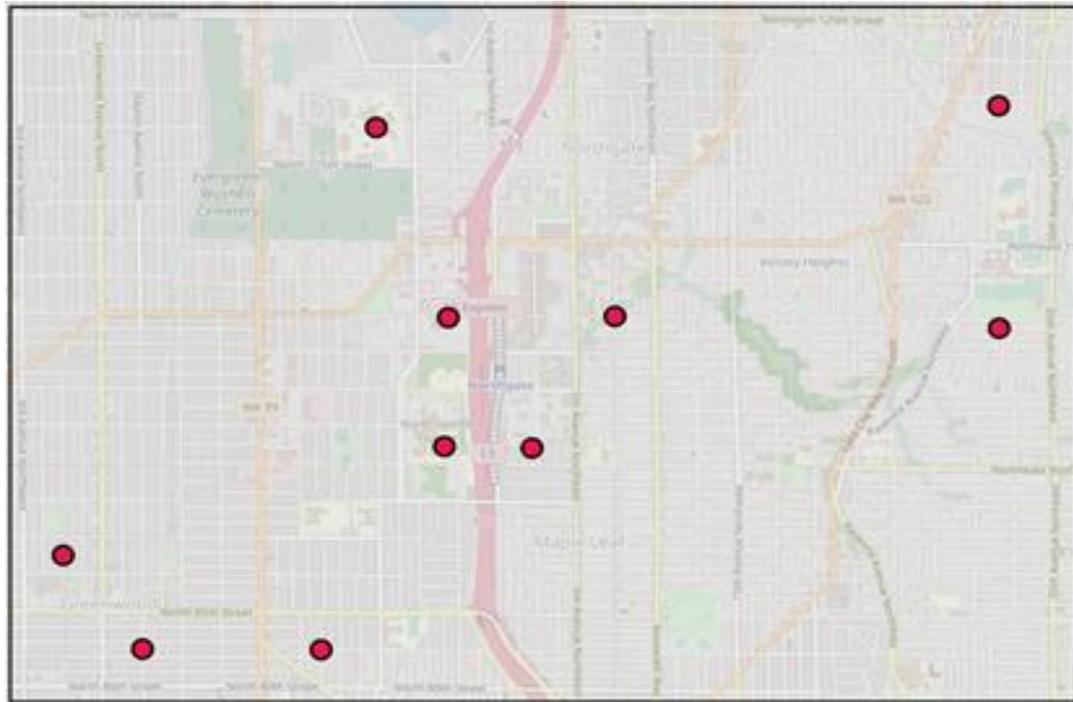
- Wachsender Markt für Elektroautos
- Reichweitenangst
- Öffentliche Ladeinfrastruktur benötigt
- Platzierung der Ladeinfrastruktur: Bedarf gedeckt & Kosten minimal
- Projekt beim Fraunhofer ISE

Fragestellung | Leitfragen – Stand der Forschung

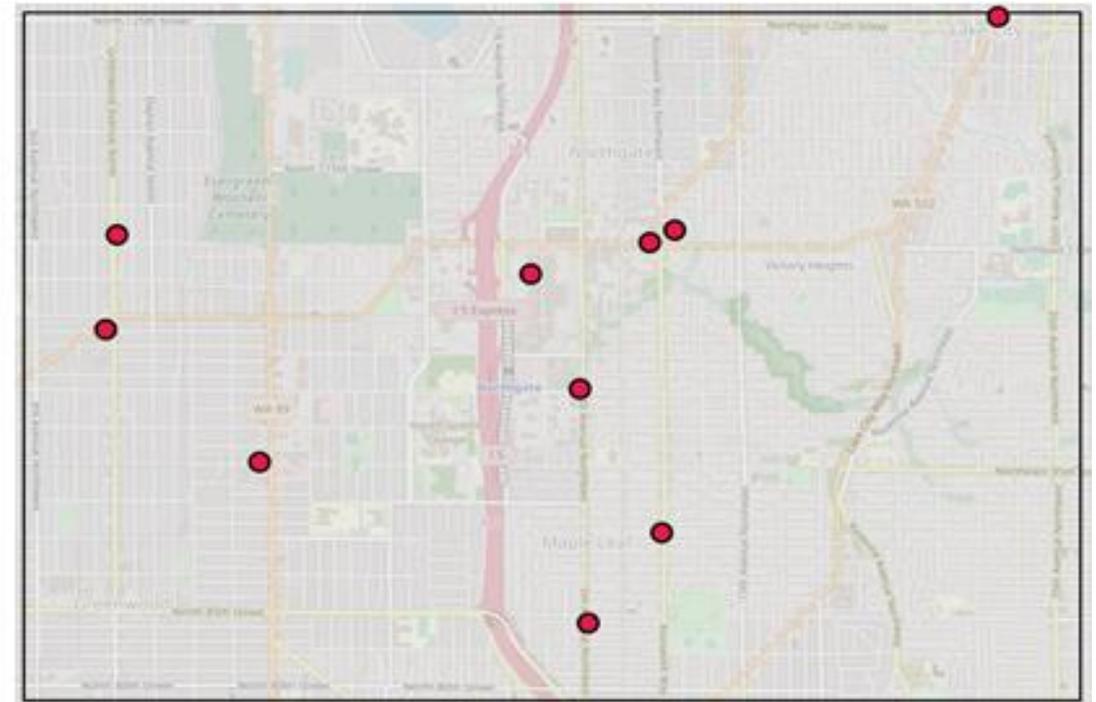
1. Welche Daten können zur Berechnung von optimalen Ladestandorten verwendet werden?
 - Selektierte Points of Interest (POIs) aus OpenStreetMap
 - Proxy für den räumlichen Bedarf
 - Proxy für mögliche Ladestandorte
2. Welche Algorithmen eignen sich zur Berechnung von optimalen Ladestandorten?
 - Clusteringverfahren
 - Optimierungsalgorithmen
3. Wie können die berechneten Ladestandorte in Hinblick auf ihre Qualität evaluiert werden?
 - Differenz zum “optimalen” Ergebnis anderer Forschungsarbeiten

Fragestellung | Stand der Forschung - Evaluation

Welche Platzierung der zehn Ladestandorte ist besser?



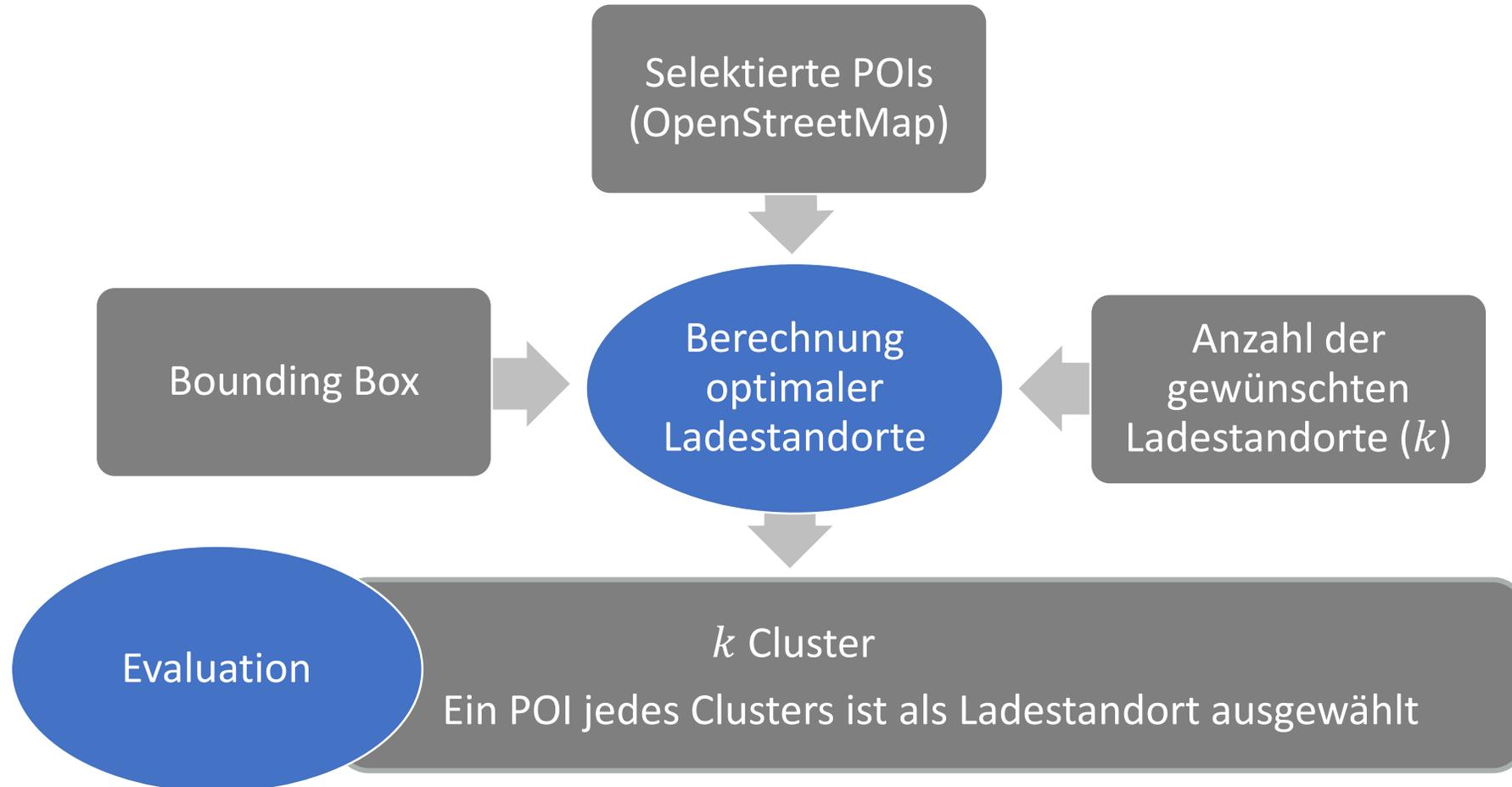
Optimale Lösung



Zufällige Platzierung

2. Methodik

Methodik | Übersicht Implementierung



Methodik | K -Means-Algorithmus

- Schneller & beliebter Clusteralgorithmus
- Basiert auf euklidischen Distanzen
- Liefert k Cluster mit jeweils einem Zentroid zurück
- Gute Verteilung der Ladestandorte im Raum

Methodik | Knotenzentralitätsalgorithmus

- Nutzung der realen Distanzen zwischen den POIs (OSMnx Routing)

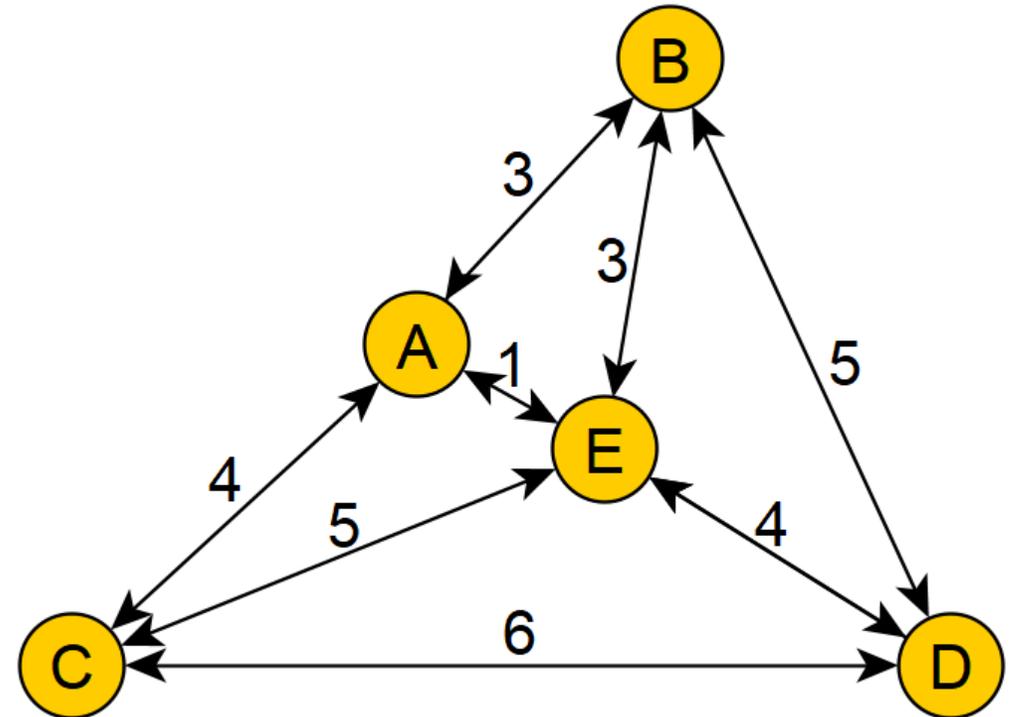
$$\begin{array}{c} A \\ B \\ C \\ D \end{array} \begin{pmatrix} A & B & C & D \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 2 & \dots & 4 & 3 \\ 2 & 5 & \dots & 6 \\ 3 & 4 & 6 & 0 \end{pmatrix}$$

- Erstellung eines Graphens aus Distanzmatrix und Berechnung Knotenzentralitätswerte
- Keine gute natürliche Verteilung der Ladestandorte
- Eingabe eines Mindestabstands zwischen den Ladestandorten ermöglicht

Methodik | Genetischer p -Median Algorithmus

P-Median-Problem

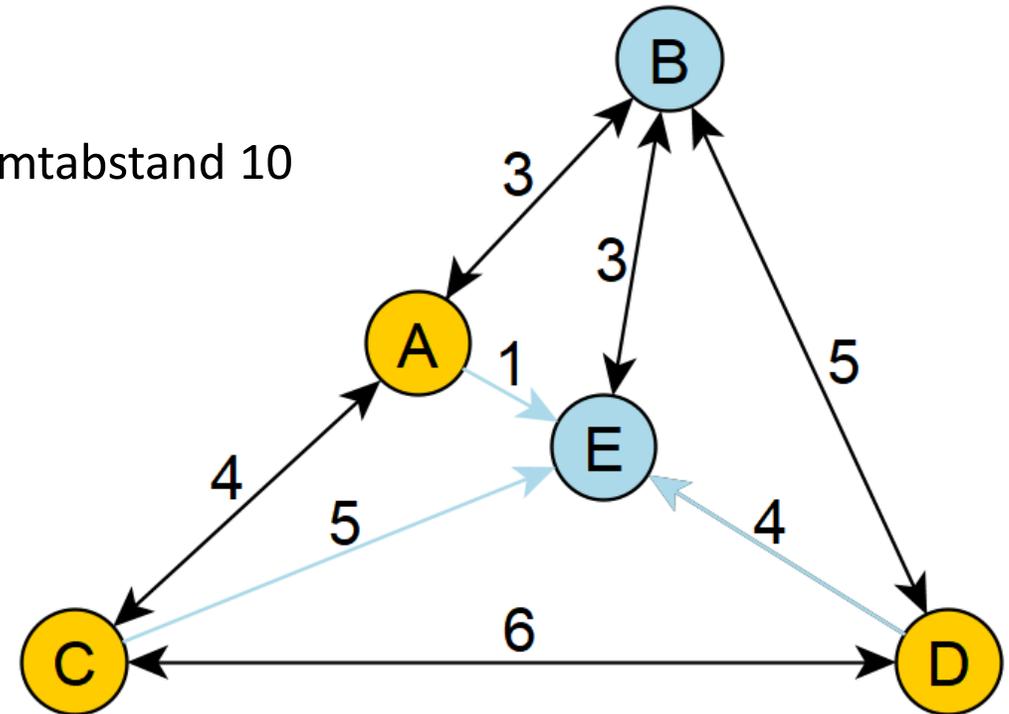
- Wähle p Ladestandorte aus einer Menge von n Bedarfspunkten aus, so dass der Gesamtabstand von n zu p minimal ist



Methodik | Genetischer p -Median Algorithmus

P-Median-Problem

- Wähle p Ladestandorte aus einer Menge von n Bedarfspunkten aus, so dass der Gesamtabstand von n zu p minimal ist
- Beispiel $p = 2$
- Zufällig B und E als Ladestandorte ausgewählt: Gesamtabstand 10
- NP-schwer \rightarrow Optimierungsalgorithmus



Methodik | Genetischer p -Median Algorithmus

- Fitnessfunktion

Methodik | Genetischer p -Median Algorithmus

- Fitnessfunktion
- **Population**
 - Menge gültiger Lösungen

Population

POIs	A	B	C	D	E	Fitnesswert
Chromosom_1	0	0	0	1	1	9
Chromosom_2	1	1	0	0	0	10
Chromosom_3	0	1	1	0	0	11
Chromosom_4	0	1	0	1	0	12

Methodik | Genetischer p -Median Algorithmus

- Fitnessfunktion
- Population
 - Menge gültiger Lösungen

POIs	Population					Fitnesswert
	A	B	C	D	E	
Chromosom_1	0	0	0	1	1	9
Chromosom_2	1	1	0	0	0	10
Chromosom_3	0	1	1	0	0	11
Chromosom_4	0	1	0	1	0	12

Iteration

- **Selektion (Binary Tournament)**

Funktion	Selektion	Auswahl
Kind_Vater	Chromosom_1 & Chromosom_3	Chromosom_1
Kind_Mutter	Chromosom_3 & Chromosom_4	Chromosom_3

Methodik | Genetischer p -Median Algorithmus

- Fitnessfunktion
- Population
 - Menge gültiger Lösungen

Iteration

- Selektion (Binary Tournament)
- **Crossover (Fusion Operator)**

POIs	A	B	C	D	E	Fitnesswert
Chromosom_1	0	0	0	1	1	9
Chromosom_3	0	1	1	0	0	11
Kind	0	1	0	1	1	

Methodik | Genetischer p -Median Algorithmus

- Fitnessfunktion
- Population
 - Menge gültiger Lösungen

Crossover

POIs	A	B	C	D	E	Fitnesswert
Chromosom_1	0	0	0	1	1	9
Chromosom_3	0	1	1	0	0	11
Kind_1	0	1	0	1	1	

Iteration

- Selektion (Binary Tournament)
- Crossover (Fusion Operator)
- **Mutation**

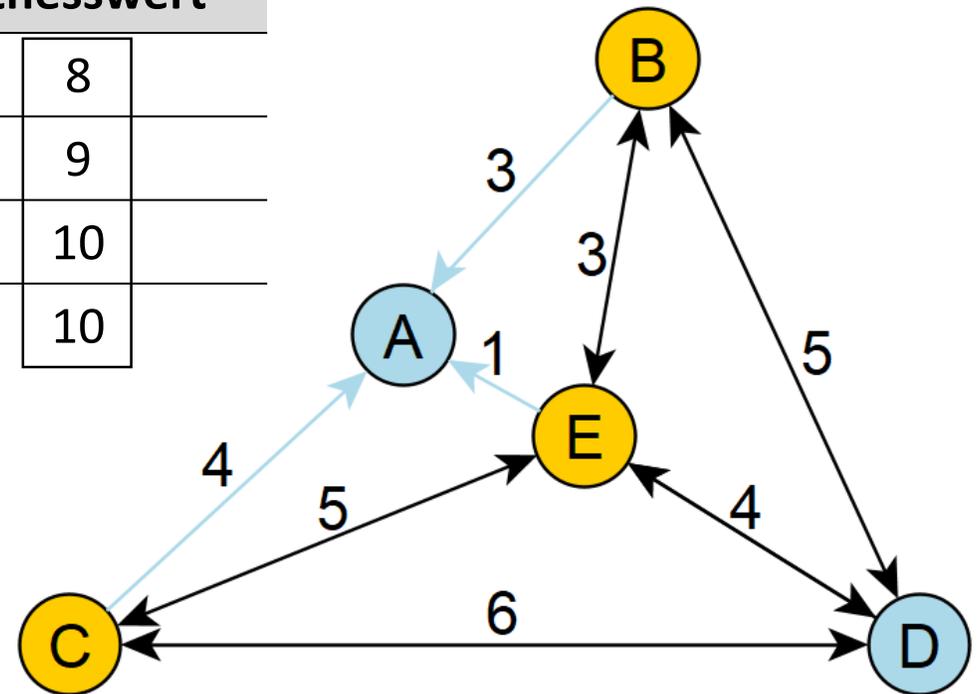
POIs	A	B	C	D	E	Fitnesswert
Kind	0	1	0	0	1	

Methodik | Genetischer p -Median Algorithmus

- Mögliches Ergebnis

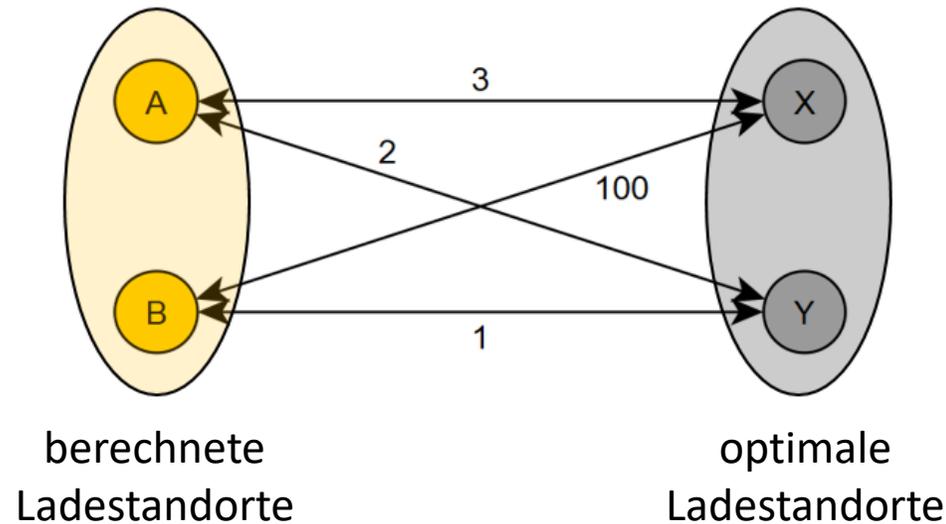
Population						
POIs	A	B	C	D	E	Fitnesswert
Kind_2	1	0	0	1	0	8
Chromosom_2	0	0	0	1	1	9
Chromosom_3	1	1	0	0	0	10
Kind_1	0	1	0	0	1	10

Population						
POIs	A	B	C	D	E	Fitnesswert
Chromosom_1	0	0	0	1	1	9
Chromosom_2	1	1	0	0	0	10
Chromosom_3	0	1	1	0	0	11
Chromosom_4	0	1	0	1	0	12



Methodik | Evaluation

- Berechnung der Differenz zur optimalen Lösung
- Zuordnung der berechneten und der optimierten Ladestandorte zueinander

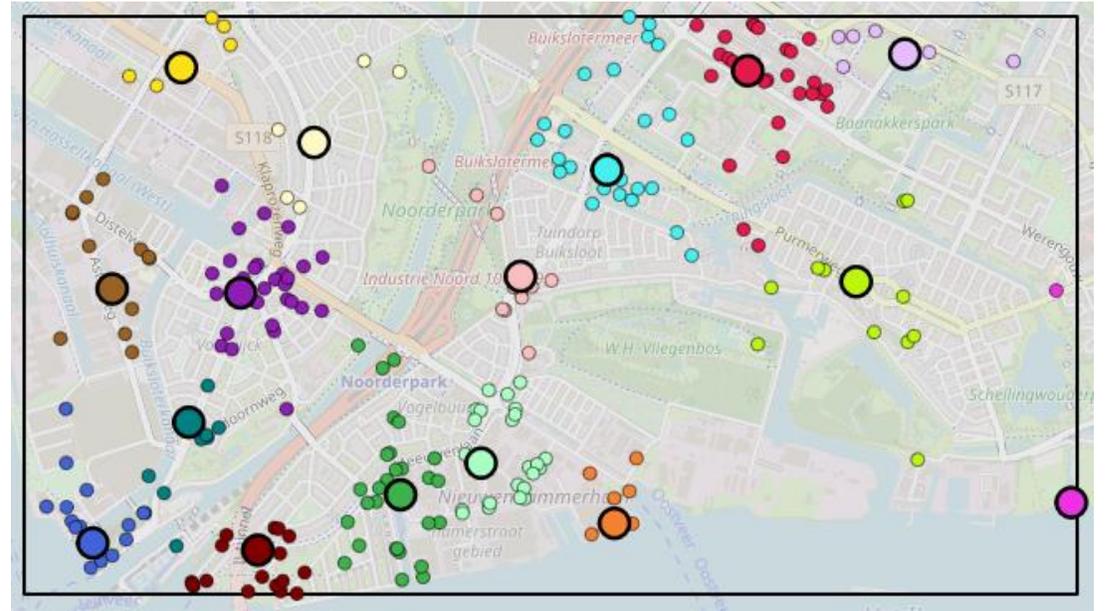
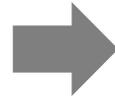


- Zuordnung entspricht perfektem Matching mit minimalen Kosten → Ungarische Methode
- **Gesamtdistanz, mittlere Distanz pro Ladestandort, Minimal- und Maximaldistanz**

3. Ergebnisse

Ergebnisse | Darstellung mittels Leaflet

```
{
  "features": [
    {
      "geometry": {
        "coordinates": [
          4.9370058,
          52.3980823
        ],
        "type": "Point"
      },
      "properties": {
        "charging_station": 1,
        "clusternumber": 0,
        "osm_id": "2848300976",
        "osm_keyword": "fast_food"
      },
      "type": "Feature"
    },
  ],
  "type": "FeatureCollection"
}
```



[Demo Webseite](#)

Ergebnisse | Evaluation Beispiel Nord-Amsterdam

Parameter	<i>k</i> -Means	Knoten- zentralität*	<i>p</i> -Median	Zufällige Lösung
Gesamtdistanz				
Mittlere Distanz pro Ladestandort				
Minimale Distanz				
Maximale Distanz				
Fitnesswert				

Ergebnisse | Evaluation Beispiel Nord-Amsterdam

Parameter	<i>k</i> -Means	Knoten-zentralität*	<i>p</i> -Median	Zufällige Lösung
Gesamtdistanz	11702	20444	13216	23547
Mittlere Distanz pro Ladestandort	731	1278	826	1472
Minimale Distanz	101	19	43	43
Maximale Distanz	5066	4928	4924	5000
Fitnesswert	81391	99194	79452	126216

***100 m Mindestabstand**

Ergebnisse | Evaluation Beispiel Nord-Amsterdam

Parameter	<i>k</i> -Means	Knoten-zentralität*	<i>p</i> -Median	Zufällige Lösung
Gesamtdistanz	11702	14174	13216	23547
Mittlere Distanz pro Ladestandort	731	886	826	1472
Minimale Distanz	101	19	43	43
Maximale Distanz	5066	4928	4924	5000
Fitnesswert	81391	90259	79452	126216

*500 m Mindestabstand

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

Quellen | (Abbildungen und Tabellen)

- [1] EIGENE DARSTELLUNG
- [2] EIGENE DARSTELLUNG nach: WAGNER, S., GÖTZINGER, M., and NEUMANN, D. (2013): Optimal Locations of Charging Stations in Smart Cities. A Point of Interest Based Approach. Completed Research Paper. Thirty Fourth International Conference on Information Systems. Seite 13.
- [3] EIGENE DARSTELLUNG nach: CHEN, T. D., KOCKELMAN, K. M., and KHAN, M. (2013). Locating Electric Vehicle Charging Stations. Parking-Based Assignment Method for Seattle, Washington. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board., 1(2385):28–36. Seite 35.
- [4-8] EIGENE DARSTELLUNG
- [9-13] EIGENE DARSTELLUNG nach: JARAMILLO, J. H., BHADURY, J., and BATTÀ, R. (2002). On the Use of Genetic Algorithms to Solve Location Problems. Computers and Operations Research - Location analysis, 29(6):761–779. Seite 762.
- [14] EIGENE DARSTELLUNG
- [15] EIGENE DARSTELLUNG nach: KUHN, F. (2013). Optimierung. Vorlesung 9. Lineare Programmierung und Kombinatorische Optimierung. Vorlesungsfolien. URL: http://ac.informatik.uni-freiburg.de/teaching/ss_13/opti/Slides/pdf/Optimierung09.pdf. Letzter Abruf am 21.08.2019. Folie 2.
- [16-19] EIGENE DARSTELLUNG

Backup

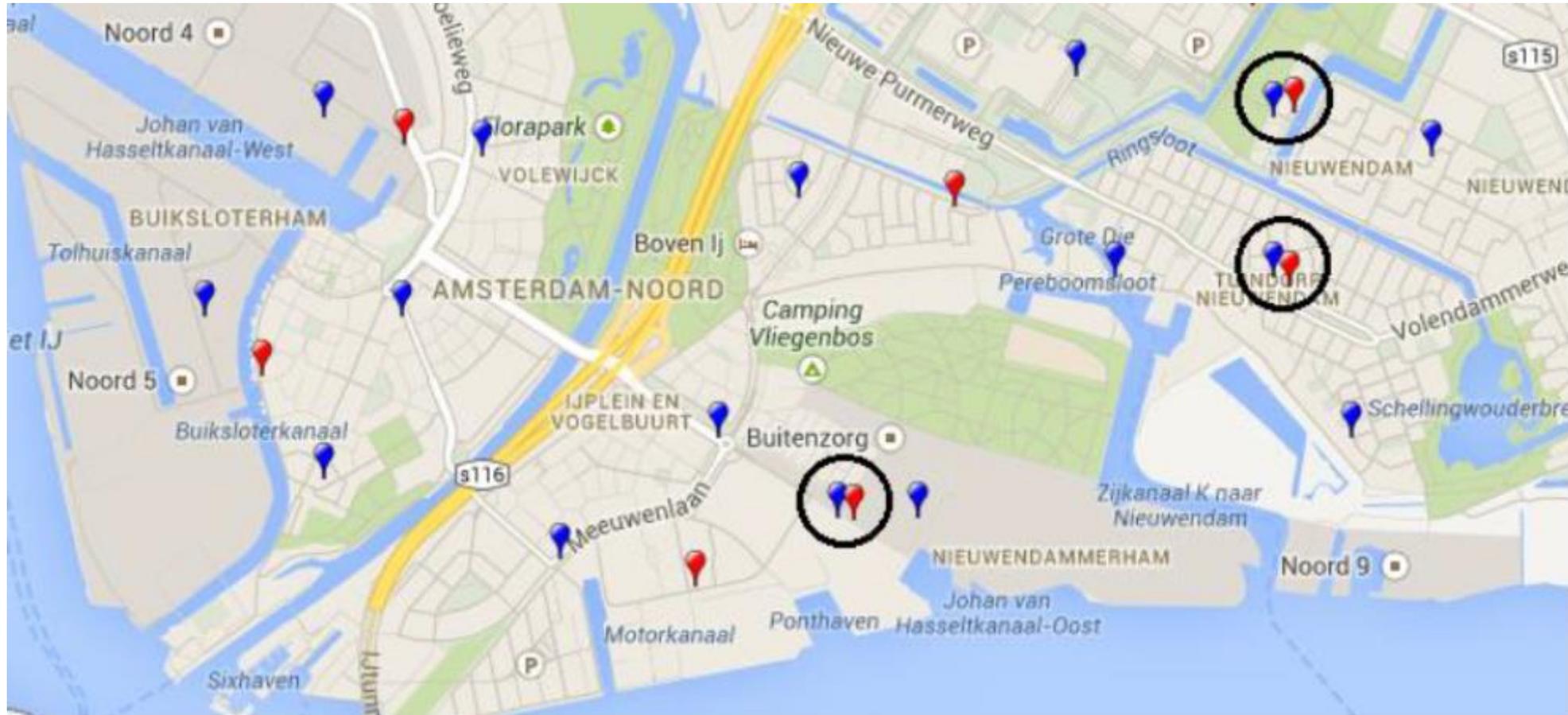
Backup | Vergleich der Laufzeiten

Algorithmen	Davutpaşa-Campus	Nord-Amsterdam	Nord-Seattle
k -Means	8 s	14 s	37 s
Knotenzentralitätswerte (ohne Distanzmatrix)	2 s	42 s	6 min
p -Median (ohne Distanzmatrix)	32 s	21 min	2 h 25 min
Distanzmatrix	1 min	22 min	3 h 11 min
Anzahl POIs	68	257	552

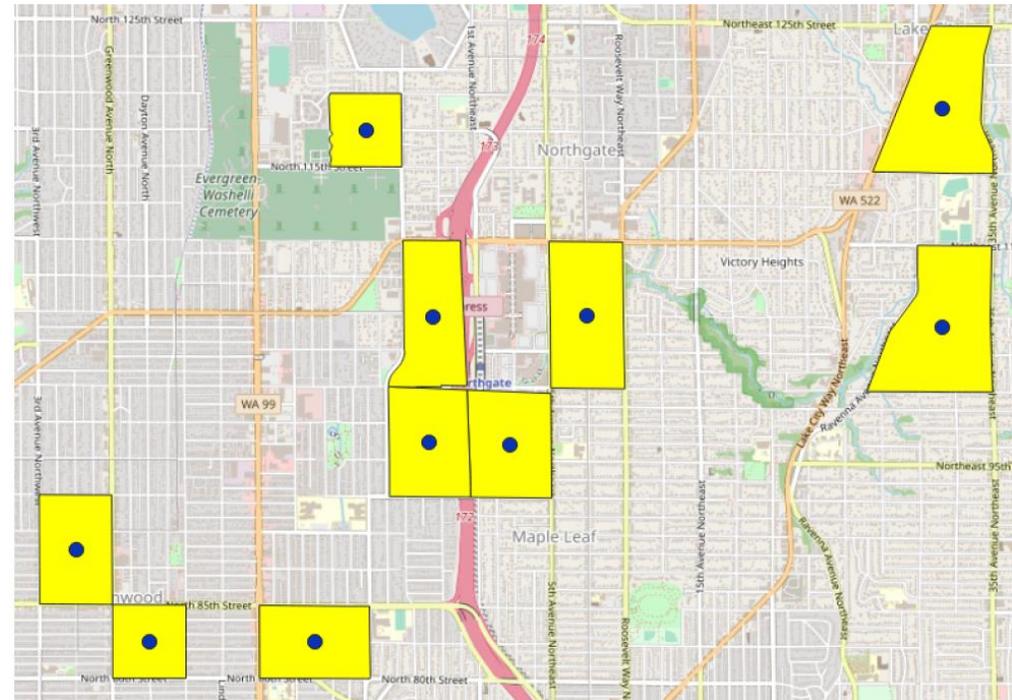
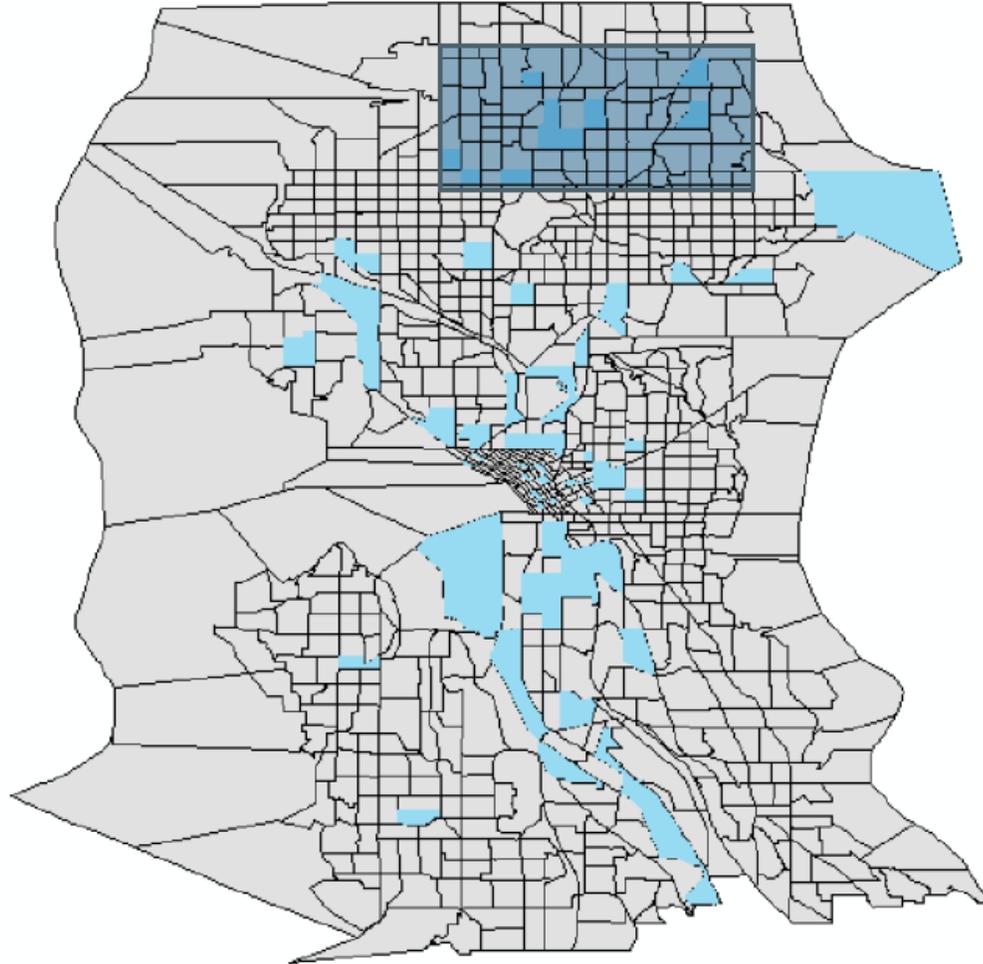
Backup | XML-Datenstruktur aus OpenStreetMap

```
<osm>
  <bounds minlat="52.000" minlon="4.000" maxlat="52.2000" maxlon="4.7000"/>
  <node id="1" lat="52.0258" lon="4.5076">
    <tag k="amenity" v="parking"/>
  </node>
  <node id="2" lat="52.0826" lon="4.6858">
    <tag k="leisure" v="fitness_centre"/>
  </node>
  <way id="3">
    <nd ref="1"/>
    <nd ref="2"/>
    <tag k="amenity" v="parking"/>
  </way>
  <relation id="4">
  </relation>
</osm>
```

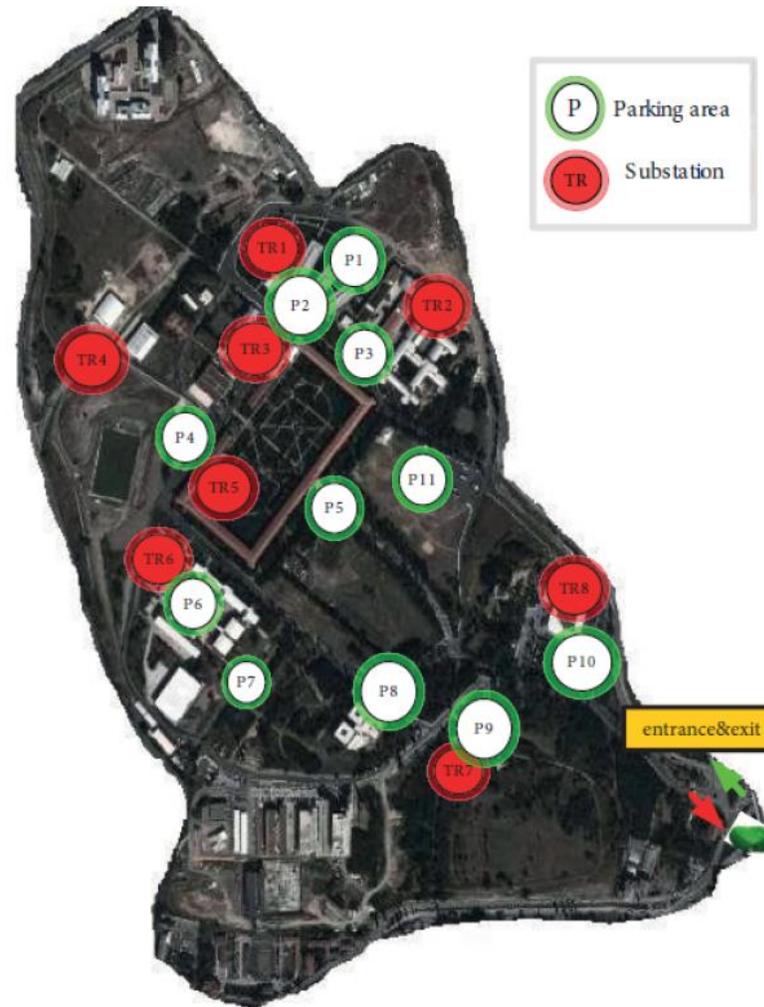
Backup | Optimale Lösung Nord-Amsterdam



Backup | Optimale Lösung Nord-Seattle

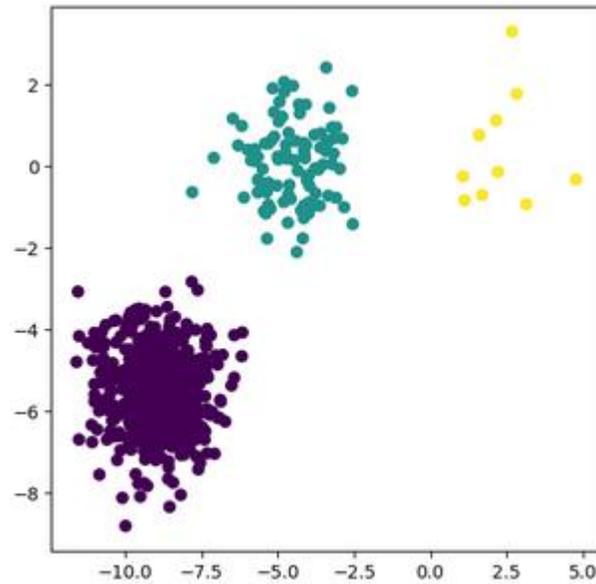


Backup | Optimale Lösung Davutpaşa

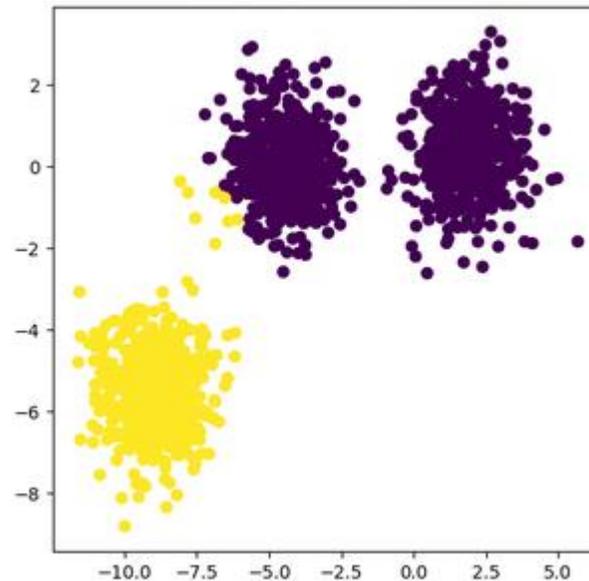


Backup | k -Means-Algorithmus

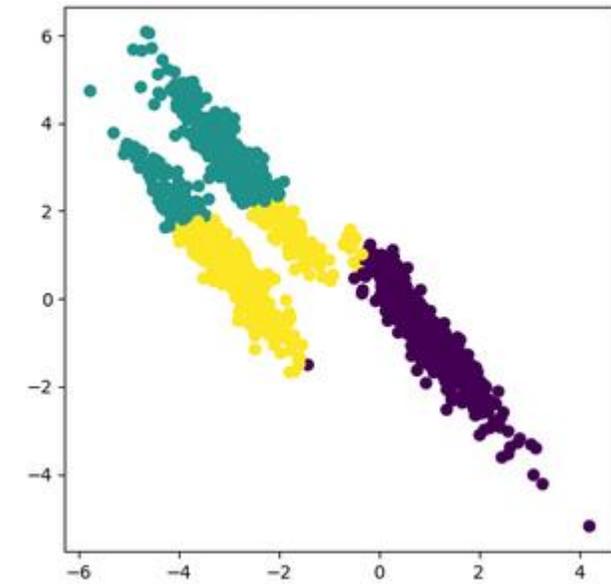
Beispiele



Erwünschtes Ergebnis



Anzahl an Clustern
falsch gewählt



Keine ballförmige
Struktur der Daten

Backup | k -Means-Algorithmus

- Minimierung der Residuenquadratsumme

$$\sum_{i=0}^n \min_{\mu_j \in C} (\|x_i - \mu_j\|^2)$$

- Euklidischer Abstand zwischen zwei Punkten

$$d(x, \mu) = \sum_{i=1}^2 (x_i - \mu_i)^2 = \|x - \mu\|^2$$

Backup | k -Means-Algorithmus

- Pseudocode (Scikit-learn)

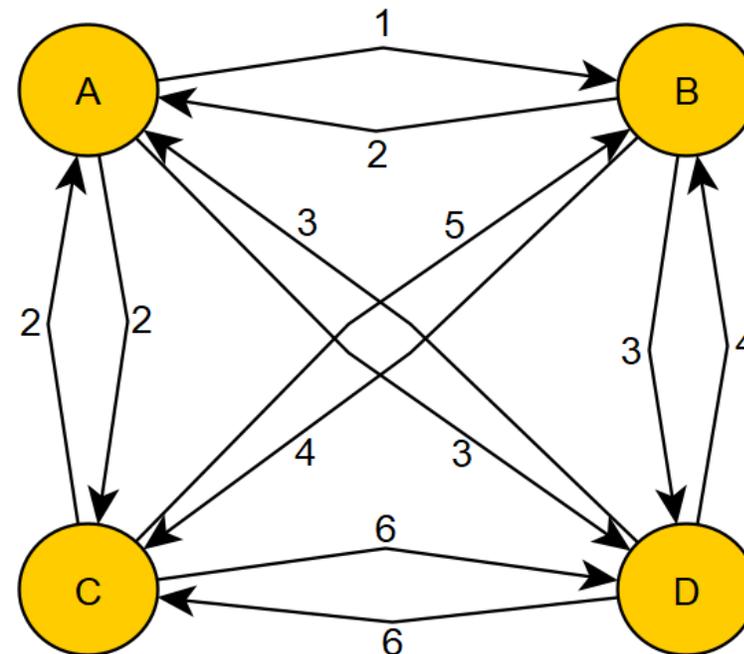
```
Data:  $k$ , Liste an POI-Koordinaten  
Result: Clustereinteilung, Zentroide  
Initialisierung: Wähle zufällig  $k$  Zentroide aus  
repeat  
  | for jeden POI do  
  |   | finde den nächstgelegenen Zentroid und weise den POI dem Cluster dieses  
  |   | Zentroids zu.  
  | end  
  | Berechne für die  $k$ -Cluster neue Zentroide, indem jeweils die  
  | Durchschnittskordinaten der clusterzugehörigen Elemente berechnet werden.  
until Terminierungskriterium ist erfüllt;
```

- Demo: <http://www.onmyphd.com/?p=k-means.clustering>
- $O(nki)$

Backup | Knotenzentralitätsalgorithmus

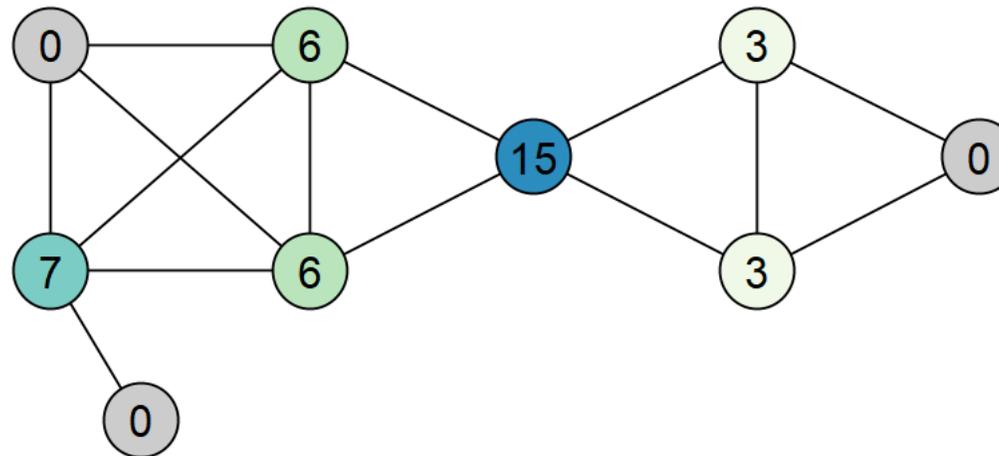
- Nutzung der realen Distanzen zwischen den POIs
- OSMnx Routing zur Erstellung der Distanzmatrix
- $O(n^2)$
- Erstellung eines Graphen

$$\begin{array}{c} A \\ B \\ C \\ D \end{array} \begin{array}{cc} A & B & C & D \\ \left(\begin{array}{cccc} 0 & 1 & 2 & 3 \\ 2 & \dots & 4 & 3 \\ 2 & 5 & \dots & 6 \\ 3 & 4 & 6 & 0 \end{array} \right) \end{array}$$



Backup | Knotenzentralitätsalgorithmus

- Berechnung der Knotenzentralitätswerte aus dem Graphen (betweenness centrality)
- Je mehr kürzeste Wege durch einen Knoten verlaufen, desto höher sein Zentralitätswert



- Die k POIs mit den höchsten Zentralitätswerten werden als Ladestandorte ausgewählt
- Keine gute natürliche Verteilung der Ladestandorte
- Eingabe eines Mindestabstands zwischen den Ladestandorten ermöglicht

Backup | Knotenzentralitätsalgorithmus

- Vollständiger, gerichteter Graph: $n^2 - n$ Kanten (OSMnx-Routing)
- Nord-Seattle: 552 POIs = 552 Knoten, 304.152 Kanten
- Knotenzentralitätswert (Intermediationszentralität) $c_B(v)$:

$$c_B(v) = \sum_{s,t \in V} \frac{\sigma(s, t|v)}{\sigma(s, t)}$$

- v : Knoten aus der Menge aller Knoten V
- $\sigma(s, t)$: Gesamtanzahl der kürzesten (s, t) -Wege
- $\sigma(s, t|v)$: Anzahl der kürzesten (s, t) -Wege, die durch v führen
- Kürzeste Wege: Algorithmus von Dijkstra (Networkx)

Backup | Genetischer p-Median Algorithmus

- P-Median-Problem

$$\min \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n d_{ij} x_{ij}$$

- Nebenbedingungen

$$x_{ij} \leq X_{ij} \quad \forall i, j$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = p \quad \forall i$$

- $n^2 + n + 1$ Nebenbedingungen, $\binom{n}{p}$ Möglichkeiten (np-schwer)
- Eigene Implementation

Backup | Genetischer p-Median Algorithmus

Fusion-Operator (das Kind bekommt mit höherer Wahrscheinlichkeit den Wert des Elternteils mit der höheren Fitness)

$$C[i] := P_1[i] \text{ mit Wahrscheinlichkeit } p = \frac{f_{P_2}}{f_{P_1} + f_{P_2}}$$

$$C[i] := P_2[i] \text{ mit Wahrscheinlichkeit } 1 - p$$

- Populationsgröße: zwischen n und $2n$
- Mutationswahrscheinlichkeit: 5 bis 10 Prozent
- Anzahl der Iterationen (Generationen): hier 50

Backup | Evaluation

- Ungarische Methode (Zuweisungsproblem)

$$\min \sum_i \sum_j C_{ij} X_{ij} \quad \text{so dass,}$$

$$\sum_i X_{ij} = 1, \quad \forall j$$

$$\sum_j X_{ij} = 1, \quad \forall i$$

- $n!$ mögliche Zuordnungen für $2n$ Standorte
- Algorithmus von James Munkres, Linear-Sum-Assignment-Tool, Scipy-Bibliothek

Backup | Vergleich Untersuchungsgebiete

Parameter	Nord-Amsterdam	Nord-Seattle	Davutpaşa-Campus
Größe der OSM-Bounding Box in km ²	7,5	20,4	3,0
Größe des berücksichtigten Gebietes in km ²	7,5	20,4	1,1
Straßenführung	organisch gemischt	schachbrett-artig	organisch
Vorkommen natürlicher Cluster	ja	ja	ja
Anzahl der berücksichtigten POIs im Gebiet	257	552	68
Anzahl optimaler Ladestandorte	16	10	8

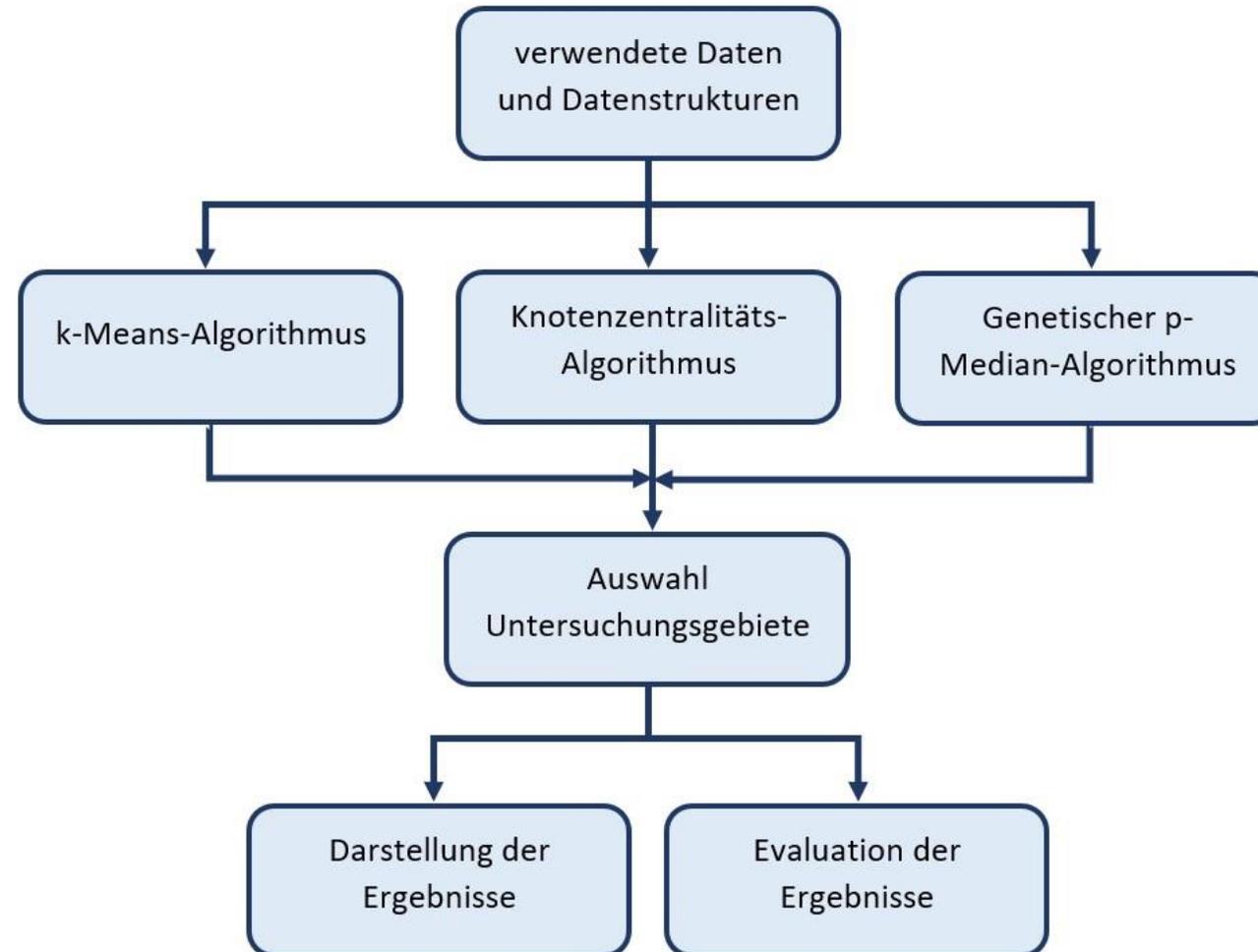
Backup | Evaluation Nord-Seattle

Parameter	<i>k</i> -Means	Knoten-zentralität*	<i>p</i> -Median	Zufällige Lösung
Gesamtdistanz	11344	11236	10522	14641
Mittlere Distanz pro Ladestandort	1134	1124	1052	1464
Minimale Distanz	52	362	121	547
Maximale Distanz	6874	7205	6792	7205
Fitnesswert	310366	440464	321937	554012

Backup | Evaluation Davutpaşa

Parameter	<i>k</i> -Means	Knoten-zentralität*	<i>p</i> -Median	Zufällige Lösung
Gesamtdistanz	2761	3116	5637	8694
Mittlere Distanz pro Ladestandort	345	390	705	1087
Minimale Distanz	0	0	0	0
Maximale Distanz	2838	2147	3892	4005
Fitnesswert	24604	27416	11741	36291

Backup | Überblick Vorgehensweise



Quellen des Backups | (Abbildungen und Tabellen)

- [20-21] EIGENE DARSTELLUNG
- [22] WAGNER, S., GÖTZINGER, M., and NEUMANN, D. (2013): Optimal Locations of Charging Stations in Smart Cities. A Point of Interest Based Approach. Completed Research Paper. Thirty Fourth International Conference on Information Systems. Seite 13.
- [23] CHEN, T. D., KOCKELMAN, K. M., and KHAN, M. (2013). Locating Electric Vehicle Charging Stations. Parking-Based Assignment Method for Seattle, Washington. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board., 1(2385):28–36. Seite 35.
- [24] EIGENE DARSTELLUNG nach [23].
- [25] YAGCITEKIN, B., UZUNOGLU, M., and KARAKAS, A. (2016). A new deployment method for electric vehicle charging infrastructure. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 24:1292–1305.
- [26] SCIKIT-LEARN DEVELOPERS (HRSG.) (2019): Scikit-learn user Guide. Clustering. K-Means. Release 0.21.2. S. 355.
- [27] JIN, X. and HAN, J. (2010). K-Means Clustering. In Encyclopedia of Machine Learning, pages 695–697. S. 695.
- [28-29] EIGENE DARSTELLUNG
- [30] EIGENE DARSTELLUNG nach: MCLAUGHLIN, A., BADER, D. A. (2018). Accelerating GPU betweenness centrality. Communications of the ACM. 8(61):85-92. Seite 86.
- [31-34] EIGENE DARSTELLUNG