



EnInnov2024

Modellierung der Verkehrsnachfrage zur Entwicklung von energieeffizienten Mobilitätsangeboten

15.02.2024 – TU Graz

Marius Madsen, M.Eng. | Lukas Spengler, M.Sc. | Prof. Dr.-Ing. Marc Gennat

Hochschule Niederrhein – SWK E² Institut für Energietechnik und Energiemanagement

Motivation

Datensätze für die Modellierung



Mobilfunkzellenauswertungen



Verkehrsstärkemessungen



Floating Car Data



Tracking mit Apps



Detaillierte Mobilitätsbefragungen



Verkehrsnachfragemodellierung

Einteilung Verkehrszellen

Zerlegen des Gebiets in homogene Zellen



Verkehrserzeugung

Verkehrsmenge in Quell- oder Ziel-Zelle erzeugen



Verkehrsverteilung

Verknüpfung der Zellen als Quelle-Ziel-Matrix



Verkehrsaufteilung

Verkehrsmittelwahl



Verkehrsumlegung

Genutzte Wege

Probleme und Nachteile



Kostenintensiv



Zeitaufwändig



Wiederholung in jedem Betrachtungsgebiet



Nutzung personenbezogener Daten



Isolierte Betrachtung von Individualverkehr

Ausgangslage: Offene Datenquellen (1/2)



OpenStreetMap (OSM)

© openstreetmap.de

Weltkarte auf Basis frei verfügbarer Daten,
aufgebaut durch die Community



© opendata.greatersudbury.ca

General Transit Feed Specification (GTFS)

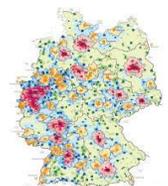
Digitales Austauschformat
für Fahrpläne des ÖV



Mobilität in Deutschland (MiD)

© mobilitaet-in-deutschland.de

Studie zum Mobilitätsverhalten in Deutschland



© bmdv.bund.de

Regionalstatistische Raumtypologie (RegioStaR)

Siedlungsstrukturelle Raumtypisierung



© zensus2022.de

Zensus
Bevölkerungserhebung mit
soziodemografischen Daten



© ows.geo.hu-berlin.de

EOLab Data

KI-Abschätzung von Gebäudehöhen



Mobilität in Städten [SrV13]

Studie zum stadtübergreifenden
Mobilitätsverhalten

Ausgangslage: Offene Datenquellen (2/2)



Spezifische Verkehrserzeugung
(Wege pro Nettonutzfläche)

u.a. [Bossert07]

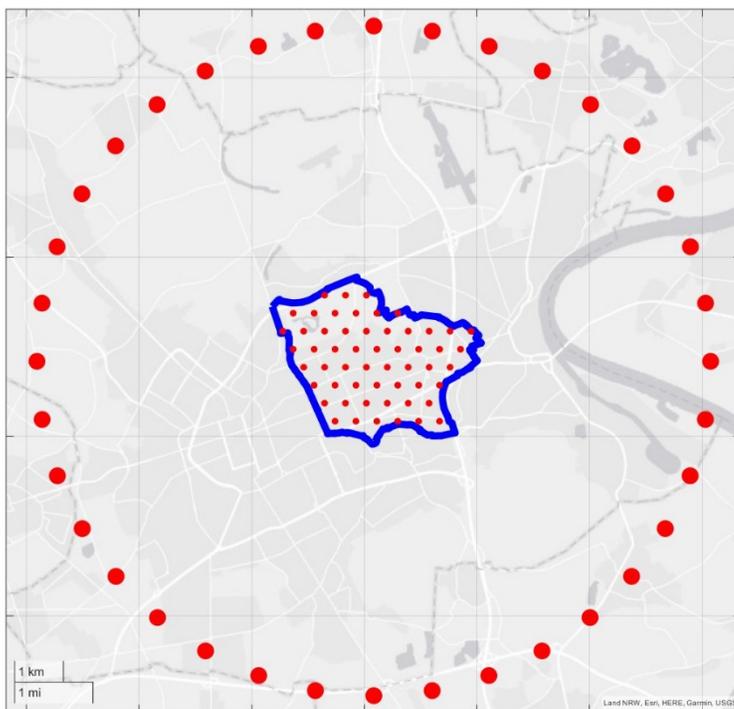
OpenStreetMap key	Gesamtwege pro m ² und Tag <u>min</u>	Gesamtwege pro m ² und Tag <u>mittel</u>	Gesamtwege pro m ² und Tag <u>max</u>
farm_auxiliary	0,012	0,018	0,022
shed	0,012	0,018	0,022
commercial	1,059	1,548	1,979
industrial	0,016	0,039	0,069
greenhouse	0,228	0,456	0,683
hut	0,012	0,018	0,022
school	0,114	0,167	0,214
service	0,727	1,063	1,359
conservatory	0,532	0,780	0,995
storage_tank	0,012	0,018	0,022
retail	1,200	1,970	2,030
civic	0,039	0,071	0,103
stable	0,012	0,018	0,022
office	0,065	0,096	0,122
allotment_house	0,012	0,018	0,022
warehouse	0,012	0,018	0,022
church	0,034	0,050	0,064
riding_hall	0,012	0,018	0,022
dormitory	0,043	0,063	0,081

Beispiel-
Auszug

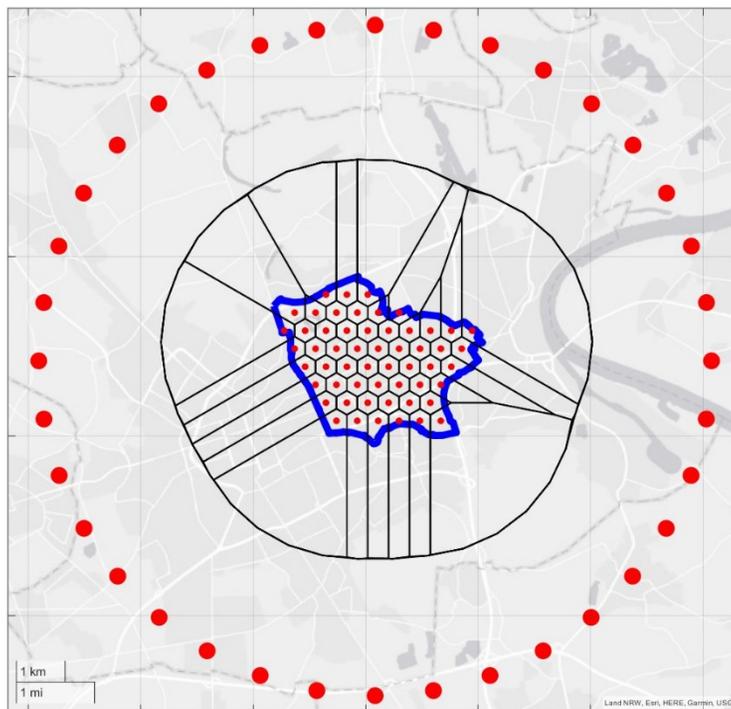
Verkehrserzeugung

Einteilung in Verkehrszellen

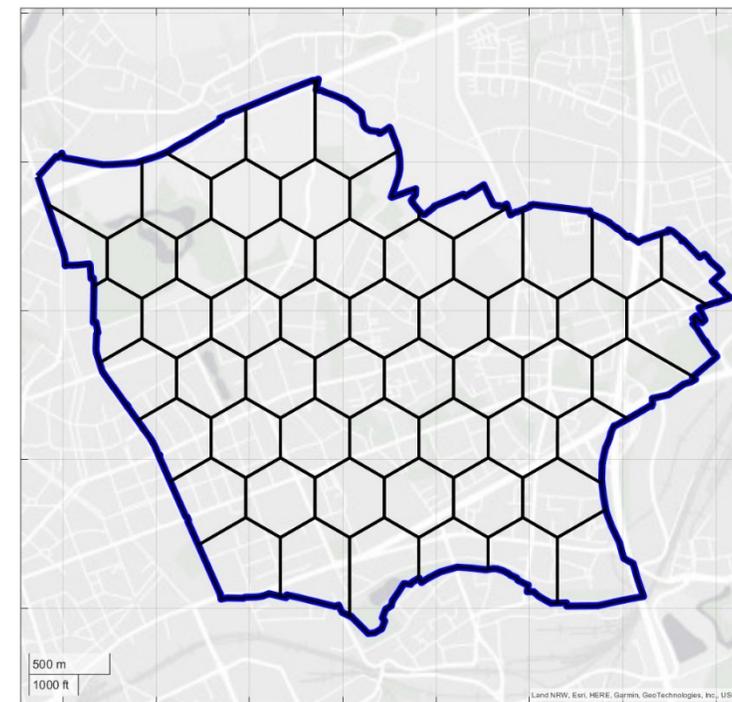
Gleichmäßige
Referenzpunktverteilung & Setzen
von 36 Begrenzungspunkten



Dirichlet-Zerlegung des Raumes in
Voronoi-Zellen



Zuschneiden mit Stadtteilgrenze



Verkehrserzeugung

Einteilung in Verkehrszellen

Angepasster Lloyd-Algorithmus zur Geometrieverbesserung

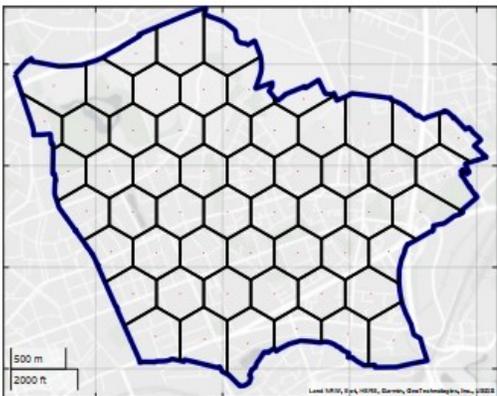


Abbildung 4.11 Lloyd, Iteration: 1

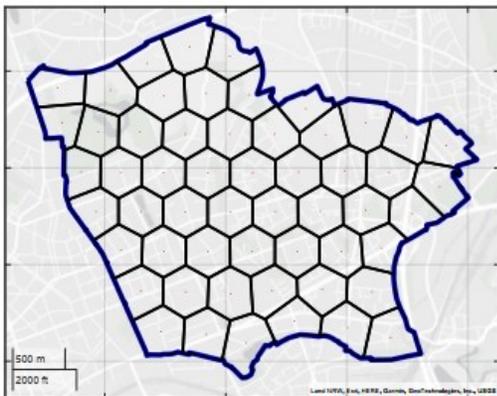


Abbildung 4.12 Lloyd, Iteration: 5

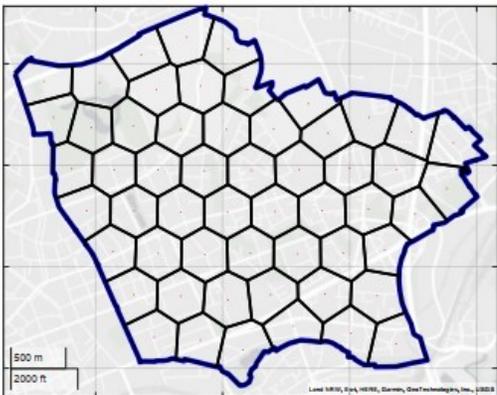


Abbildung 4.13 Lloyd, Iteration: 10

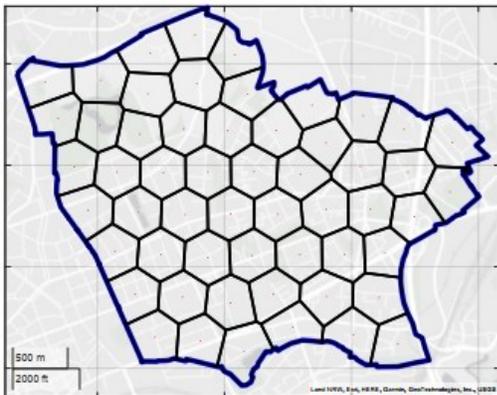
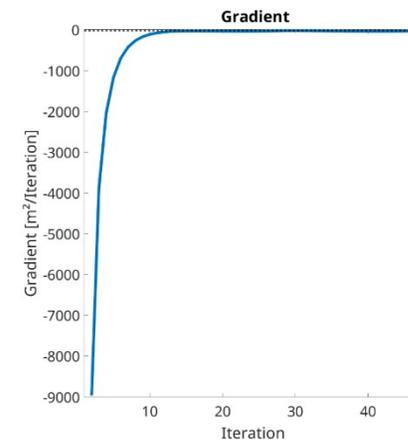
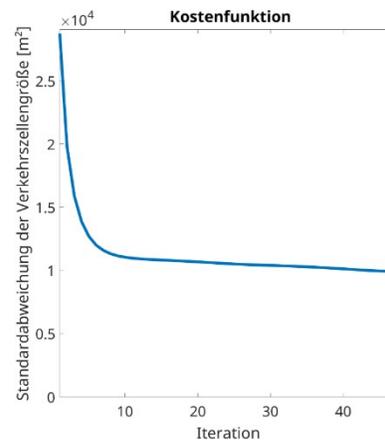


Abbildung 4.14 Lloyd, Iteration: 48

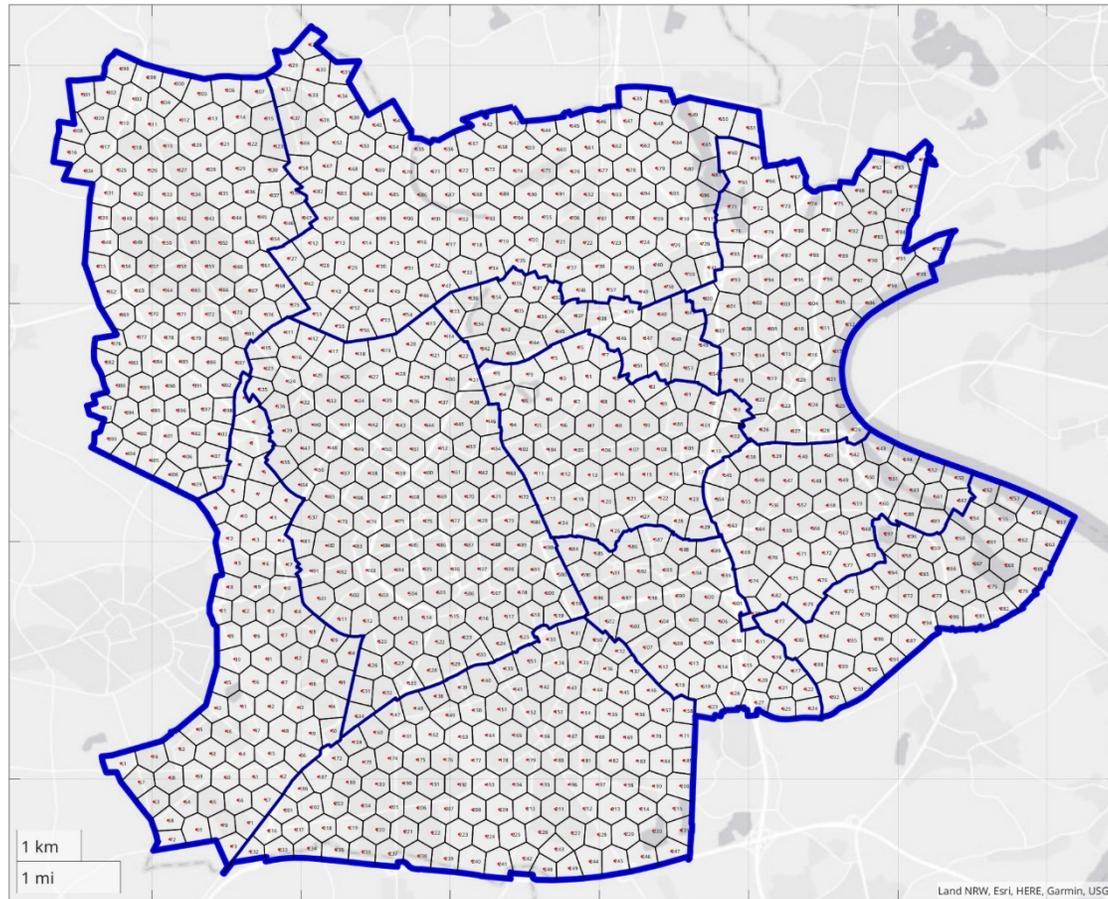
- Lloyd-Algorithmus:**
- Algorithmus strebt eine Minimierung des maximalen und mittleren Anmarschwegs an
- Nebenbedingungen:**
- Jede Zelle muss aus einem zusammenhängenden Bereich bestehen
 - Limitierung durch Stadtteilgrenze



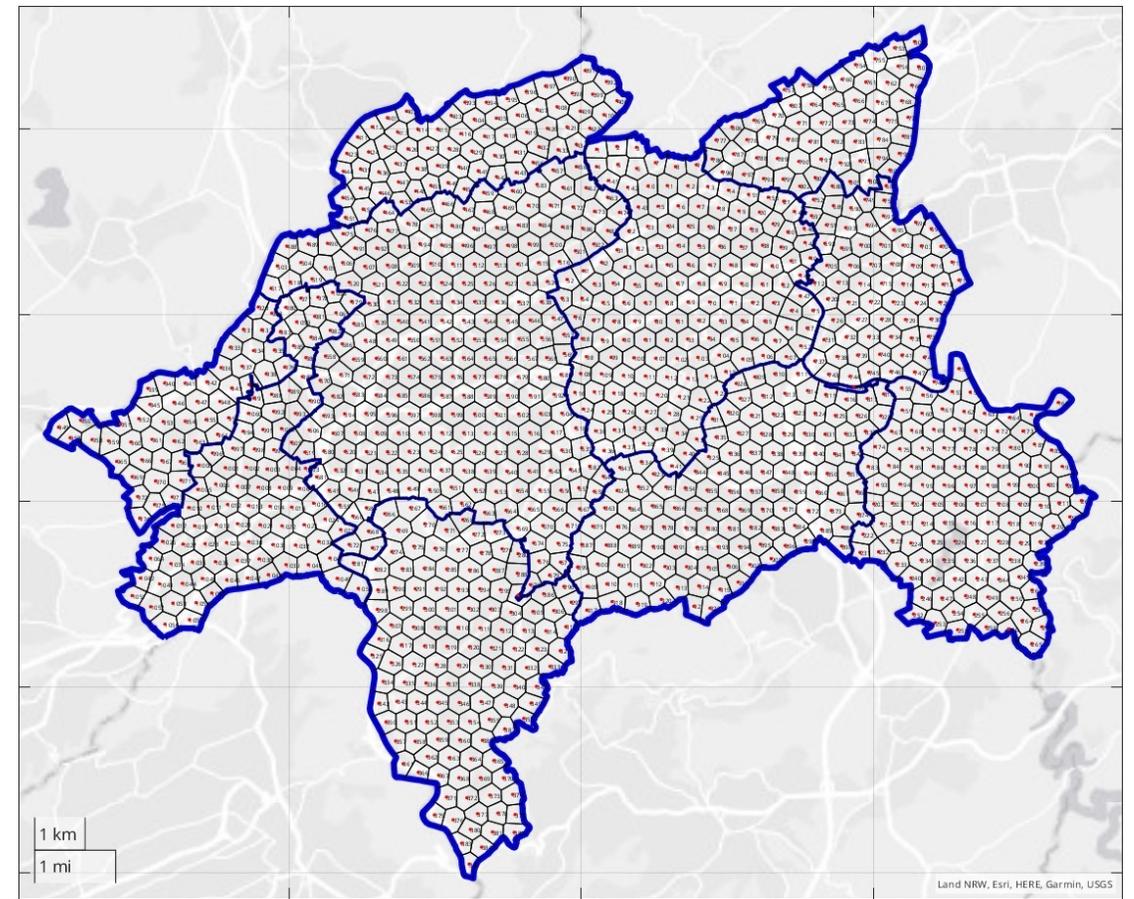
Verkehrserzeugung

Einteilung in Verkehrszellen

Krefeld



Wuppertal

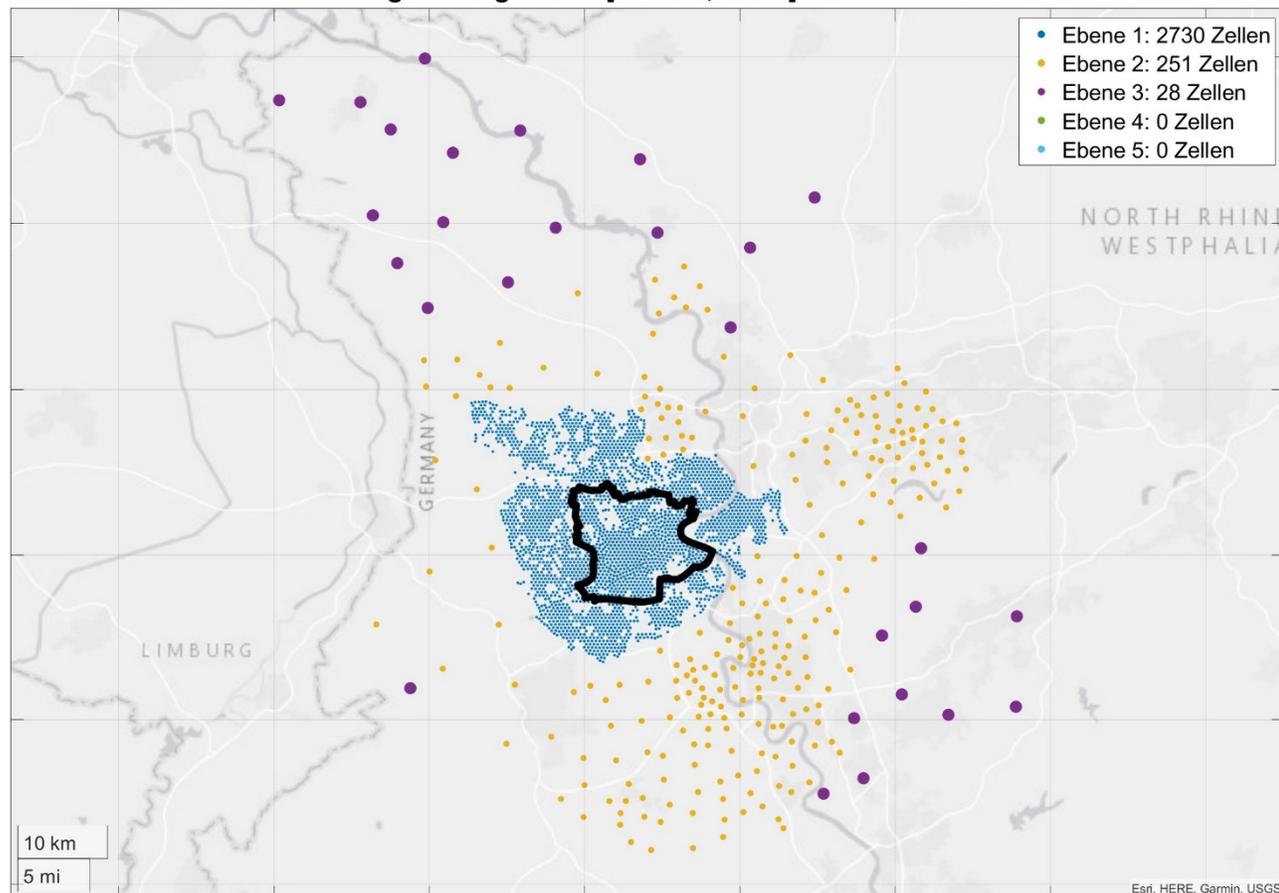


Verkehrserzeugung

Einteilung in Verkehrszellen

Bsp Reg-Bez. Düsseldorf

Aufteilung der Region um [Krefeld, Stadt] in Verkehrszellen



Überregionale Betrachtung von Krefeld

Aggregation entfernter Verkehrszellen zur Reduzierung des Rechenaufwands

- Ebene 1: 160.000m²-Zellen
- Ebene 2: Stadtteile
- Ebene 3: Städte
- Ebene 4: Kreise
- Ebene 5: Regierungsbezirke

Anzahl Relationen für Krefeld

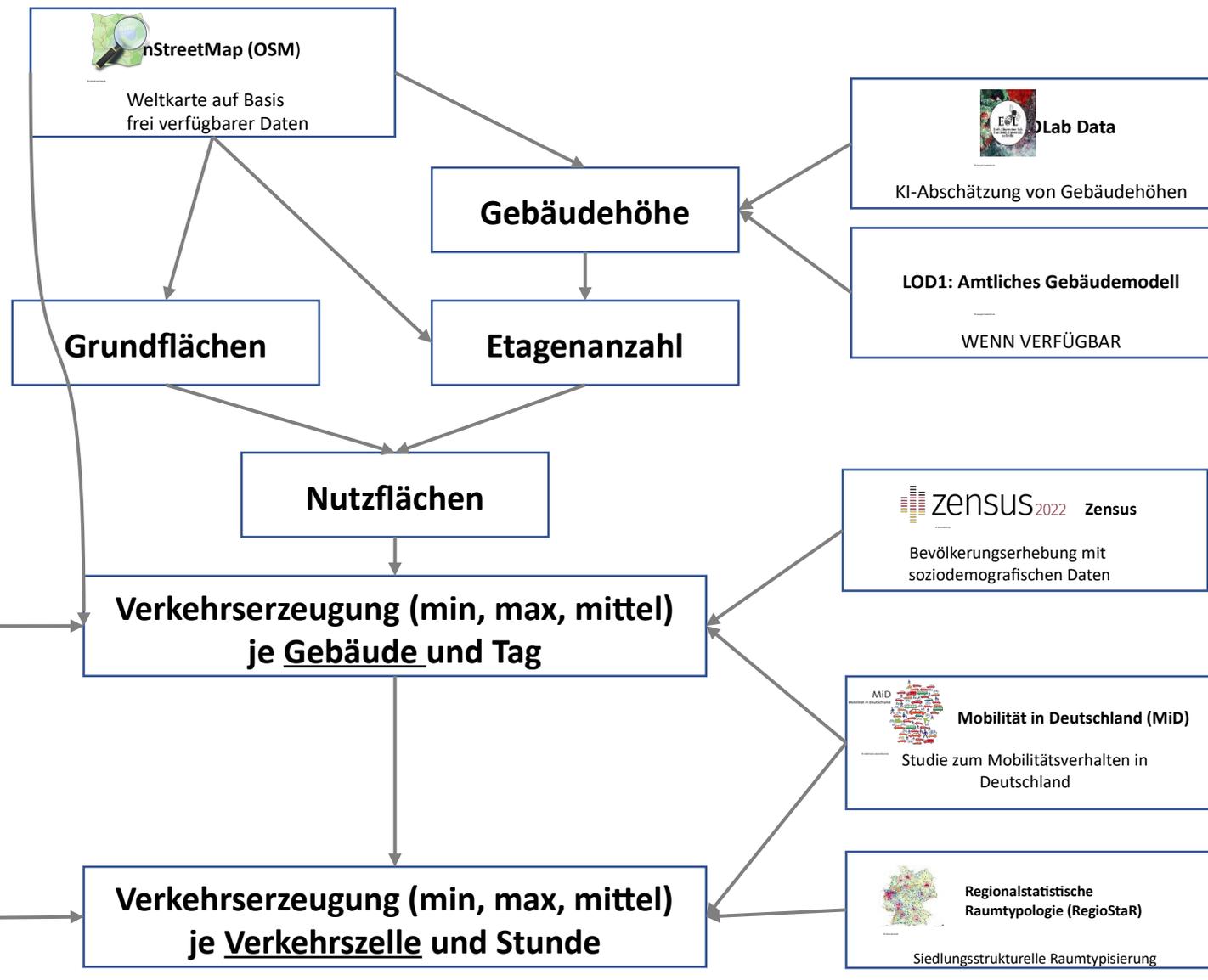
- Etwa **3200** Verkehrszellen
 - Stündliche Auflösung (**24** Stunden)
 - **6** Wegezwecke
Arbeit | Bildung | Einkauf | Besorgung | Freizeit | Wohnen
 - **4** Verkehrsmodi (MIV, ÖPNV, Fuß, Fahrrad)
- $3200^2 \cdot 24 \cdot 6 \cdot 4 = 5,9 \cdot 10^9$ **Relationen**

Verkehrserzeugung

Datenfluss

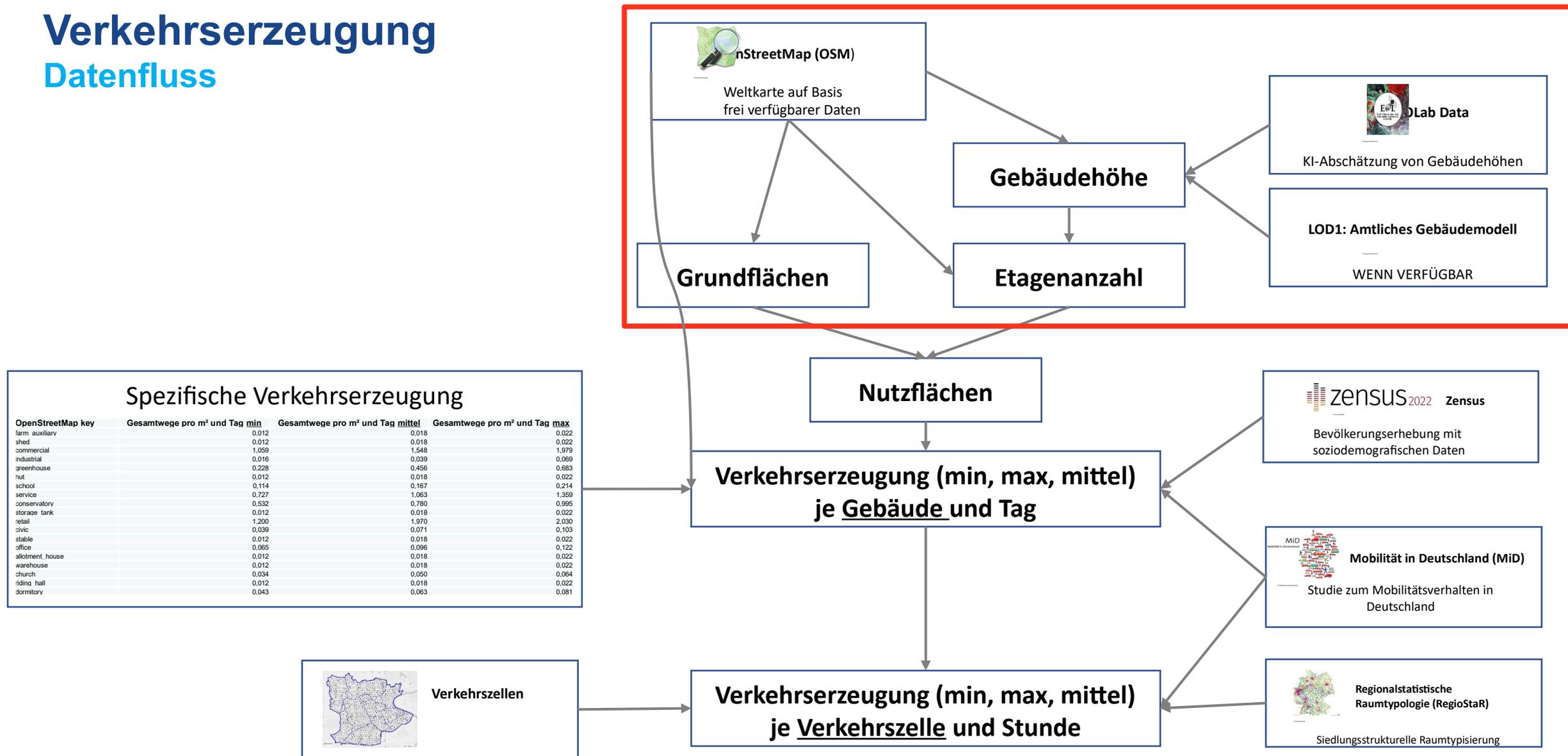
Spezifische Verkehrserzeugung

OpenStreetMap key	Gesamtwege pro m ² und Tag min	Gesamtwege pro m ² und Tag mittel	Gesamtwege pro m ² und Tag max
farm_auxiliary	0.012	0.018	0.022
shed	0.012	0.018	0.022
commercial	1.059	1.548	1.979
industrial	0.016	0.039	0.069
greenhouse	0.228	0.456	0.683
hut	0.012	0.018	0.022
school	0.114	0.167	0.214
service	0.727	1.063	1.359
conservatory	0.532	0.780	0.995
storage_tank	0.012	0.018	0.022
retail	1.200	1.970	2.030
civic	0.039	0.071	0.103
stable	0.012	0.018	0.022
office	0.065	0.096	0.122
apartment_house	0.012	0.018	0.022
warehouse	0.012	0.018	0.022
church	0.034	0.050	0.064
riding_hall	0.012	0.018	0.022
dormitory	0.043	0.063	0.081



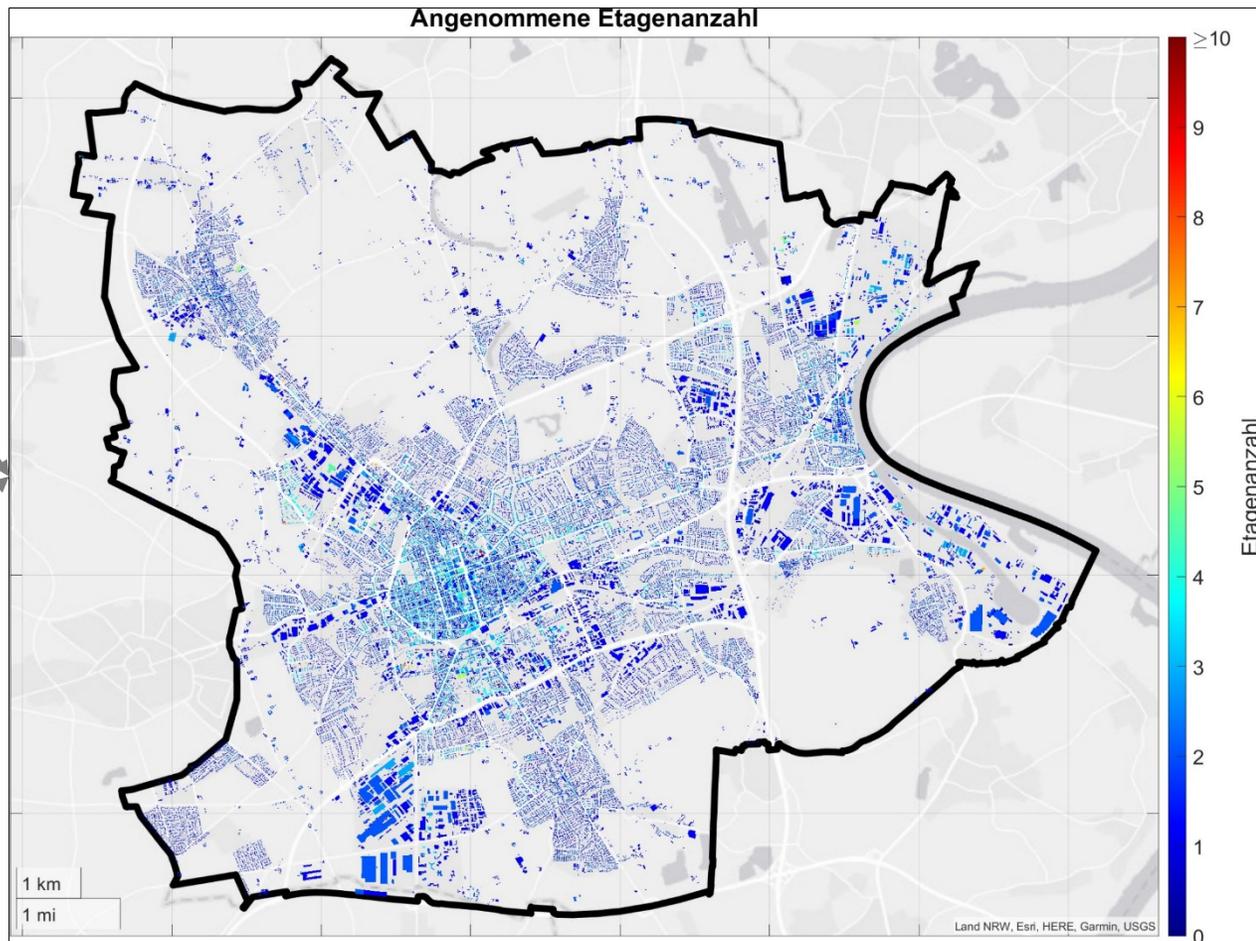
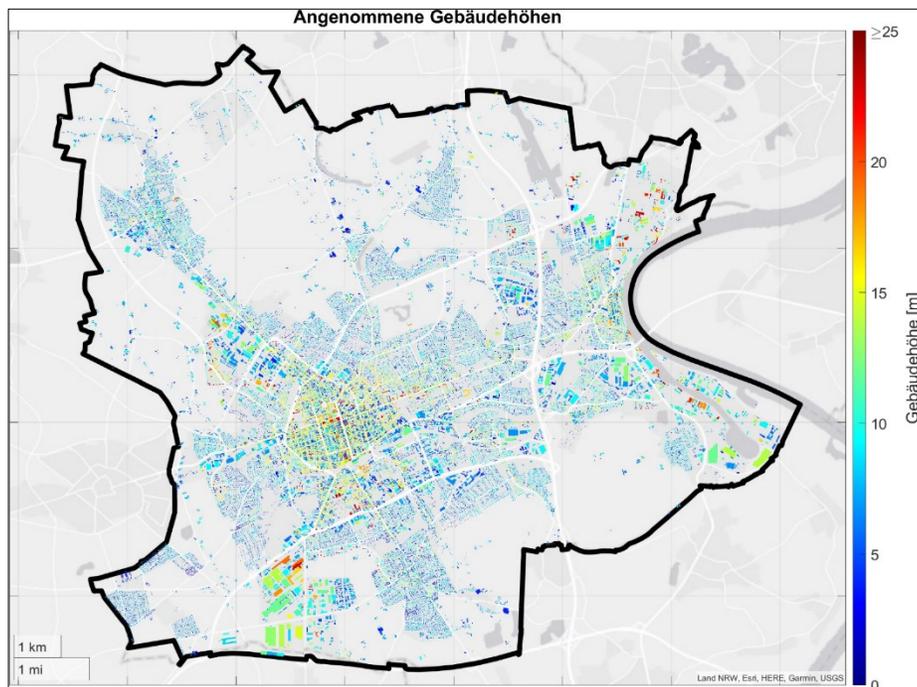
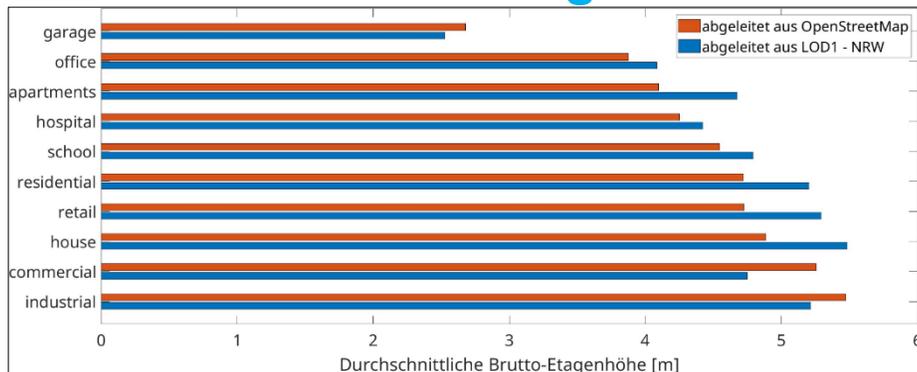
Verkehrserzeugung

Datenfluss



Verkehrserzeugung

Gebäudehöhen und abgeschätzte Etagen

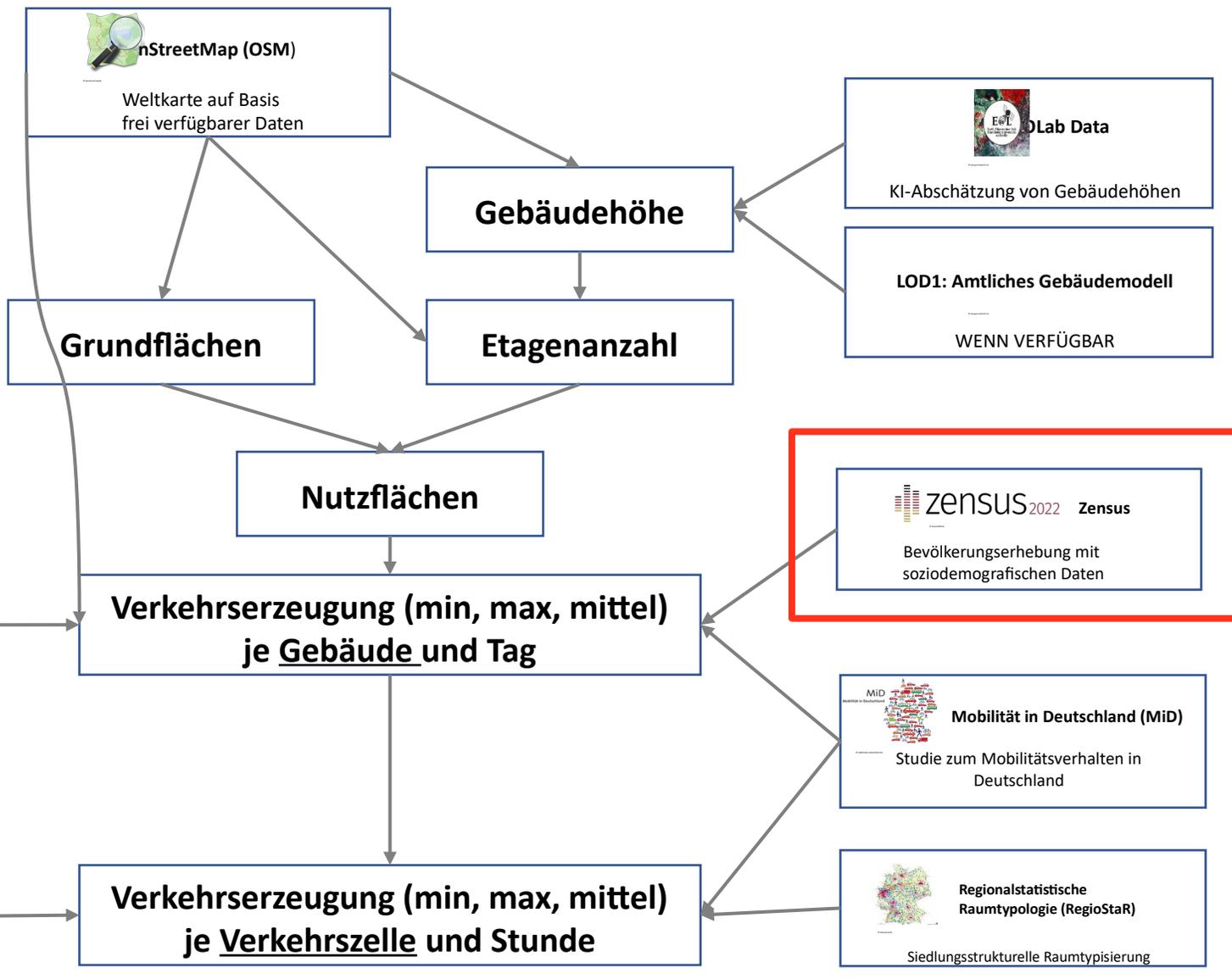


Verkehrserzeugung

Datenfluss

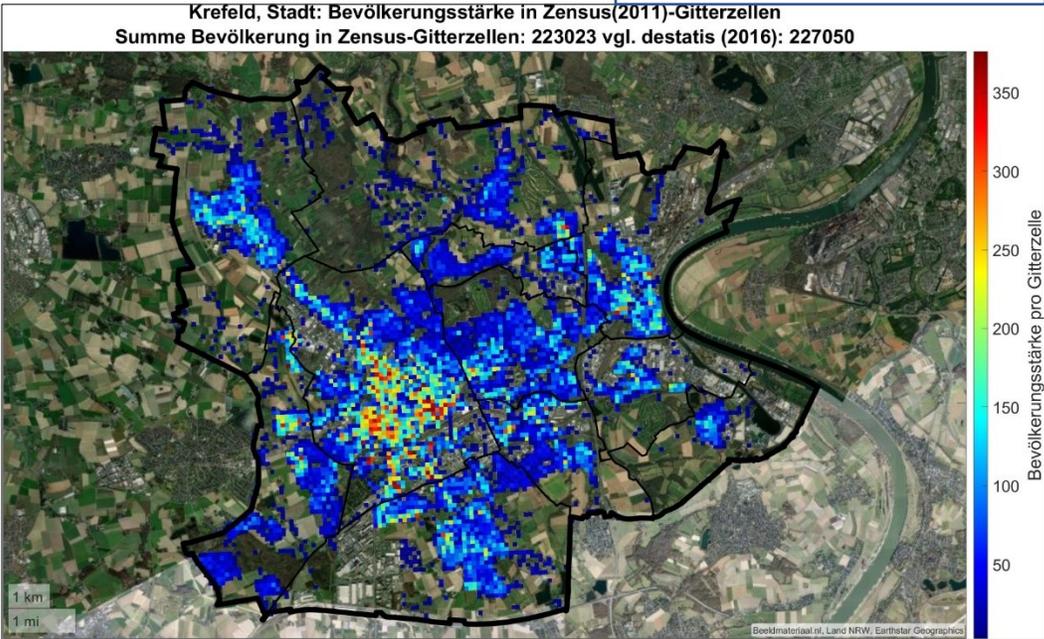
Spezifische Verkehrserzeugung

OpenStreetMap key	Gesamtwege pro m² und Tag min	Gesamtwege pro m² und Tag mittel	Gesamtwege pro m² und Tag max
farm_auxiliary	0.012	0.018	0.022
shed	0.012	0.018	0.022
commercial	1.059	1.548	1.979
industrial	0.016	0.039	0.069
greenhouse	0.228	0.456	0.683
hut	0.012	0.018	0.022
school	0.114	0.167	0.214
service	0.727	1.063	1.359
conservatory	0.532	0.780	0.995
storage_tank	0.012	0.018	0.022
retail	1.200	1.970	2.030
civic	0.039	0.071	0.103
stable	0.012	0.018	0.022
office	0.065	0.096	0.122
apartment_house	0.012	0.018	0.022
warehouse	0.012	0.018	0.022
church	0.034	0.050	0.064
riding_hall	0.012	0.018	0.022
dormitory	0.043	0.063	0.081



Verkehrserzeugung Bevölkerung in Verkehrszellen

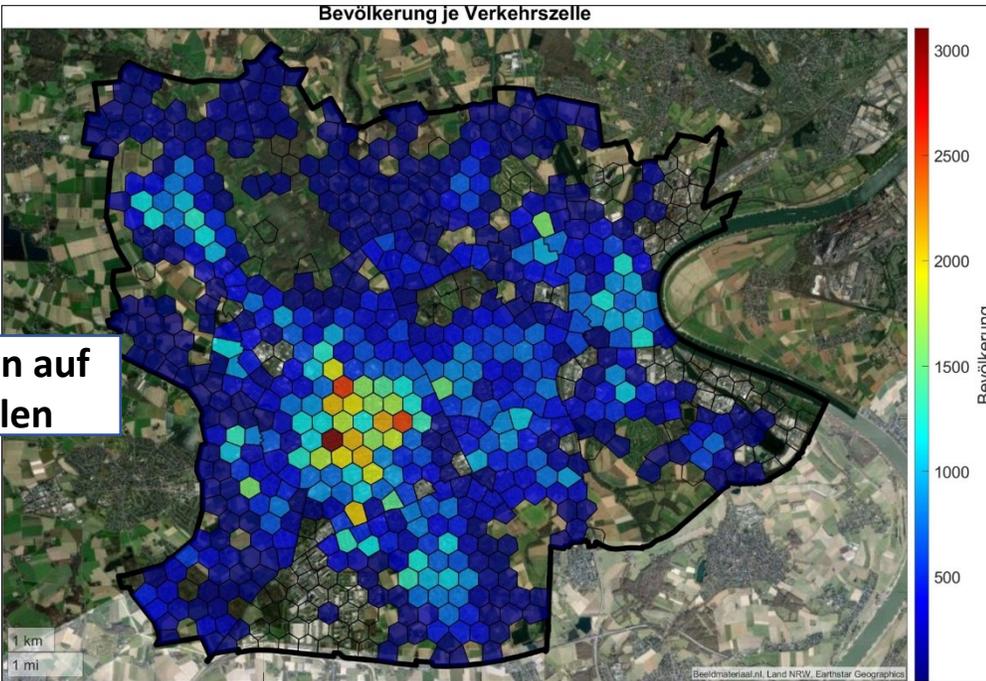
zensus2022 Zensus
Bevölkerungserhebung mit
soziodemografischen Daten



**Aggregation auf
Wohngebäude-
Nutzflächen**



**Disaggregation auf
Verkehrszellen**



Verkehrserzeugung

Gebäudeaufteilung zu Aktivitäten

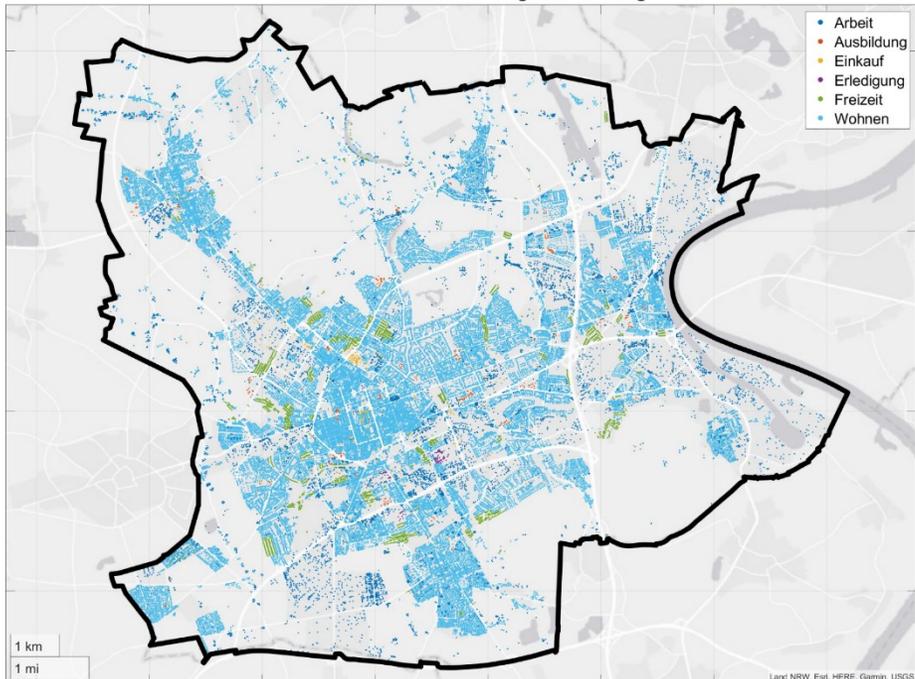
Verkehrserzeugung (min, max, mittel) je Verkehrszelle und Stunde

Anteil vereinfachter Gebäudenutzung prozentual abgeschätzt

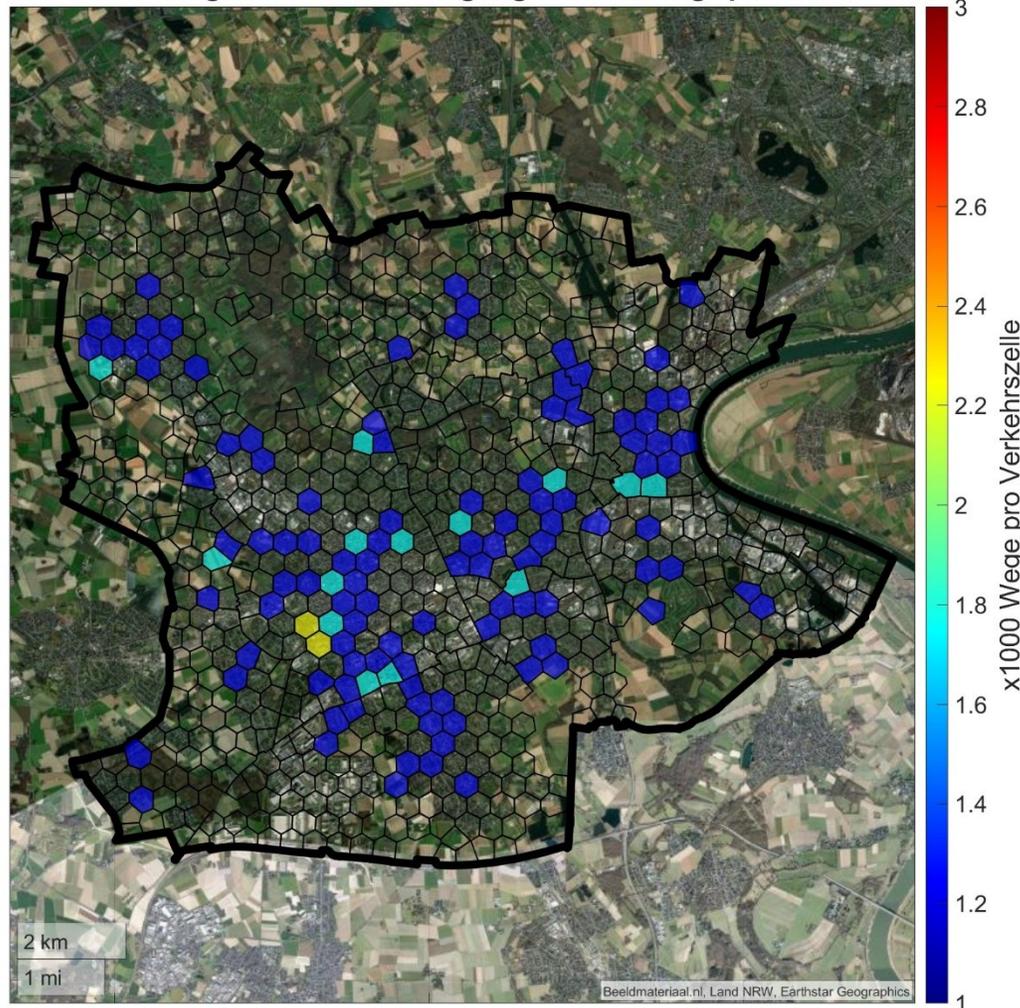
Arbeit | Ausbildung | Einkauf | Erledigung | Freizeit | Wohnen

Gebäude und deren überwiegende Nutzung

- Arbeit
- Ausbildung
- Einkauf
- Erledigung
- Freizeit
- Wohnen

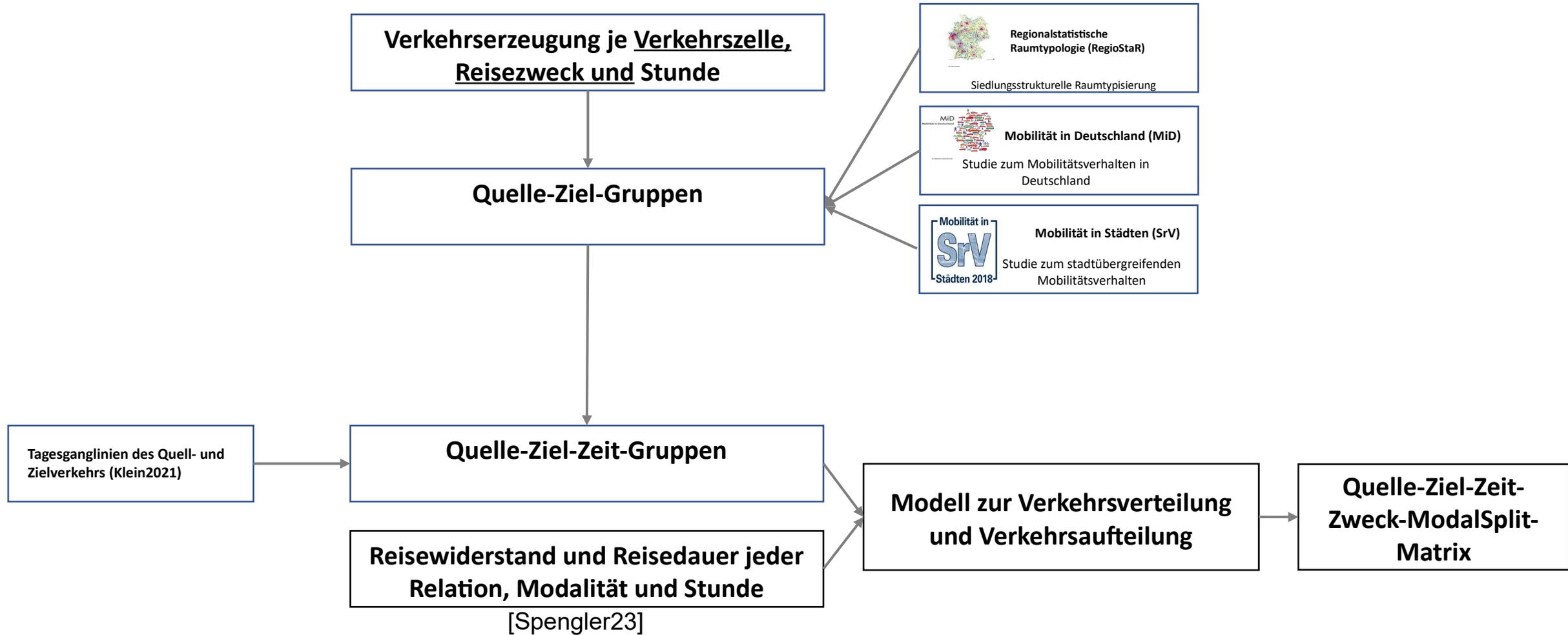


Summe der anteiligen Verkehrserzeugung "Ausbildung" pro Verkehrszelle



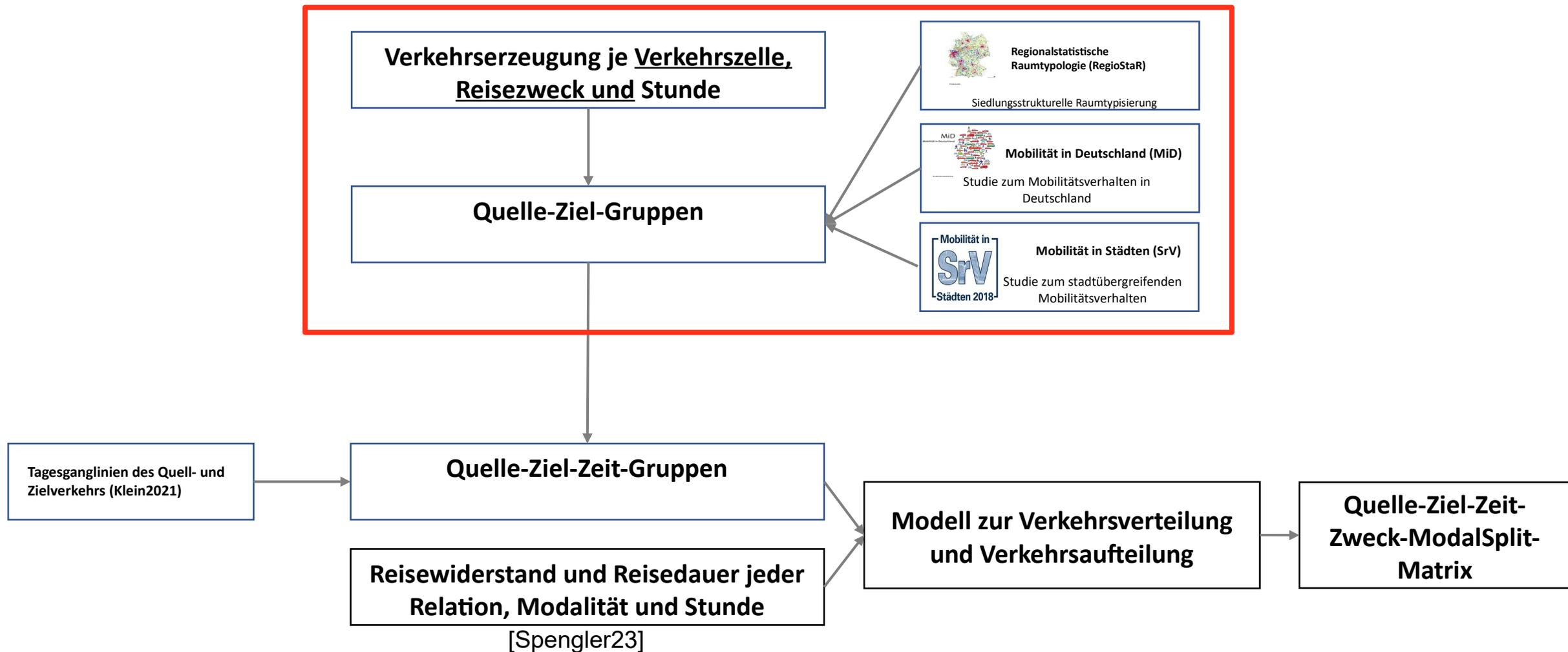
Verkehrsverteilung

Datenfluss



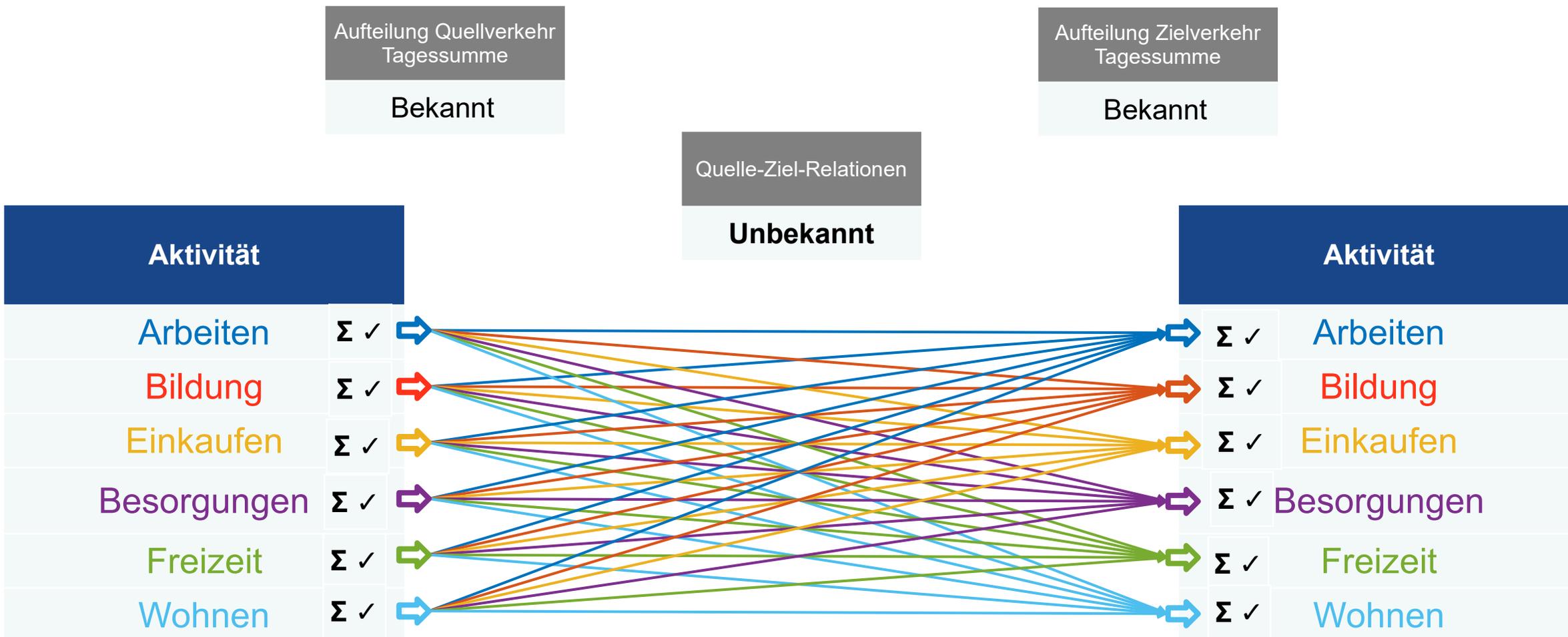
Verkehrsverteilung

Datenfluss



Verkehrsverteilung

Problemstellung Quelle-Ziel-Gruppen



Verkehrsverteilung

Problemstellung Quelle-Ziel-Gruppen: Ansatz Wegeketten

Aus [SrV13]: Aktivitätenketten

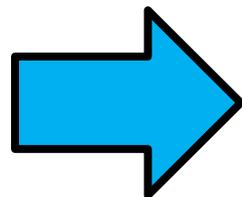
Mobilität in Städten – SrV 2013 Große SrV-Vergleichsstädte

Tab 13.2

Zeitraum: **Gesamtes Jahr**
 Wochentag: **Mittlerer Werktag**
 Berechnet am: **25.02.2016**

Aktivitätsmuster der Personen am Stichtag (Ausgänge)
(15 häufigste Muster)

Aktivitätsmuster	Anteil an Ausgängen
WFW	19,8 %
WEW	18,7 %
WAW	15,4 %
WBW	9,1 %
WKW	3,8 %
WEEW	2,7 %
WAEW	1,9 %
WDW	1,2 %
WFEW	1,1 %
WAFW	1,0 %
WAFAW	1,0 %
WEFW	1,0 %
WSW	1,0 %
WFFW	0,9 %
WEEEW	0,7 %
Sonstige Muster	20,4 %
Summe	100 %
Ungewichtete Fallzahl	72.031
Gewichtete Fallzahl	70.040



- A - Arbeiten
 - B - Bilden
 - D - Dienstlich/geschäftlich
 - E - Einkaufen/Versorgen
 - F - Freizeit
 - K - Kindereinrichtung
 - S - Sonstiges
 - W - Wohnen
- Hinweis:

Als Ausgang wird eine Aktivitätenkette bezeichnet, die von der Wohnung über Zwischenaktivitäten zurück zur Wohnung führt.

Quelle-Ziel-Gruppen

- Summe über gesamten Tag
- <80%

		Ziel					
		Arbeit	Ausbildung	Einkauf	Erledigung	Freizeit	Wohnen
Start	Arbeit	0%	0%	5%	5%	6%	17%
	Ausbildung	0%	0%	0%	0%	0%	13%
	Einkauf	0%	0%	5%	3%	2%	16%
	Erledigung	0%	0%	3%	3%	1%	10%
	Freizeit	4%	0%	6%	6%	3%	23%
	Wohnen	76%	80%	60%	62%	68%	0%
	Spaltensumme	79,60 %					

Verkehrsverteilung

Problemstellung Quelle-Ziel-Gruppen: Ansatz Wegeketten

Ziel-Verkehrserzeugung aus Verkehrszellen

Normiert mit: [MID17]

Nebenbedingungen

1. **Spaltensumme** muss zu [MID17] passen
2. **Zeilensumme** muss zu [MID17] passen
3. **Anzahl Wege** auf jeder Relation ≥ 0

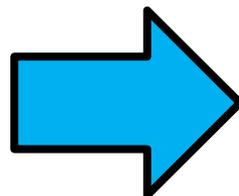
Kostenfunktion

Minimierung der Abweichung zu [SrV13]

Quelle-Ziel-Gruppen (80%)

		Ziel					
		Arbeit	Ausbildung	Einkauf	Erledigung	Freizeit	Wohnen
Start	Arbeit	0%	0%	5%	5%	6%	17%
	Ausbildung	0%	0%	0%	0%	0%	13%
	Einkauf	0%	0%	5%	3%	2%	16%
	Erledigung	0%	0%	3%	3%	1%	10%
	Freizeit	4%	0%	6%	6%	3%	23%
	Wohnen	76%	80%	60%	62%	68%	0%
	Spaltensumme	79,60 %	79,60 %	79,60 %	79,60 %	79,60 %	79,60 %

Parameter- schätzung

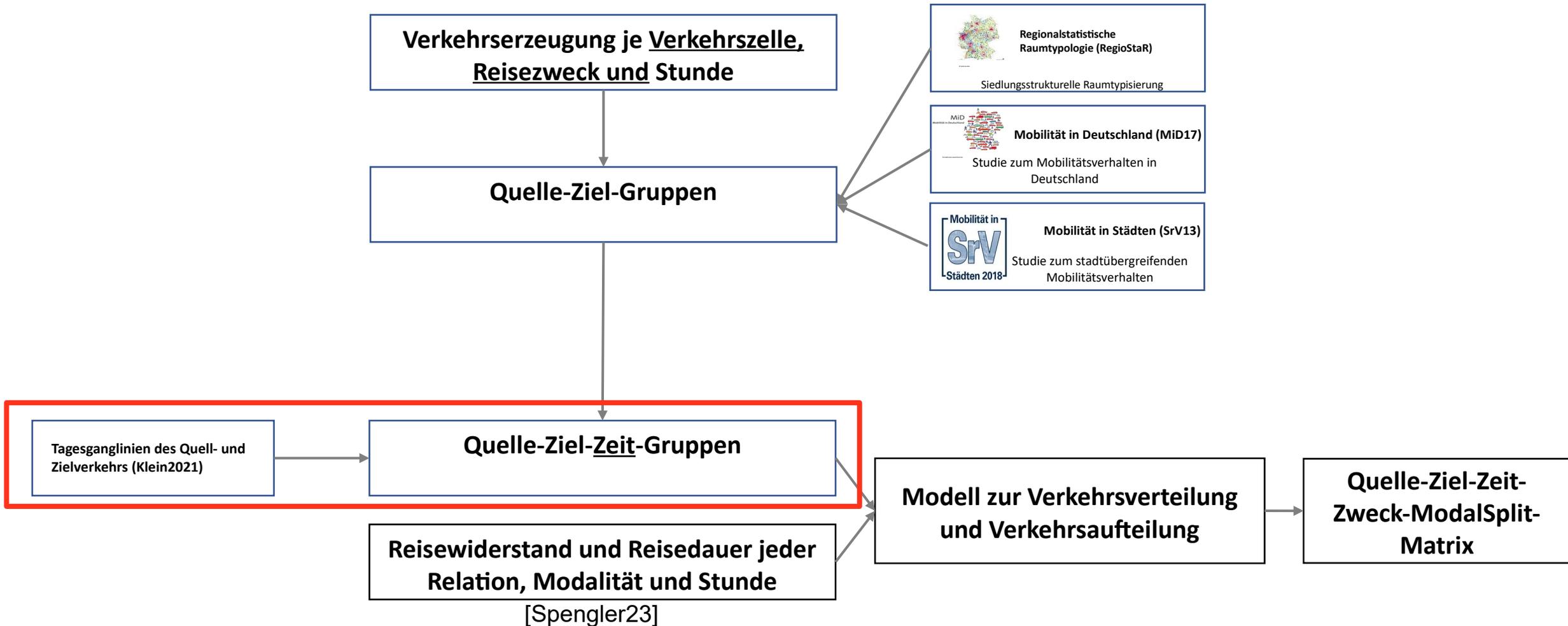


Quelle-Ziel-Gruppen (100%)

		Ziel					
		Arbeit	Ausbildung	Einkauf	Erledigung	Freizeit	Wohnen
Start	Arbeit	4%	4%	11%	11%	15%	10%
	Ausbildung	3%	3%	3%	3%	3%	7%
	Einkauf	3%	3%	9%	7%	5%	22%
	Erledigung	3%	3%	7%	7%	5%	19%
	Freizeit	8%	3%	10%	10%	6%	38%
	Wohnen	78%	83%	60%	62%	65%	3%
	Spaltensumme	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

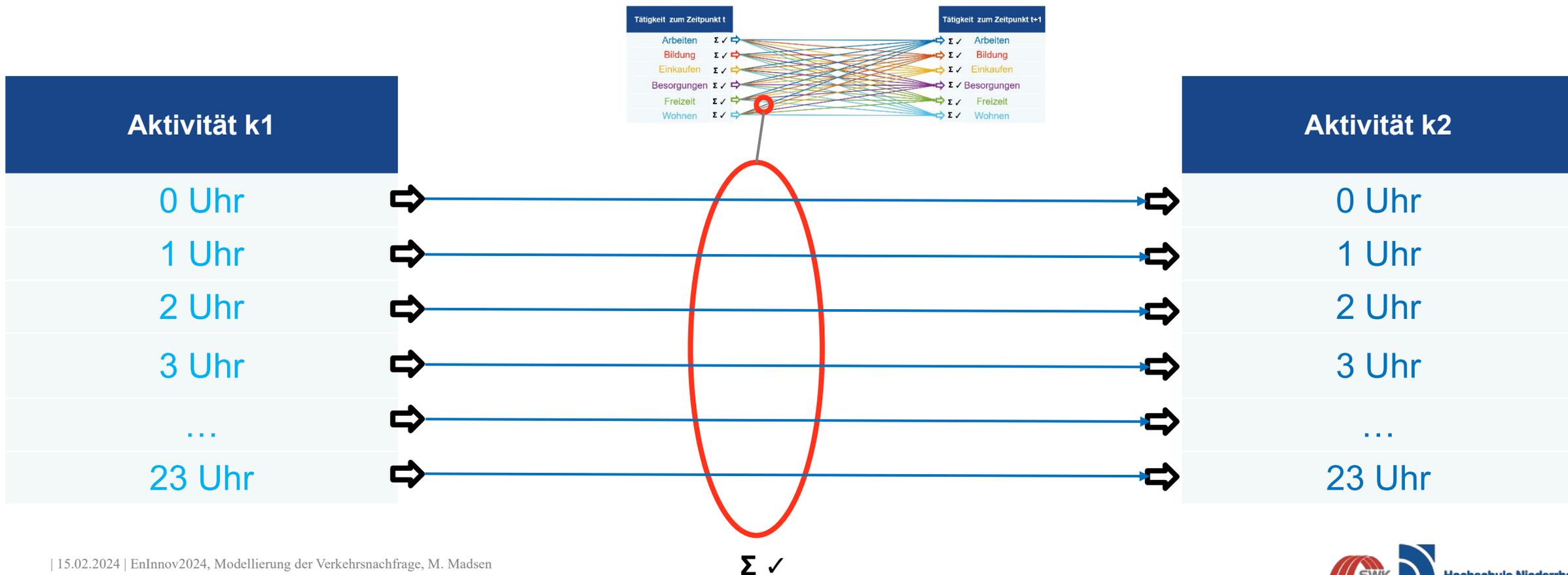
Verkehrsverteilung

Datenfluss



Verkehrsverteilung

Problemstellung Quelle-Ziel-Zeit-Gruppen



Verkehrsverteilung

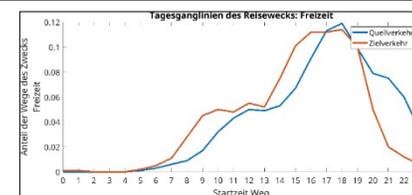
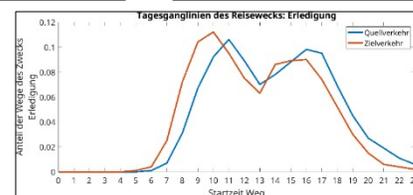
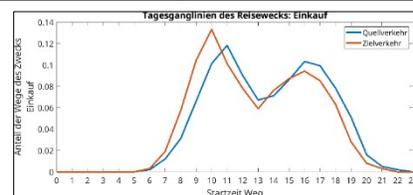
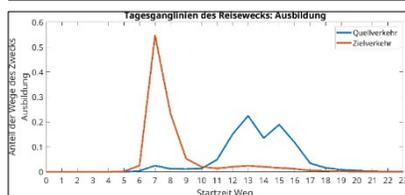
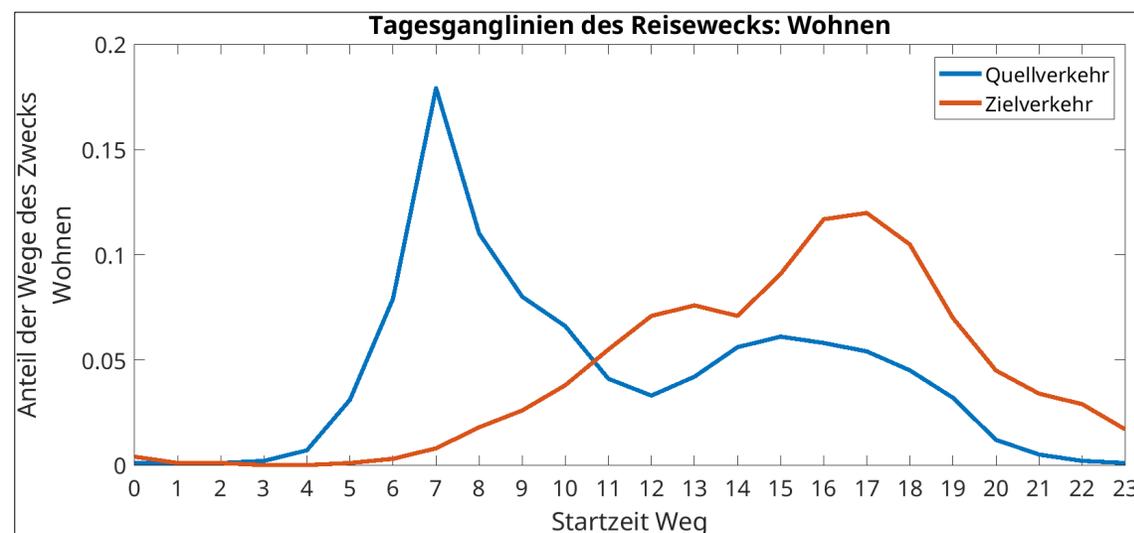
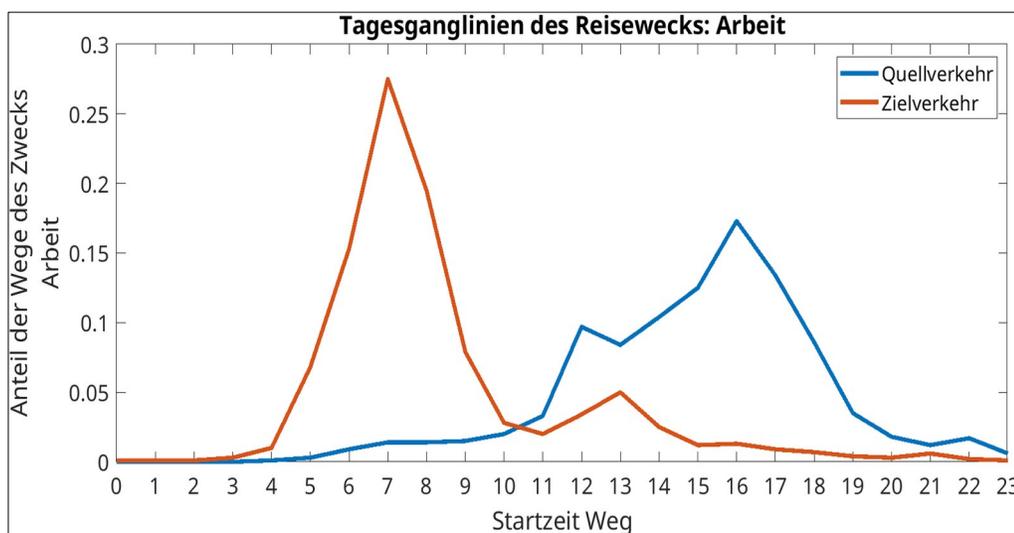
Problemstellung Quelle-Ziel-Zeit-Gruppen: Ansatz Tagesganglinien

[MID17]:

Anzahl Wege je Wegezweck (für jede Raumtopologie)

[Klein21] & [MID17]:

Tagesganglinien je Wegezweck



Verkehrsverteilung

Problemstellung Quelle-Ziel-Zeit-Gruppen: Ansatz Tagesganglinien

Nebenbedingungen

1. Resultierender **Quell- und Zielverkehr** muss **Tagesganglinien** entsprechen
2. Resultierender **Verkehr** muss den einzelnen **Quelle-Ziel-Gruppen** entsprechen
3. Anzahl Wege auf jeder Relation ≥ 0

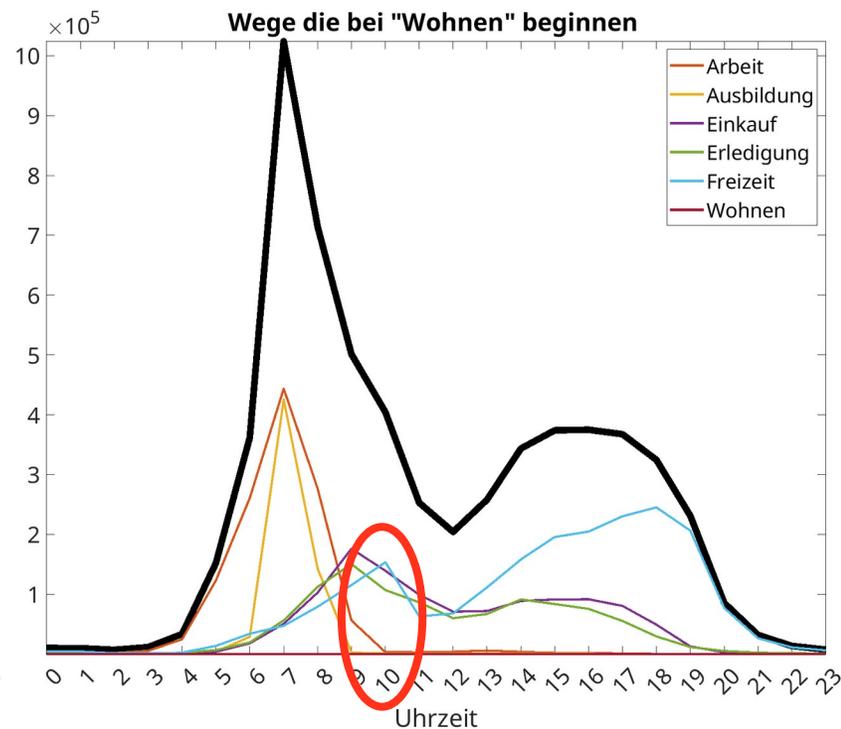
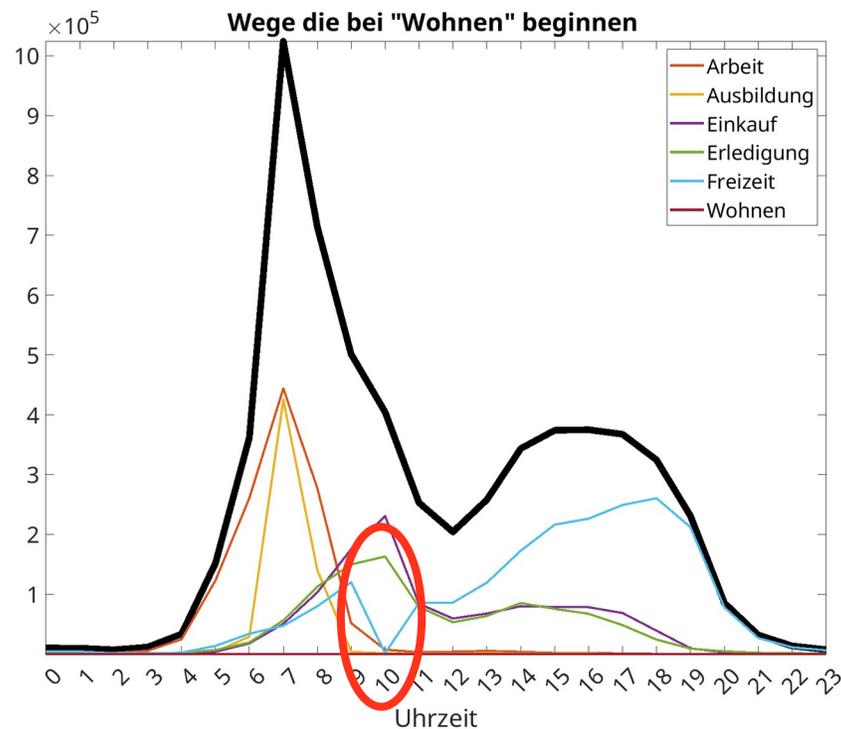
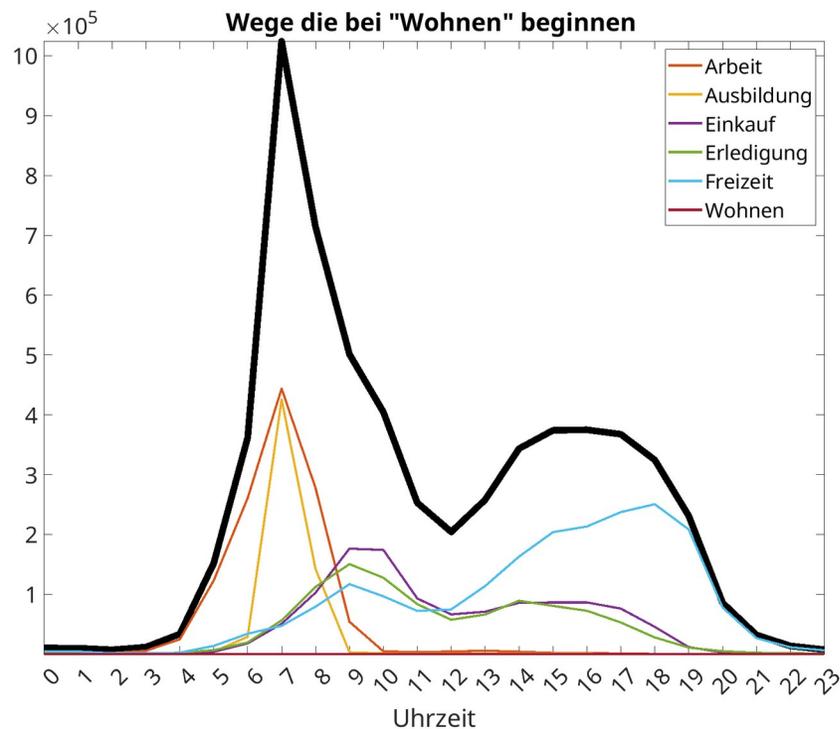
Problem unterbestimmt!

324 Gleichheitsbedingungen + 846 Ungleichheitsbedingungen

846 Parameter

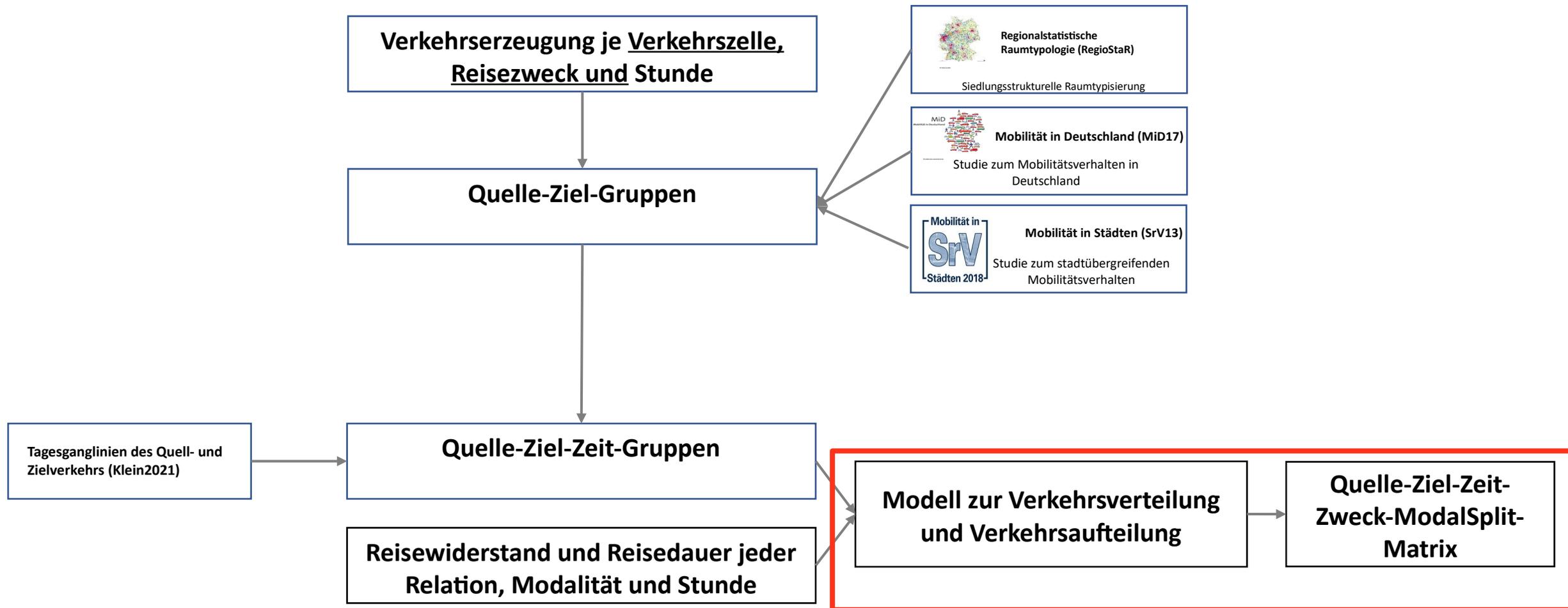
Verkehrsverteilung

Problemstellung Quelle-Ziel-Zeit-Gruppen: Ansatz Tagesganglinien



Verkehrsverteilung

Datenfluss



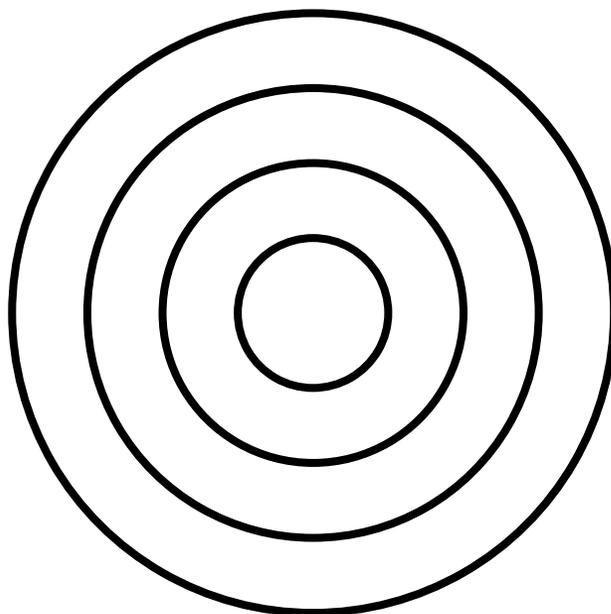
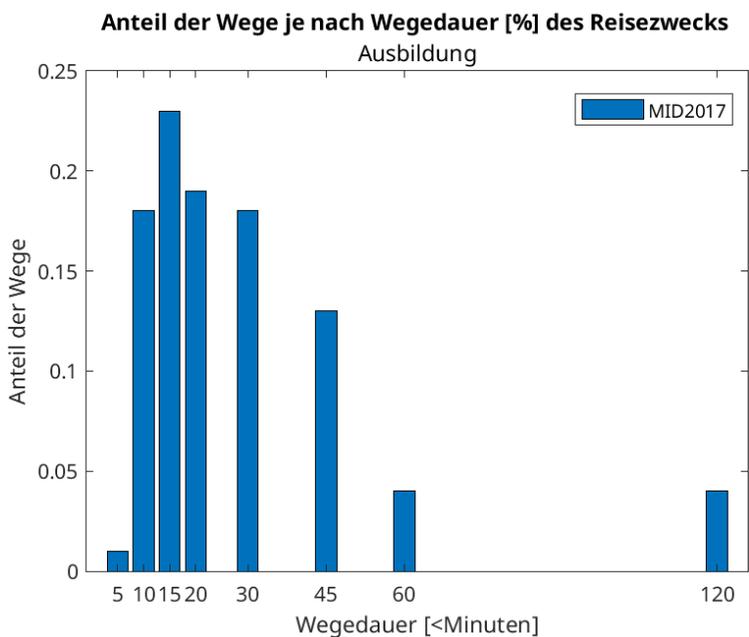
Verkehrsverteilung Analyse [MID17]

Mobilität in Deutschland 2017

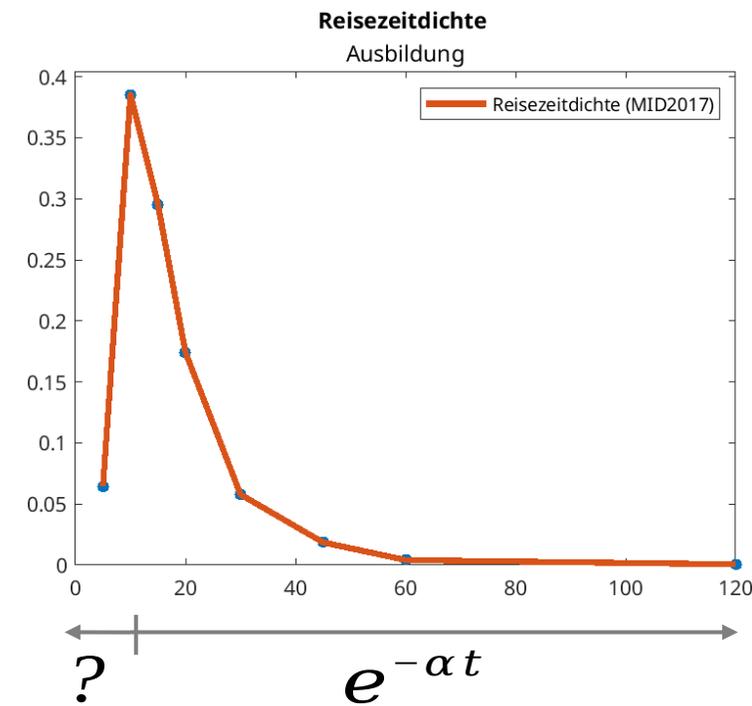
Vereinfachte Wegedauer-Isochrone

Vereinfachte Reisezeitdichte

Erreichbare Ziele steigen überproportional mit Wegedauer:



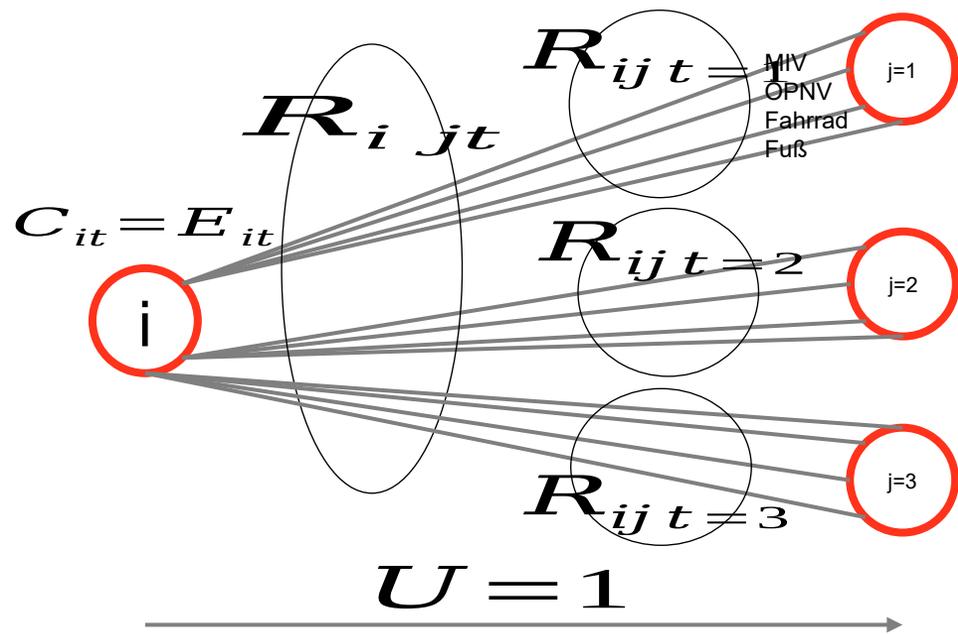
- ≤ 5 Minuten →
- ≤ 10 Minuten →
- ≤ 15 Minuten →
- ≤ 20 Minuten →



Verkehrsverteilung

Bewertungsfunktion

Problemstellung analog zu Elektrotechnischen Netzwerken:



C: Kapazität (In Anlehnung an Elektrotechnik)

t : Zeit

I : Quelle

J : Ziel

k : Aktivität oder Wegezweck

$$R_{ijt} = \frac{1}{\frac{1}{R_{ijt, MIV}} + \frac{1}{R_{ijt, ÖPNV}} + \frac{1}{R_{ijt, Rad}} + \frac{1}{R_{ijt, Fuß}}}$$

$$W_{ijkt} = \frac{E_{ikt} \cdot E_{jkt} \cdot e^{-\alpha_k \cdot R_{ijt}}}{\sum_{j=1}^J (E_{jkt} \cdot e^{-\alpha_k \cdot R_{ijt}})}$$

: Gesamtreisewiderstand aller Verkehrsmittel

: Quell-Verkehrserzeugung

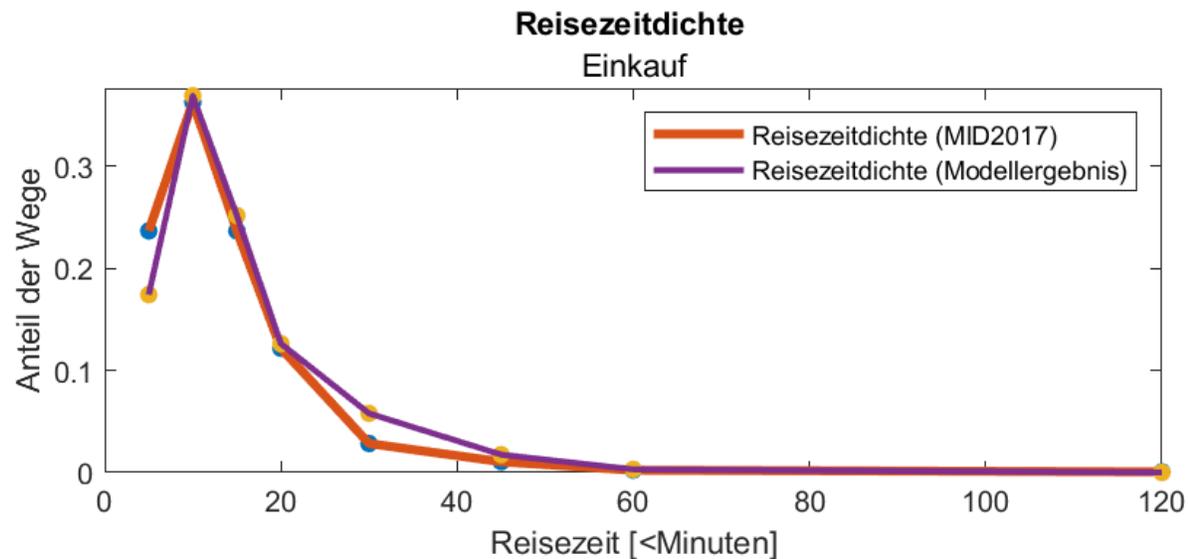
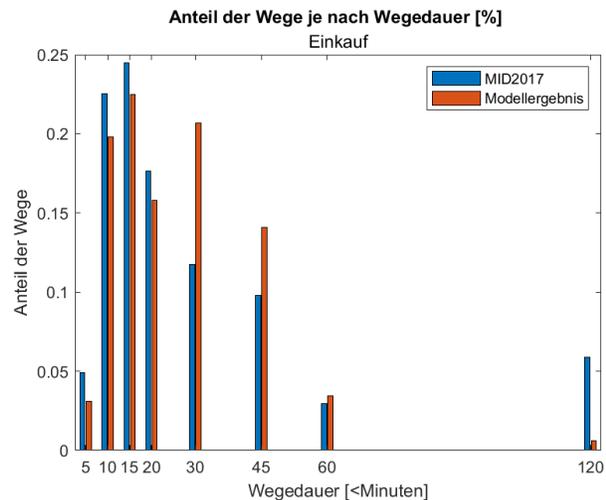
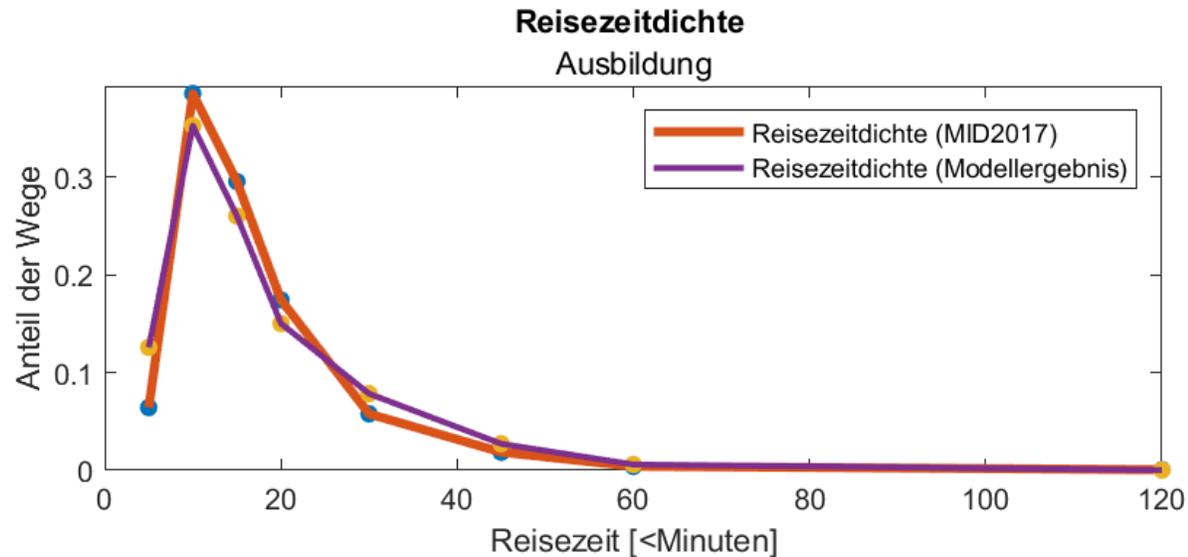
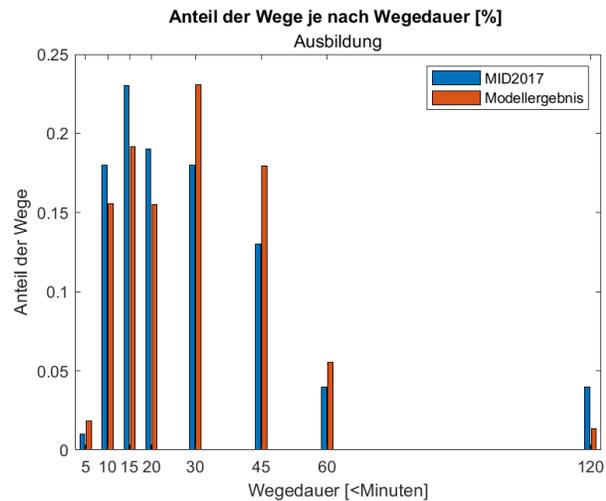
: Ziel-Verkehrserzeugung

: Wege

: Koeffizient

Verkehrsverteilung

Bewertungsfunktion



Ergebnis, Ausblick und Anwendungen

Ergebnis

- Methode schätzt hochaufgelöste **Quelle-Ziel-Zeit-Matrix**
- **Reisezeitdichteprofil** kann durch **Bewertungsfunktion** abgebildet werden
- Quelle-Ziel-Zeit-Gruppen – Problem noch **unterbestimmt**

Ausblick

- Ermittlung weiterer **Nebenbedingungen** für Parameterschätzverfahren
- Abschätzung der **Modalsplits** für jede Relation
- Empirische **Validierung**

Anwendungen

- Verkehrssimulationen
- Planung Straßen und Fahrradwege
- Planung ÖPNV-Ausbau / Optimierung ÖPNV
- Planung Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge
- Optimierung Lichtsignalanlagen

Literatur

- [OSM] OpenStreetMap und Mitwirkende. Planet dump [Datendatei vom 01.11.2023]. Abgerufen von <https://planet.openstreetmap.org>.
- [MID17] Follmer, Robert und Gruschwitz, Dana (2019): Mobilität in Deutschland – Kurzbericht. Ausgabe 4.0 der Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (FE-Nr. 70.904/15). Bonn, Berlin. www.mobilitaet-in-deutschland.de.
- [Bossert07] Bossert, D., & Vogt, W. (2007). Schätzung des Verkehrsaufkommens aus Kennwerten der Flächennutzung und des Verkehrs. In: Straßenverkehrstechnik, 51(2007), Teil 1: S. 12-20; Teil 2: S. 69-73. FGSV-Nr.: 147 FGSV Reader. ISBN: 3-939715-06-9.
- [LoD1] Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (IT.NRW). (2023). 3D-Gebäudemodell LoD1. Abgerufen von https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/3dg/lod1_gml/
- [EOLab23] Humboldt-Universität zu Berlin: Earth Observation Lab, Gebäudehöhenmodell <https://ows.geo.hu-berlin.de/webviewer/building-height/index.html>, Abgerufen am 04.12.2023.
- [Zensus11] Statistische Ämter des Bundes und der Länder. (2011). Zensus 2011: 100m x 100m Rasterdaten zu Gebäuden, Wohnungen, Haushalten, Familien und Personen. Abgerufen von www.zensus2011.de.
- [SrV13] Technische Universität Dresden, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr. (2013). SrV 2013: Mobilität in Städten. Abgerufen von <https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/srv/srv-2013>.
- [Klein21] Klein, T. Neue Tagesganglinien des Quell- und Zielverkehrs – Auswertung der MiD-Daten zum nutzungsspezifischen Tagesgang der Verkehrsnachfrage. Straßenverkehrstechnik, 65(3), 183-9. ISSN: 0039-2219, 2021.
- [Spengler23] L. Spengler et al., "From Modeling to Optimizing Sustainable Public Transport: A New Methodological Approach," Sustainability, vol. 15, no. 10, p. 8171, 2023.